



**ГУАП**

Государственный университет  
аэрокосмического приборостроения



## **ОБРАБОТКА, ПЕРЕДАЧА И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ'21**



**Международная  
научная конференция  
14–22 апреля 2021 г.**

**Санкт-Петербург**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

---

*Посвящается 80-летию  
Санкт-Петербургского государственного университета  
аэрокосмического приборостроения*

# ОБРАБОТКА, ПЕРЕДАЧА И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ '21

Международная научная конференция  
14–22 апреля 2021 г.

Сборник докладов



УДК 001  
ББК 72  
О-23

О-23 Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах '21: Международ. науч. конф. (СПб., 14–22 апреля 2021 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2021. – 245 с.

ISBN 978-5-8088-1557-5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021

В апреле 2021 г. в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения состоится Международная научная конференция «Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах», посвященная 80-летию ГУАП. В работе конференции примут участие ведущие ученые и специалисты предприятий, преподаватели, научные сотрудники и аспиранты вузов со всего мира.

Статьи сборника отражают основные направления научных исследований, обсуждаемые на конференции. Представленные работы посвящены актуальным проблемам обработки, передачи, защиты информации; проблемам построения современных компьютерных систем и вопросам автоматического управления; разработке перспективных вычислительных сетей, их математическому и программному обеспечению.

Сборник предназначен для научных работников, аспирантов, докторантов и студентов старших курсов технических вузов.

УДК 001  
ББК 72

Оргкомитет конференции

Председатель оргкомитета:

Ю. А. Антохина, доктор экономических наук, профессор, ректор ГУАП

Члены оргкомитета:

М. Б. Сергеев, Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
А. М. Тюрликов, Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
А. А. Овчинников, Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
С. В. Мичурин, Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

И. А. Пастушок, Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
Д. К. Ким, Университет Нархоз, Алматы, Казахстан  
С. Шнеер, Университет Хериот-Ватт, Эдинбург,  
Великобритания  
Г. Георгиев, «Центр энергетических решений» ЗК,  
Варна, Болгария  
Н. Блаунштейн, Университет им. Бен-Гуриона в Негеве,  
Беэр-Шева, Израиль

ISBN 978-5-8088-1557-5  
DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021

© Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического  
приборостроения, 2021

# ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ

## ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 004.4

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-3-6

**А. В. Аграновский\***

кандидат технических наук, доцент

**Е. Л. Турецкая\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

### КРИТЕРИИ ВЫБОРА ХОСТИНГ-ПРОВАЙДЕРА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ

*Проведен обзор различных типов хостингов, приведены критерии выбора хостинг-провайдера на примере виртуального сервера. Теоретическую информацию, представленную в докладе, сопровождают примеры расчетов технических параметров, которые требуется учитывать при решении вопроса о публикации веб-приложения в сети Интернет. Материалы доклада внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению «Прикладная информатика».*

**Ключевые слова:** хостинг-провайдер, сервер, веб-приложение, веб-программирование.

**A. V. Agranovskii\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**E. L. Turnetskaya\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

### CRITERIA FOR CHOOSING A HOSTING PROVIDER FOR THE EFFECTIVE FUNCTIONING OF A WEB APPLICATION

*The report provides an overview of various types of hosting services, provides criteria for choosing a hosting provider on the example of a virtual server. The theoretical information presented in the report is accompanied by examples of calculations of technical parameters that need to be taken into account when deciding whether to publish a web application on the Internet. The materials of the report are implemented in the educational process when preparing bachelors in the direction of «Applied Informatics».*

**Keywords:** hosting provider, server, web application, web programming.

При обращении с запросами к поисковым системам или специализированным веб-каталогам hosting101.ru (<http://hosting101.ru/>) или HostDB.ru (<https://hostdb.ru/>) будут представлены различные предложения от хостинг-провайдеров. Адекватность последующего выбора потребностям разработанного веб-проекта зависит от квалификации специалиста, принимающего решение. Поэтому при изучении дисциплин «Интернет-программирование» и «Автоматизация проектирования интернет-приложений», которые входят в программу обучения магистров по направлению 09.04.03 «Прикладная информатика» и производственной практики бакалавров по направлению обучения 09.03.03 «Прикладная

информатика» включена тема о правилах и критериях выбора хостинг-провайдеров.

Различают следующие виды хостингов в зависимости от объемов предоставляемых ресурсов: виртуальный, VPS (Virtual Private Server), облачный, выделенный и colocation (табл. 1).

Для учебных веб-проектов студенты, как правило, выбирают виртуальный хостинг. Поэтому далее будут рассмотрены критерии выбора хостинга данного типа.

Распределим параметры, которые учитывают при выборе хостинга, по категориям:

- тип хостинга (платный или бесплатный);
- тарифный план;

Таблица 1

**Основные виды и характеристики хостинга для веб-приложений**

Тип хостинга	Назначение
Виртуальный (Shared)	Предназначен для статических сайтов с трафиком посетителей менее 7 тыс. человек в день (сайт-портфолио, лендинг, блог). Предлагает совместное равноправное использование ресурсов сервера: дискового пространства, процессорного времени, памяти и т. д.; не требует навыков программирования при работе в административной панели. Увеличение запросов ресурсов одного из клиентов приводит к пропорциональному уменьшению ресурсов, выделенных другому клиенту сервиса
VPS	Выделяет дисковое пространство с одновременным резервированием вычислительных мощностей (CPU, RAM) на каждый проект, ежедневный трафик посетителей которого не превышает 15 тыс. человек в день. Для продуктивной работы необходимы навыки программирования и технические знания, связанные с администрированием сервера и настройкой требуемых программных решений
Облачный (Cloud hosting)	Клиенту предоставляют кластер высокопроизводительных облачных серверов. При сбое в работе одного из них веб-проект (мобильные приложения, проекты с трафиком посетителей более 15 тыс. человек в день) будет автоматически подключен к другому. Не требует глубоких знаний по администрированию сервера, но возможны проблемы, связанные с ограничением прав пользователя на выполнение отдельных настроек сервера
Выделенный (Dedicated)	Предназначен для больших интернет-проектов с ежедневным трафиком посетителей более 15 тыс. человек в день (интернет-магазин, корпоративный портал), которые размещают на специально выделенном под этот проект сервере в центре обработки данных. Под конкретный проект выделяют вычислительные мощности, предусмотрена возможность установки требуемых программных продуктов
Colocation-сервер	Предполагает размещение оборудования клиента в дата-центре провайдера и подключение ко всем технически важным сетям: электропитанию, каналам связи, обслуживающему персоналу, системе безопасности. Предназначен для ресурсоемких проектов

- требования к уровню знания программирования;
- вычислительные мощности и количественные параметры;
- техническая поддержка;
- безопасность сайта;
- наличие тестового периода;
- бонусы, предоставляемые клиентам сервиса.

Рассмотрим технические параметры услуг для определения критически важных точек при выборе виртуального сервера, на котором будет размещено реализованное интернет-приложение [1].

1. *Количество сайтов, подключаемое по выбранному тарифу.* Данный параметр определяет количество сайтов (доменных имен), которые можно подключить к учетной записи клиента в соответствии с выбранным тарифным планом. Для учебных проектов достаточно выбирать самый простой тариф, чаще всего бесплатный с количеством подключаемых сайтов не более трех. Как правило, для увеличения трафика посетителей на один сайт кроме основного доменного имени регистрируют несколько дополнительных. Поэтому важно выбрать хостинг-провайдера, который поддерживает несколько доменных имен внутри одной клиентской записи, например [2]:

- домены с кириллическими символами и без них (сайт.ru или site.ru);

- версии доменов для разных географических регионов (.ru, .kz, .by);
- домены с префиксами и без них;
- домены с опечатками и т. д.

2. *Дисковое пространство, выделяемое для веб-приложения.* При определении требуемого объема дискового пространства сервера учитывают, какие объекты подлежат хранению. Как правило, к ним относят базу данных и ее резервные копии, выполненные самим клиентом; собственные файлы веб-приложения, например медиафайлы или файлы, хранящие программную реализацию приложения (HTML, CSS, PHP, JavaScript); сообщения электронных почтовых адресов (входящая и исходящая почта); файлы журналов с записью всех действий на сервере.

При определении требуемого дискового пространства сервера для хранения учебного сайта, реализованного средствами CMS WordPress, реализованного во время прохождения производственной практики на базе кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов руководители практики предлагают проводить расчет на основании следующих количественных данных:

- установка WordPress без темы и плагинов резервирует около 64 МБ и содержит 2145 файлов;

– размер одной текстовой записи составляет не менее 1000 знаков, что в кодировке UTF-8 занимает приблизительно 1 Кбайт;

– размер одной фотографии без оптимизации – около 6 Мбайт;

– автоматически создаваемые миниатюры каждого изображения – около 4 Мбайт.

При расчете определяют количество возможных записей в базе данных и добавленных фотографий в течение одного года после публикации веб-приложения в сети Интернет. На основании проведенных вычислений выбирают тарифный план, поддерживающий такой объем, например 200 Мбайт, 16 Гбайт или 100 Гбайт.

3. *Тип серверных дисков (HDD, SDD, SSD NVMe)* задает ограничения на скорость загрузки и производительность веб-приложения. В табл. 2 приведены результаты сравнения производительности таких дисков [2].

Анализируя полученные результаты тестирования, можно сделать вывод, что для оптимальных скорости загрузки и времени отклика веб-приложение, реализованное на CMS WordPress, следует размещать на хостинге с SSD-дисками.

4. *Количество почтовых ящиков.* В тарифном плане прописывают количество дискового пространства, отведенного под данные электронных почтовых ящиков. Следует провести расчет предполагаемой серверной загрузки, учитывая размер одного письма с вложениями (3 или 5 Мбайт), максимальное количество отправляемых/получаемых писем в день/час; максимальное количество получателей для одного письма (например, не более 100 получателей). Кроме этих количественных показателей проверяют наличие услуги спам-фильтрации.

5. *Трафик (пропускная способность),* предлагаемый хостинг-провайдером, показывает, характеризует скорость обмена данными между сервером и компьютером пользователя. Как правило, в тарифных планах он указан как безлимитный. При определении параметров загрузки разработанного веб-приложения можно исходить из того, что средний вес страницы из сети Интернет составляет 3, 15 Мбайт [3]. При разработке веб-приложения определяют желаемое количество уникальных посетителей в месяц, среднее время просмотра веб-страниц, среднее количество просмотренных страниц за каждый визит. Для расчета все показатели перемножаются между собой.

Кроме пропускной способности обращают внимание на информацию о стабильности сервера, UpTime (время непрерывной работы сервера), времени ответа сервера и т. д.

6. *Версии языка программирования PHP,* поддерживаемые хостингом. Данный критерий определяет производительность веб-сервера. На официальном сайте WordPress [2] размещена информация о производительности разных версий PHP на примере обработки данных сайта, реализованного на версии WordPress 5.4 (рис. 1). На графике по оси ординат отложено количество запросов в секунду.

Полученные результаты показывают, что версии PHP, начиная с версии 7.0, более чем в 2,5 раза быстрее, чем предыдущие. Каждая последующая версия становится более высокопроизводительной, чем предыдущая.

Поэтому при выборе хостинга проверяют, какие версии PHP он поддерживает [3].

7. *Серверное программное обеспечение (ПО).* Виртуальный хостинг реализуют на различном серверном ПО, например, Apache (<https://httpd>).

Таблица 2

Сравнительные характеристики дисковых накопителей

Тип диска Критерии	HDD	SSD	SSD NVMe
Пропускная способность чтения	215 МБ/с	560 МБ/с	3,200 МБ/с
Пропускная способность записи	215 МБ/с	530 МБ/с	1,900 МБ/с
Чтение IOPS (количество операций в сек.)	84	100 000	380 000
Запись IOPS (количество операций в сек.)	207	90 000	360 000



Рис. 1. Сравнение производительности разных версий PHP

apache.org/), Nginx (<https://nginx.org/ru/>) и LiteSpeed (<https://www.litespeedtech.com/>).

На официальном сайте LiteSpeed [4] опубликованы результаты сравнения производительности между этими веб-серверами: сервер LiteSpeed (69618,5); Nginx (6025,3), Apache (825,5). Тестирование производилось по скорости обработки запросов от 100 пользователей в секунду. На основании полученных данных при выборе хостинг-провайдеров приоритет будет отдан тем, у которых установлено ПО LiteSpeed.

8. *Количество и типы поддерживаемых баз данных.* При выборе хостинг-провайдера А. Вольский предлагает уточнить следующие параметры [2]:

- максимальный размер базы данных;
- максимальное количество одновременных подключений к базе данных;
- количество одновременных подключений одного пользователя к базе данных;
- максимальная длительность одного запроса к БД.

9. *Защита сайта на хостинге.* Многие интернет-пользователи переходят только на те сайты, которые используют защищенную передачу данных между браузером посетителя и веб-приложением. Идентификация веб-приложения производится на основании защищенного протокола HTTPS. Это правило особенно важно при приеме/отправке конфиденциальной информации от посетителя, проведении операций транзакции и т. д. Поэтому при выборе хостинга отдают предпочтение провайдеру, бесплатно предоставляющему SSL- или TSL-сертификаты, подтверждающие криптографическую защиту передаваемых данных от действий злоумышленников.

К базовым функциям обеспечения безопасности работы веб-приложения со стороны сервера относят:

- автоматическое резервное копирование, позволяющее восстановить функционирование веб-приложения после сбоя в работе;
- фильтрацию спама;
- защиту от DDOS-атак;
- обеспечение безопасности DNS-серверов;
- поддержку механизмов аутентификации писем электронной почты клиента хостинга.

10. *Удобство использование административной панели.* Для программной настройки веб-приложения с целью эффективной работы на конкретном сервере хостинг-провайдеры предлагают различные виды административных панелей, отличающиеся внешним видом и интерфейсом: ISPmanager, cPanel, Plesk и др. [5].

При выборе хостинга следует внимательно ознакомиться с правилами технической под-

держки, длительностью тестового периода, местоположением дата-центров, ценовой политикой, публичностью хостера, отзывами и официальными рейтингами провайдеров. Например, по данным мониторинго-аналитического сервиса Statonline [6] первые пять позиций рейтинга «Топ-20 хостинг-провайдеров зоны .RU» на ноябрь 2020 года занимают компании [1]: REG.RU (21,7 % доли в группе), BeGet (13 %), TIMEWEB (8,9 %), Variti (4,9 %), RU-CENTER (4,9 %). Тарифный план определяет объем и стоимость предоставляемых хостинг-провайдером услуг.

Знание вышеперечисленных правил и критериев выбора хостинга позволят студентам, которые выберут в качестве области профессиональной деятельности веб-программирование или администрирование веб-систем, овладеть профессиональными компетенциями, требуемыми ФГОС по направлению подготовки «Прикладная информатика».

#### Библиографический список

1. Палаш Б. В. Обзор рынка хостинг-провайдеров // Наука без границ. 2019. № 6 (34). С. 33–36.
2. Вольский А. Как выбрать хостинг для сайта? Полное руководство 2020. URL: <https://hostingi.info/tutorial/> (дата обращения: 04.12.2020).
3. Официальный сайт поддержки языка PHP. URL: <https://www.php.net/supported-versions.php> (дата обращения: 04.12.2020).
4. Официальный сайт веб-сервиса Litespeedtech. URL: <https://www.litespeedtech.com/> (дата обращения: 04.12.2020).
5. Блог компании RUVDS.com. URL: <https://habr.com/ru/company/ruvds/blog/478830/> (дата обращения: 04.12.2020).
6. Мониторинго-аналитический сервис Statonline. URL: <https://statonline.ru/> (дата обращения: 04.12.2020).

УДК 004.02

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-7-12

**Б. К. Акопян\***

ассистент

*\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

## ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О КЛАССИФИКАЦИИ НАРУШЕНИЙ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Приведен краткий обзор алгоритмов обнаружения QRS-комплексов и анализа сердечного ритма по длительности RR-интервала, которые могут быть использованы для разработки систем поддержки принятия решений о классификации нарушений сердечного ритма.

**Ключевые слова:** электрокардиосигнал, электрокардиограмма, QRS-комплекс, автоматическая обработка, принятие решений.

**В. К. Акорян\***

Assistant

*\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

## OVERVIEW OF THE ELECTROCARDIOGRAM PROCESSING ALGORITHMS USED FOR HEART RHYTHM DISORDERS CLASSIFICATION SYSTEMS

A brief overview of the algorithms for QRS-complexes detection and heart rate analyze by the duration of the RR interval, which can be used for development of the decision support systems for the classification of heart rhythm disorders, is given.

**Keywords:** electrocardiosignal, electrocardiogram, QRS-complex, automatic processing, decision.

### Введение

Современная электрокардиография характеризуется широким применением цифровых электрокардиографов и кардиомониторов со встроенными алгоритмами автоматической обработки, анализа и интерпретации электрокардиограмм (ЭКГ) [1]. В частности, такие устройства широко применяются [2] для диагностики нарушений сердечного ритма (аритмии).

В настоящее время в медицинской практике для мониторинга нарушений сердечного ритма вместо одноканальных внедряются многоканальные системы регистрации [3], что делает актуальным вопрос разработки и исследования алгоритмов автоматической обработки многоканальных ЭКГ в целях диагностики нарушений ритма. Многоканальный сигнал ЭКГ характеризуется высокой корреляцией протекающих в каналах процессов, которая обусловлена съемом потенциалов процессов поляризации и деполяризации источника, векторное пространство которого ограничено всего тремя компонентами дипольно-векторной модели электрической активности сердца [4].

Процесс классификации включает в себя две задачи:

– анализ типа зарегистрированных аритмических кардиокомплексов (сортировка кардиокомплексов каждого вида по соответствующим группам);

– анализ количества обнаруженных аритмических RR-интервалов, следующих друг за другом, и временных соотношений между ними [5].

Обобщенный принцип работы алгоритмов обработки ЭКГ, применяемых для принятия решения об обнаружении и классификации нарушений сердечного ритма, можно изобразить в виде блок-схемы, представленной на рис. 1. После приема и первичной обработки полученного сигнала (фильтрации помех, нейтрализации дрейфа изолинии и т. д.) необходимо установить факт наличия на анализируемом участке кардиоцикла, после чего требуется определить, является ли ритм нормальным или имеет место патология.

Исходя из этого, результат работы системы принятия решения о классификации нарушений сердечного ритма будет напрямую зависеть

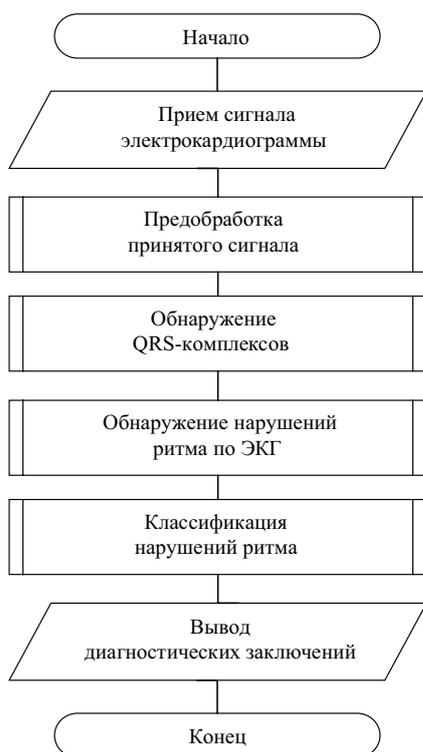


Рис. 1. Обобщенная блок-схема алгоритма работы системы поддержки принятия решений о классификации нарушений ритма

не только от непосредственного правила классификации обнаруженного нарушения ритма, но и от качества работы алгоритмов обработки ЭКГ на этапе обнаружения QRS-комплексов и анализа нарушений ритма. В связи с этим целесообразно рассмотреть принципы и особенности алгоритмов обработки электрокардиограмм для каждого из этих этапов работы системы поддержки принятия решения и уделить внимание возможности их применения для обработки многоканальных ЭКГ.

### Алгоритмы обнаружения QRS-комплексов, лежащие в основе алгоритмов обнаружения и классификации нарушений сердечного ритма

Традиционные методы оценки сердечного ритма основаны на детектировании QRS-комплексов – хорошо выраженных информационных фрагментов сигнала ЭКГ [5]. Очевидно, что точность определения QRS-комплекса является основополагающим фактором качества анализа на последующих этапах обнаружения и классификации нарушений ритма.

Описываемые в литературе алгоритмы обнаружения QRS-комплексов, применяемые при

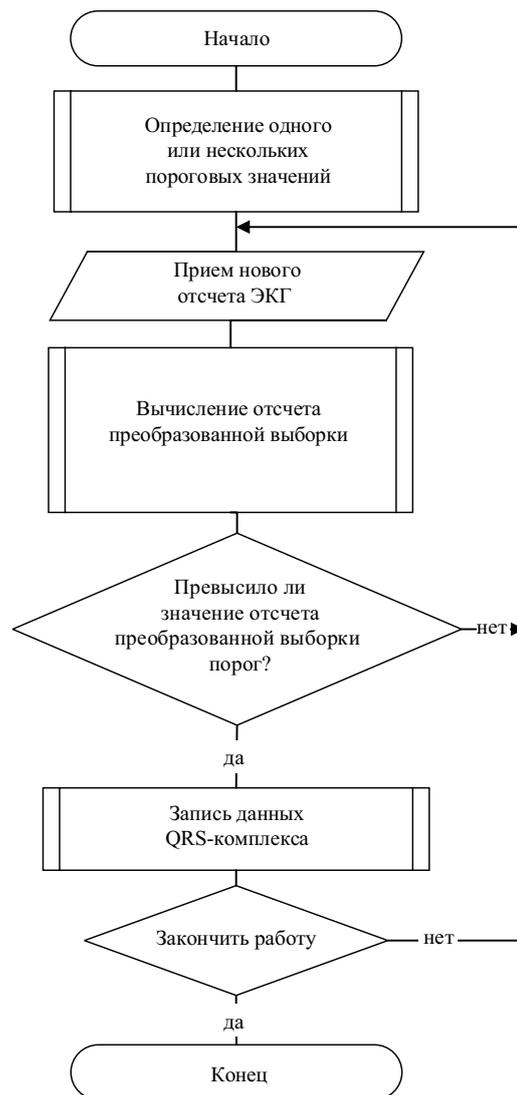


Рис. 2. Обобщенная блок-схема алгоритмов обнаружения QRS-комплексов на основе преобразования выборки сигнала ЭКГ

анализе нарушений сердечного ритма, можно представить в виде обобщенной блок-схемы, которая представлена на рис. 2. Общей чертой всех алгоритмов обнаружения QRS-комплексов, применяемых для обнаружения аритмий, является вид решающего правила: отсчет выборки ЭКГ после специальной обработки сравнивается с неким пороговым значением, если порог превышен, – обнаружен возможный QRS-комплекс (т. н. QRS-кандидат), по которому можно рассчитать длительность RR-интервала [6].

Основное отличие между алгоритмами заключается лишь в самом методе преобразования выборки ЭКГ. Методы обработки сигнала ЭКГ для обнаружения QRS-комплексов разделяются на три основных класса [7]:

- синтаксические (обработка с использованием специального алфавита участков ЭКГ);
- несинтаксические (в частности, цифровая фильтрация сигнала ЭКГ);
- трансформативные (математические преобразования принимаемого сигнала ЭКГ).

На практике в контексте анализа аритмии синтаксические методы обнаружения *QRS*-комплексов применяются значительно реже по сравнению с двумя другими классами методов, поскольку процесс формирования и анализа алфавита участков кардиокомплекса является трудоемким и ресурсозатратным итеративным процессом [7].

Чаще всего в качестве преобразованной выборки применяются:

- выборка ЭКГ, прошедшая цифровую фильтрацию [8], [9];
- выборка ЭКГ, над которой осуществлено преобразование формы/масштаба (преобразование Гильберта, вейвлет-преобразование и др. [9], [10], [12]);
- массив коэффициентов взаимной корреляции или автокорреляционной функции (АКФ) ЭКГ [3], [11].

Можно отметить следующие особенности данных методов:

1. Методы на основе преобразования формы/масштаба позволяют получить и впоследствии использовать для анализа локальные особенности *QRS*-комплексов, поскольку чувствительны к форме и длительности информативных фрагментов, что можно использовать при сопоставлении процессов в разных электрокардиографических отведениях и принятии итогового решения об обнаружении *QRS*-комплекса. Также применение этих методов позволяет учесть морфологию зарегистрированных кардиокомплексов, а данная информация может быть применена при решении задачи анализа типа зарегистрированных аритмических кардиокомплексов и уточнении диагностического заключения о виде аритмии.

2. В случае применения метода цифровой фильтрации *QRS*-комплекса, поскольку подавляемые ЭКГ-артефакты могут лежать в разных частотных диапазонах [9], наиболее часто используются модели полосовых фильтров или парных фильтров нижних частот с разными частотами среза: для выделения *QRS*-комплекса и для отсекающих составляющих помехи. Преимуществом таких алгоритмов является то, что они подавляют как помехи, так и информативные фрагменты, которые можно ошибочно принять за *R*-зубец (в частности, положительные *P*- и *T*-зубцы), что позволит корректно определить

величину *RR*-интервала, тем самым уменьшает вероятность ложного обнаружения нарушения ритма. Данный метод хорошо показывает себя при испытаниях на одноканальном сигнале ЭКГ [7], [9], однако для анализа многоканальной ЭКГ применения только цифровой фильтрации для обнаружения недостаточно и необходимо будет использовать дополнительные решающие правила.

3. Для алгоритмов на основе корреляции в качестве эталонного *QRS*-комплекса можно использовать как предварительно заданные функции, так и один из *QRS*-комплексов обследуемого [11]: поскольку *QRS*-комплексы в рамках одного сигнала ЭКГ имеют схожую форму, то автокорреляционная сигнала ЭКГ будет максимальной при сдвиге сигнала относительно самого себя на время между комплексами. Перспективным преимуществом корреляционных алгоритмов обработки ЭКГ в контексте поставленной задачи является возможность применения для обработки многоканальных сигналов ЭКГ, поскольку их можно адаптировать для анализа корреляционных функций между значениями сигналов в разных отведениях.

Таким образом, очевидно, что для решения задачи классификации нарушений сердечного ритма по многоканальной электрокардиограмме наибольшую ценность представляют алгоритмы на основе трансформативных преобразований формы/масштаба сигнала ЭКГ и корреляционных методов обнаружения *QRS*-комплексов.

### Анализ сердечного ритма по *RR*-интервалам

Результаты обнаружения *QRS*-комплексов далее применяются для анализа variability сердечного ритма. Для оценки сердечного ритма традиционно применяется измерение *RR*-интервалов, поскольку данный параметр достаточно точно характеризует состояние ритма и отличается высокой надежностью при измерениях в условиях различных помех. Принято считать, что ритм правильный, если продолжительность *RR*-интервалов при постоянном физиологическом состоянии обследуемого отличается не более чем на  $\pm 10\%$  [5].

Анализ *RR*-интервалов ЭКГ позволяет определить текущую частоту сердечных сокращений и сформировать заключение об основных характеристиках ритма. Очевидно, что результаты принятия решения о нарушении ритма напрямую зависят от результатов обнаружения *QRS*-комплексов, поскольку по обнаруженным *R*-зубцам рассчитываются значения *RR*-интер-

вала и на их основании формируются предположения о характере сердечного ритма.

Методы анализа нарушений сердечного ритма по длительности *RR*-интервала во многом близки с методами оценки вариабельности [13]. Но в отличие от показателей вариабельности, которые могут вычисляться как в режиме реального времени по истечении определенного периода, так и по итогу анализа за все время наблюдения, нарушения ритма должны фиксироваться в режиме реального времени. Алгоритмы обработки можно разделить на две группы [13]: прямых измерений длительности *RR*-интервалов и разности смежных *RR*-интервалов. Необходимо отметить, что поскольку положение максимума *R*-зубца в результате работы алгоритмов обнаружения *QRS*-комплексов может

быть оценено с некоторым отклонением от истинного, то на этапе анализа нарушений сердечного ритма необходимо минимизировать влияние этого отклонения. В связи с этим целесообразно использовать не длительность *RR*-интервала непосредственно, а относительные показатели на ее основе. В частности, об изменчивости сердечного ритма можно судить по колебаниям продолжительности *RR*-интервалов на коротком промежутке времени [14].

В общем виде алгоритмы анализа нарушений сердечного ритма по *RR*-интервалам можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рис. 3.

На этапе настройки определяются пороговые значения обнаружения нарушения ритма, а также принимаются первоначальные решения об

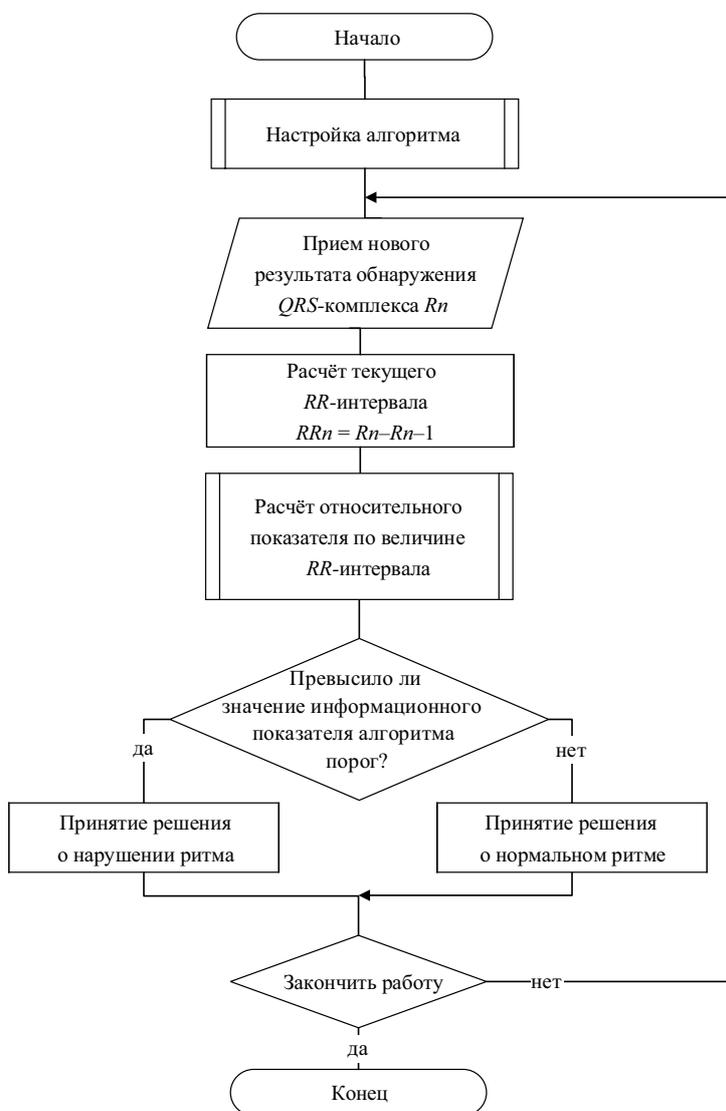


Рис. 3. Обобщенная блок-схема алгоритмов анализа нарушений сердечного ритма по *RR*-интервалам

обнаружении *QRS*-комплекса, которые необходимы для дальнейшего определения *RR*-интервалов и параметров на их основе. После этапа настройки начинается основной этап работы алгоритма, в ходе которого рассчитывается значение текущего *RR*-интервала, определяются относительные показатели на основе величины интервала и сравниваются с пороговым значением: если значение информационного параметра превышает пороговое значение, то принимается решение о нарушении ритма, в противном случае – принимается решение о нормальном состоянии сердечного ритма.

Наиболее часто для анализа ритма по длительности *RR*-интервала применяются следующие статистические характеристики вариабельности:

- отклонение мгновенной частоты сердечных сокращений [14];

- СКО величин *RR*-интервалов за некоторый рассматриваемый период мониторинга сердечного ритма (например, показатели *SDNN* и *SDANN* [14], [15]).

- соотношение количества последовательных разностей *RR*-интервалов, длительность которых превышает заданную, к их общему количеству, полученному в течение определенного промежутка времени (например, *pNN50* [3], [16]);

- коэффициент корреляции между последовательными *RR*-интервалами (данный метод, в частности, лежит в основе анализа ритма по графику Пуанкаре [16]) и т. д.

Общим преимуществом данных методов анализа является то, что результаты их работы несложно анализировать автоматически с точки зрения ЭКГ-признаков нарушения сердечного ритма – в частности, по количеству обнаруженных аритмических эпизодов, следующих друг за другом, и временных соотношений между ними. Но стоит отметить, что поскольку для анализа сердечного ритма необходимо отслеживать резкие изменения его состояния, то наиболее информативным показателем представляется СКО величин *RR*-интервалов на скользящем окне [17].

В совокупности с анализом морфологии кардиокомплекса алгоритмы на основе анализа данных показателей могут обеспечить высокую достоверность классификации нарушений сердечного ритма.

## Заключение

Таким образом, для разработки алгоритмического обеспечения системы поддержки принятия решения о классификации нарушений

ритма сердца на основе методов обработки многоканального электрокардиографического сигнала с целью повышения показателей качества обнаружения и классификации нарушений сердечного ритма целесообразно осуществить следующие исследования алгоритмов обработки электрокардиограммы:

- 1) изучение характерных особенностей многоканального электрокардиографического сигнала (в частности, взаимные корреляционные зависимости сигналов в различных отведениях);

- 2) исследование и сравнительный анализ алгоритмов обнаружения *QRS*-комплексов, результаты работы которых применимы для оценки длительности *RR*-интервалов и анализа типов зарегистрированных аритмических кардиокомплексов;

- 3) исследование показателей качества алгоритмов анализа ритма сердца по *RR*-интервалам, с показателями качества, удовлетворяющими требованиям.

По результатам исследования появится возможность разработки алгоритмов повышения достоверности принятия решения о классификации аритмии, основанных на методе анализа ритма многоканального электрокардиографического сигнала. Предполагаемое в перспективе практическое значение результатов исследования заключается в формировании алгоритмического обеспечения системы поддержки принятия врачебного решения на основе алгоритма обработки многоканального электрокардиографического сигнала:

- разработку алгоритмов принятия решения об обнаружении и классификации нарушений сердечного ритма по многоканальному электрокардиографическому сигналу;

- выработку практических рекомендаций к использованию получаемых результатов обработки в системе принятия решения об обнаружении и классификации нарушения сердечного ритма.

## Библиографический список

1. Основы клинической электрокардиографии: учеб. пособие / Под ред. И. Г. Меньшиковой. Благовещенск, 2010. 112 с.
2. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ: учеб. пособие для вузов / А. Л. Барановский, А. Н. Калинин, Л. А. Манило и др.; под ред. А. Л. Барановского и А. П. Немирко. М.: Радио и связь, 1993. 248 с.
3. Григорьев Е. Б. Метод и программный комплекс обработки многоканальных записей электрокардио сигнала для диагностики ишемической болезни

сердца: автореф. дис. ... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. СПб.: ЛЭТИ, 2019.

4. Шульгин В. И., Наседкин К. В. Алгоритм сжатия многоканальных ЭКГ сигналов. URL: <http://masters.donntu.org/2011/fkita/kabashnyuk/library/article5.pdf> (дата обращения: 25.10.2020).

5. Анциперов В. Е., Забросаев И. В., Растягаев Д. В. Детектирование нарушений сердечного ритма с использованием техники аналитических спектров // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/4/text.html> (дата обращения: 25.10.2020).

6. Sanamdikar S., Hamde S., Asutkar V. A Literature Review on Arrhythmia Analysis of ECG Signal // International Research Journal of Engineering and Technology. 2015. Vol. 02. N 3. P. 307–312.

7. Бадалян Б. Ф., Гомцян О. А., Гомцян С. Г. Вейвлет-анализ кардиосигналов в среде MATLAB // Известия высших учебных заведений России // Радиоэлектроника. 2017. № 6. С. 5–9. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/234663780.pdf> (дата обращения: 20.11.2020).

8. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS-detection algorithms / G. M. Friesen, T. C Jannett, M. A. Jadallah et al. // IEEE Transactions on biomedical engineering. 1990. Vol. 37. N 1. P. 85–97.

9. Köhler B., Hennig C., Orglmeister R. The principles of software QRS-detection // IEEE Engineering in medicine and biology. 2002. N 2. P. 42–57.

10. Zong W., Moody G., Jiang D. A robust open-source algorithm to detect onset and duration of QRS-complexes // Computers in Cardiology. 2003. N 30. P. 737–740.

11. Жаринов О. О., Жаринов И. О. Применение корреляционно-экстремального метода для решения задач обнаружения и оценивания положений опорных точек QRS-комплексов в электрокардиограмме // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. Вып. 5 СПб.: ИТМО. С. 85–90.

12. QRS Complex Detection and Measurement Algorithms for Multichannel ECGs in Cardiac Resynchronization Therapy Patients / A. E. Curtin, K. V. Burns, A. J. Bank, T. I. Netoff // IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine. 2018. Vol. 6.

13. Вариабельность сердечного ритма: стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования // Вестник аритмологии. URL: <http://www.vestar.ru/atts/10480/HRV%20standards.pdf> (дата обращения: 29.11.2020).

14. Рябыкина Г. В., Соболев А. В. Вариабельность ритма сердца. М.: «Стар'Ко», 1998. 200 с.

15. Синусовая аритмия – Сеть клиник «Президент-Мед». URL: <https://prezident-med.ru/poliklinika/kardiolog/sinusovaya-aritmiya-serdtsa/> (дата обращения: 29.11.2020).

16. Karthikeyan V., Vijayalakshmi V., Jeyakumar P. Classification of Cardiac Arrhythmias Using Heart Rate Variability Signal // International journal of Digital Signal and Image Processing (IJDSIP). 2013. Vol. 1. N 1.

17. Акоюн Б. К. Исследование методов и алгоритмов обнаружения аритмий по сигналу электрокардиограммы: выпускная квалификационная работа магистра. СПб.: ГУАП, 2020.

УДК 004.94

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-13-19

**Б. К. Акопян\***

ассистент

**О. О. Жаринов\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ

Разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом пользователя для поэтапного формирования и визуализации искусственно смоделированных электрокардиосигналов реалистичной формы и сопутствующих им сигналов помех (электромиографические помехи, смещение нулевого уровня сигнала (дыхательный дрейф изолинии), наводки напряжения от сети питания). Результаты моделирования могут быть сохранены в виде файла. Приведены результаты моделирования.

**Ключевые слова:** электрокардиосигнал, электрокардиограмма, компьютерная модель, программное обеспечение, графический интерфейс пользователя, QT.

**B. K. Akopyan\***

Assistant

**O. O. Zharinov\***

PhD. Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## DEVELOPMENT OF THE ELECTROCARDIOGRAM SIGNAL SIMULATION SOFTWARE

The graphical user interface software for simulation and visualization of artificial electrocardiosignals of realistic shape has been developed. The simulated artificial electrocardiosignals are accompanied with interference signals (electromyographic interference, zero-level signal offset (isoline drift), voltage bridging from the power supply network). Simulated signals can be saved as a file. The results of simulation are presented.

**Keywords:** electrocardiosignal, electrocardiogram, simulation model, computer model, software, GUI, QT.

Необходимость применения искусственно смоделированных электрокардиограмм (ЭКГ) для исследования качественных характеристик алгоритмов обработки электрокардиосигналов была обоснована в работе [1], где приведены результаты разработки математической модели записи ЭКГ и ее реализация в среде компьютерной алгебры MathCAD. Существенным недостатком данной компьютерной модели является то, что ее запуск и применение вне среды разработки невозможны. В связи с этим целесообразно осуществить разработку программного обеспечения (ПО), осуществляющего генерацию записи электрокардиограммы на основе описанной в работах [1], [2] математической модели.

В соответствии с функционалом модели, реализованной ранее в среде MathCAD [1], и исходя из практических соображений, к разрабатываемому ПО предъявлялись следующие требования:

1. Разрабатываемое ПО должно запускаться и работать вне какой-либо программной среды разработки;

2. ПО должно давать пользователю возможность настроить параметры моделируемого сигнала исходя из множества традиционно измеряемых параметров ЭКГ при стандартном врачебном анализе;

3. ПО должно формировать как запись ЭКГ без искажения помехами, так и формировать аддитивную смесь электрокардиосигнала с различными сигналами помехи;

4. ПО должно визуализировать сформированный сигнал ЭКГ;

5. Должна быть предусмотрена возможность записи получившихся сигналов в отдельный файл;

6. Приложение должно быть интуитивно понятно пользователю и не требовать от него специализированных знаний в области имитационного и математического моделирования сигналов.

Исходя из перечисленных требований было решено осуществить разработку приложения с графическим интерфейсом пользователя (GUI).

Для создания ПО была использована свободная кроссплатформенная интегрированная среда разработки (IDE) Qt Creator, которая включает в себя визуальные средства разработки интерфейса и графический интерфейс отладчика [3]. Программное обеспечение написано на языке C++.

### Краткое описание функционала программы

Внешний вид главного окна разработанного программного обеспечения представлен на рис. 1. Главное окно состоит из семи вкладок, каждая из которых соответствует определенному этапу формирования, визуализации и сохранения записи электрокардиограммы:

- 1) одиночный кардиоцикл, который является эталонным для моделирования длительной электрокардиограммы;
- 2) длительная запись электрокардиограммы без помех;
- 3) сигнал ЭМГ-помехи и аддитивная смесь сигнала ЭКГ с этим сигналом;
- 4) дыхательный дрейф изолинии и аддитивная смесь сигнала ЭКГ с этим сигналом;
- 5) сигнал наводки от сети питания и аддитивная смесь сигнала ЭКГ с этим сигналом помехи;

- 6) запись электрокардиограммы, искаженная всеми перечисленными сигналами помехи;
- 7) выбор файлов для записи.

В нижней половине окна предусмотрена область для построения сформированного процесса. По нажатии кнопки «Построить график» осуществляется моделирование сигнала, и отображается график соответствующей записи ЭКГ. В строке состояния, расположенной внизу окна, будут отображаться текстовые сообщения, предоставляющие информацию о состоянии формирования сигнала.

Для формирования записи, как и в модели, представленной в [1], [2], пользователю необходимо ввести значения параметров информационных фрагментов ЭКГ:

- желаемое значение экстремума фрагмента  $A$  (амплитуда «зубца») в мВ;
- момент времени  $t_{mi}$ , выраженный в секундах, когда данный информативный фрагмент эталонного кардиоцикла принимает значение  $A$ ;
- временные параметры  $b1$  и  $b2$ , выраженные в секундах, которые определяют длительность кардиоцикла путем задания моментов соответственно начала и окончания каждого структурного фрагмента кардиоцикла относительно  $t_{mi}$ .

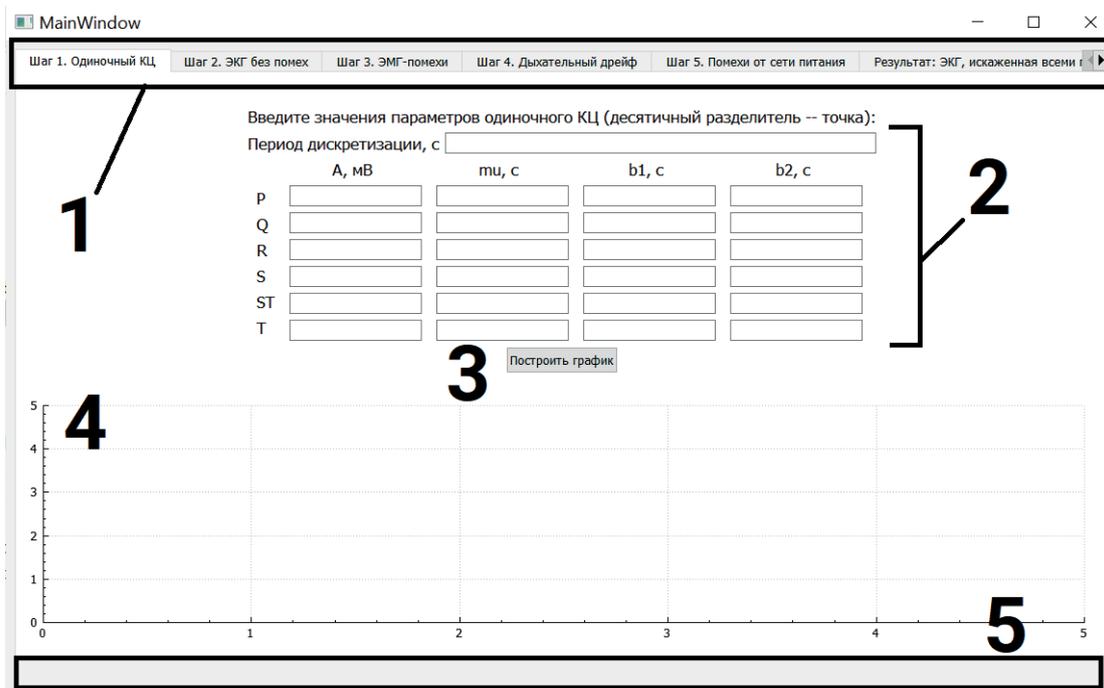


Рис. 1. Внешний вид активного главного окна разработанного программного обеспечения для моделирования записей электрокардиограммы: 1 – панель вкладок; 2 – поля ввода параметров модели сигнала; 3 – кнопка запуска моделирования и построения графика; 4 – поле для построения графика модели сигнала; 5 – строка состояния

Поля ввода параметров разделены в соответствии с этапами моделирования сигнала. На первом этапе (формирование эталонного кардиоцикла) пользователем в соответствующие поля вводятся период дискретизации сигнала и параметры информационных фрагментов ЭКГ. Результат моделирования эталонного кардиоцикла кардиограммы на основе параметров записи ЭКГ №16795 базы данных MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database представлен на рис. 2.

На втором этапе (рис. 3) аналогичным образом вводятся параметры длительной записи электрокардиограммы (частота сердечных сокращений (ЧСС), длительность записи ЭКГ – параметр *Tmax*, параметры вариабельности и искажений информативных фрагментов).

На последующих этапах пользователю необходимо ввести параметры помехи:

– коэффициент интенсивности помехи – для всех типов сигнала помехи;

– частота основной гармоники сигнала – для дыхательного дрейфа изолинии;

– частота сети – для сигнала помехи, вызванного наводками от сети питания.

Отличительной особенностью вкладки с результатами моделирования сигнала помехи является то, что полей для вывода графика сигнала два: верхнее для вывода сигнала помехи без учета параметра интенсивности, нижнее – для ЭКГ с искажениями данным сигналом помехи. На рис. 4 приведен пример результата моделирования сигнала помехи на примере ЭМГ-помехи.

По результатам выполнения всех этапов моделирования можно также построить график электрокардиограммы, аддитивно искаженной всеми моделируемыми сигналами помехи (рис. 5).

Последняя вкладка предназначена для сохранения результатов (рис. 6) и состоит из 6 кнопок, по нажатию которых осуществляется за-

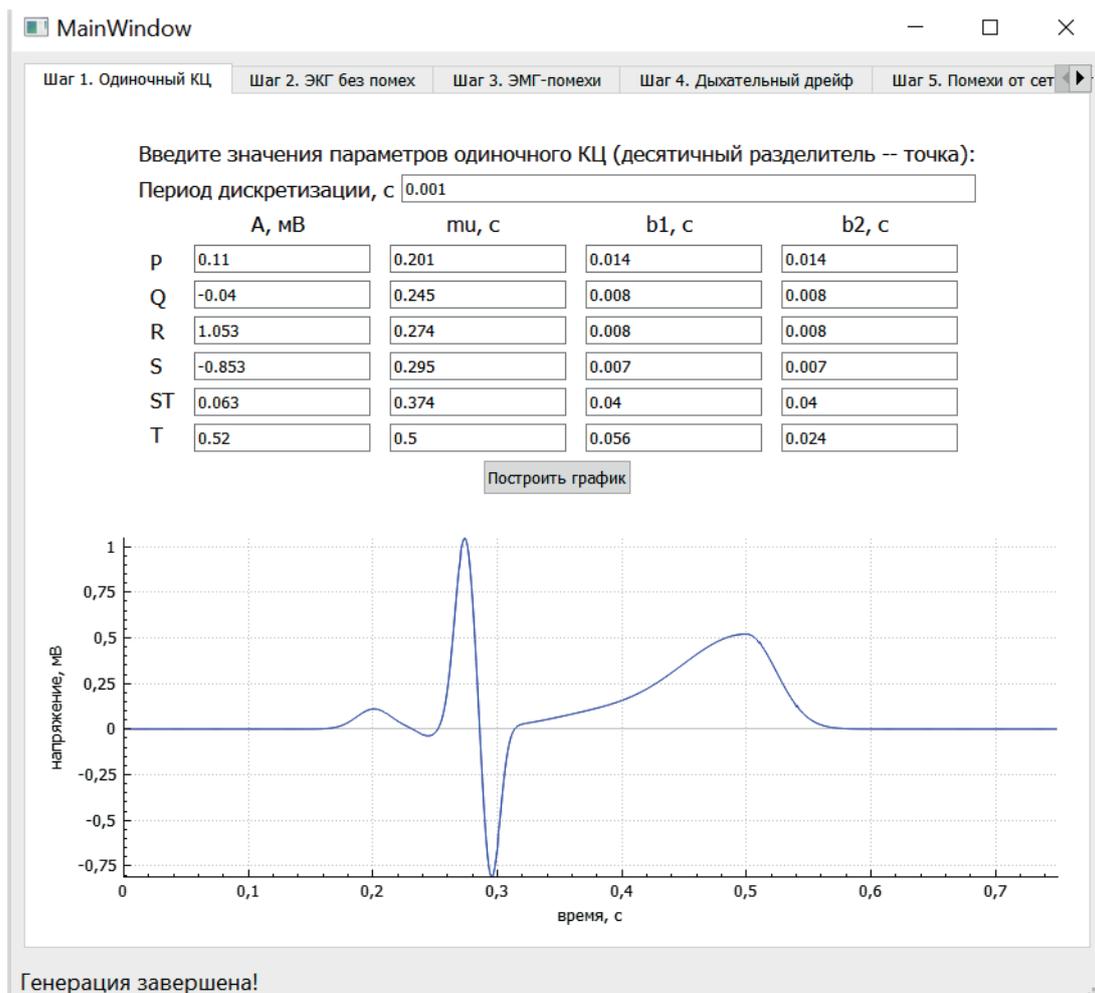


Рис. 2. Результат моделирования эталонного кардиоцикла на основе параметров записи ЭКГ №16795 базы данных MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database [4]

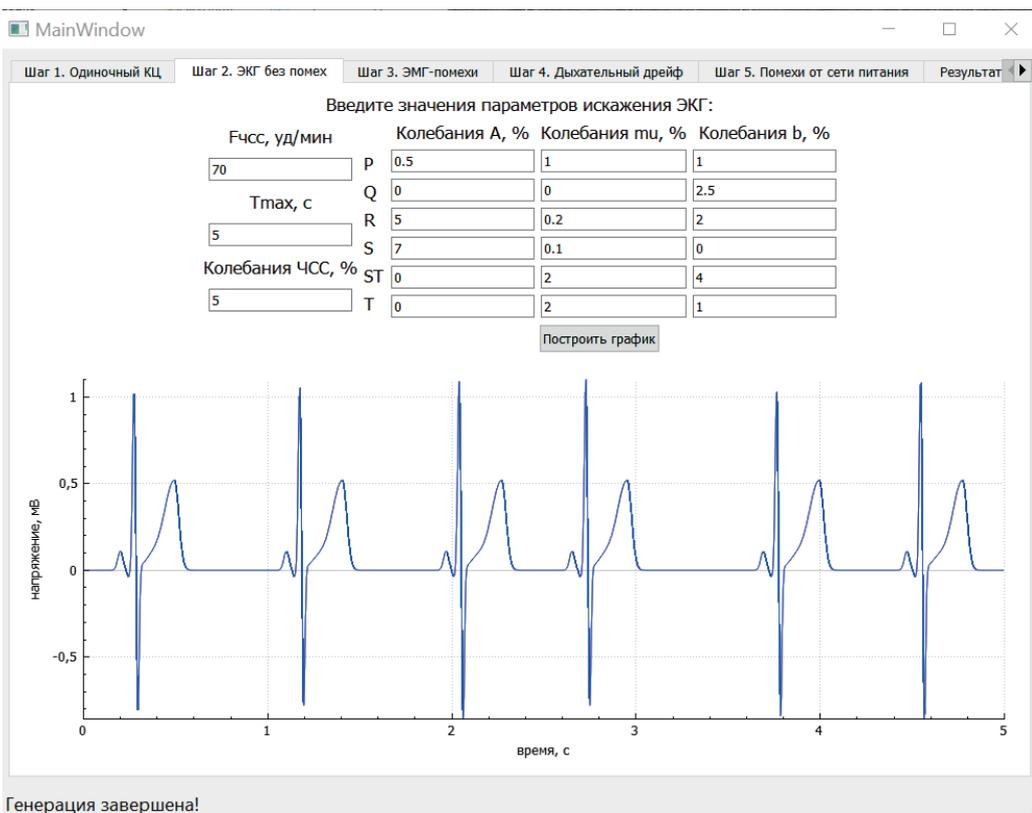


Рис. 3. Результат моделирования длительной записи электрокардиограммы из нескольких кардиоциклов

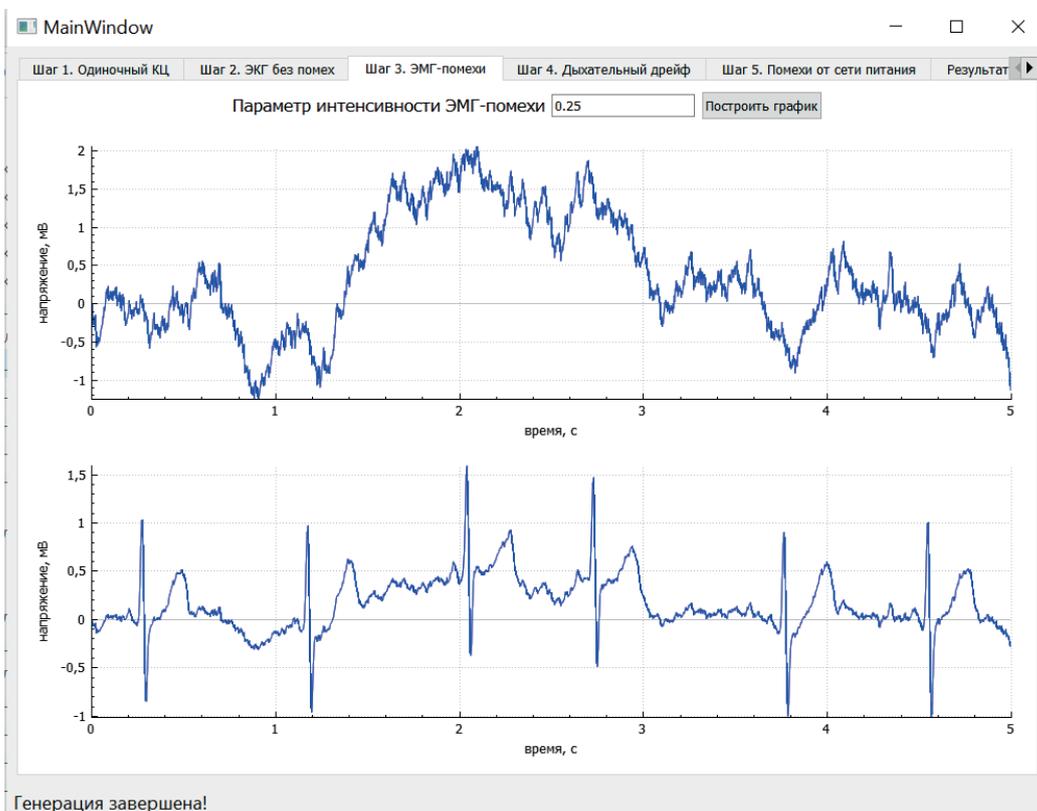


Рис. 4. Результат моделирования записи электрокардиограммы, искаженной ЭМГ-помехами

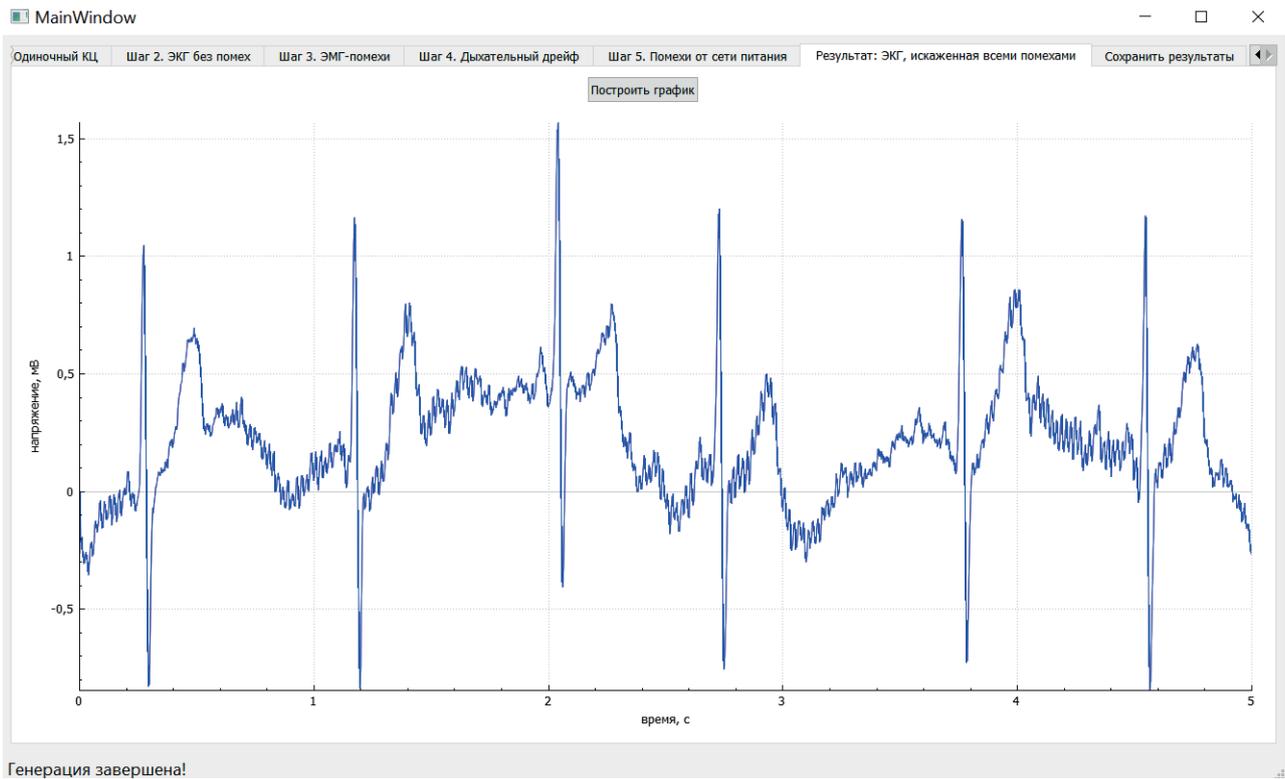


Рис. 5. Результат визуализации сигнала ЭКГ, искаженной всеми моделируемыми видами помехи

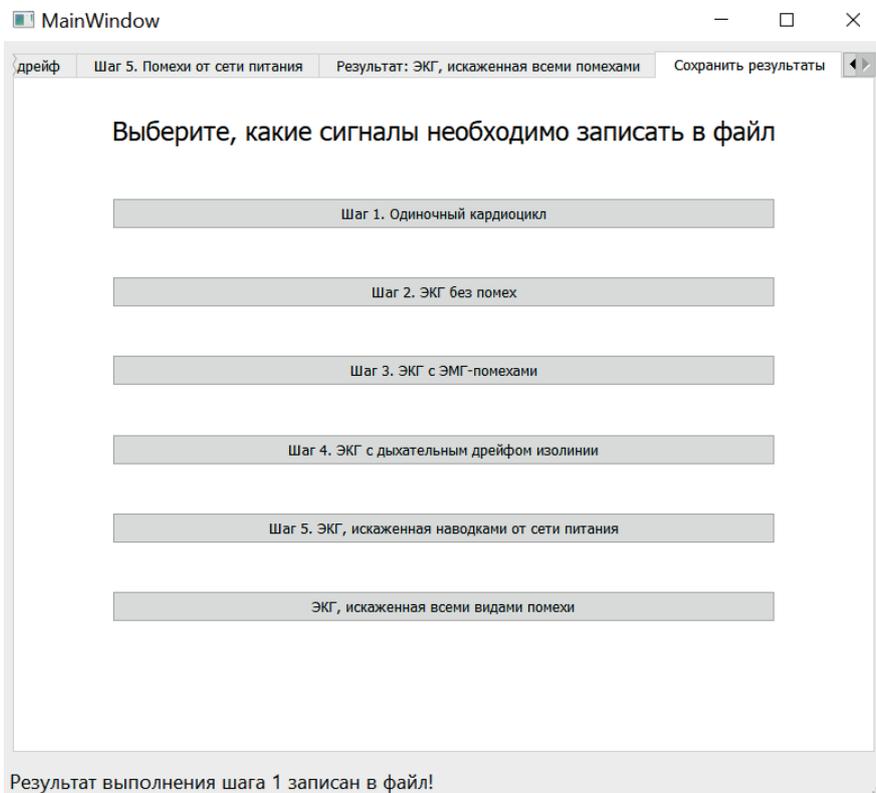


Рис. 6. Внешний вид содержимого вкладки, предназначенной для записи результатов моделирования ЭКГ

пись результата моделирования (выборка сигнала с помехами) записывается в файл с расширением txt, что позволяет использовать его для дальнейших исследований в различных средах компьютерного моделирования. Стоит отметить тот факт, что в отличие от разработанной ранее имитационной компьютерной модели, в файл можно сохранить сигналы, полученные на каждом этапе моделирования, а не только запись кардиограммы, искаженную всеми видами помехи. Запись «чистого» сигнала может быть использована в качестве эталона при отладке алгоритмов обработки ЭКГ.

### Результаты проверки работы программного обеспечения

Примеры ЭКГ, выполненной с помощью имитационной компьютерной модели в среде компьютерной алгебры MathCAD, и разработанного программного обеспечения приведены на рис. 7 и 8 соответственно. Видно, что ПО успешно справляется с поставленной задачей моделирования и визуализации сигнала электрокардиограммы, а отличия в графиках обусловлены влиянием случайных величин искажений сигнала ЭКГ и сигналов помехи.



Рис. 7. График электрокардиограммы с мерцательной аритмией на основе параметров записи № 201 из базы данных MIT-BIH Arrhythmia Database [5] с аддитивным искажением помехами, сформированная с помощью имитационной компьютерной модели в среде компьютерной алгебры MathCAD [1]

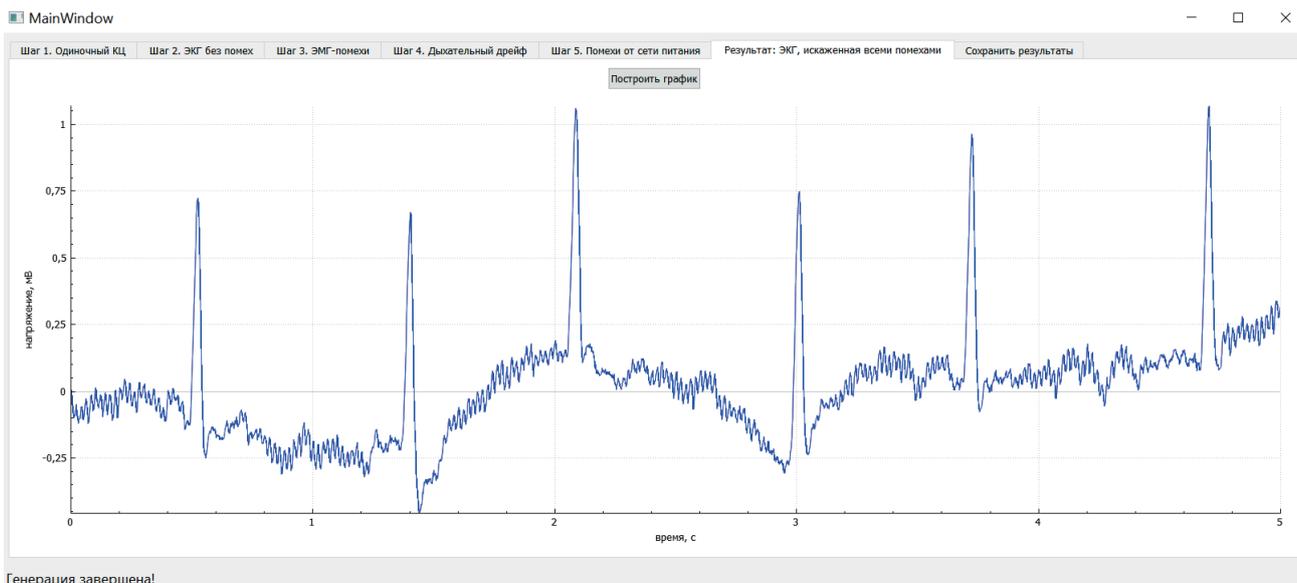


Рис. 8. График электрокардиограммы с мерцательной аритмией на основе параметров записи № 201 из базы данных MIT-BIH Arrhythmia Database [5] с аддитивным искажением помехами, сформированная с помощью разработанного программного обеспечения

В дальнейшем планируется усовершенствование ПО с целью формирования многоканальных реализаций искусственно смоделированных ЭКГ с заданием характеристик взаимной корреляции помех в каналах регистрации электрокардиографических отведений.

### Библиографический список

1. *Акопян Б. К., Жаринов О. О.* Разработка компьютерной имитационной модели электрокардиосигнала // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах: Первая Всерос. науч. конф. (СПб., 14–22 апреля 2020 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2020. С.17–23.
2. *Акопян В.* Development of a simulation model of an electrocardiosignal in computer algebra system // Bulletin of the UNESCO department “Distance education in engineering” of the SUAI: Collection of the papers. St. Petersburg, Issue 5. SPb.: SUAI, 2020. P. 31–35.
3. Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop. URL: <https://www.qt.io> (дата обращения: 30.11.2020).
4. MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database. URL: <https://physionet.org/content/nsrdb/1.0.0/> (дата обращения: 15.11.2020).
5. MIT-BIH Arrhythmia Database. URL: <https://physionet.org/content/mitdb/1.0.0/> (дата обращения: 15.11.2019).

УДК 004.054

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-20-24

**М. С. Иванова\***

ассистент

**А. П. Шепета\***

доктор технических наук, профессор

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ПО ЭМПИРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

При проектировании сложных систем обработки информации и тестировании спроектированных систем на ЭВМ используются методы математического моделирования, позволяющие получить характеристики систем для условий работы приближенных к реальным. При этом необходимо иметь эффективные алгоритмы моделирования потоков входных сигналов, соответствующих реальным условиям функционирования систем. Это условие будет выполнено, если алгоритмы синтезированы по эмпирическим данным. В реальных условиях эмпирический набор данных зачастую оказывается недостаточным для проверки работоспособности и эффективности проектируемых систем. Для преодоления этого недостатка на практике используется метод построения статистических эквивалентов входных потоков, характеристики которых статистически неотличимы от реальных эмпирических данных.

Эмпирические данные наиболее часто представляются гистограммами распределений параметров потоков, поэтому в научных источниках имеются работы, посвященные синтезу статистических эквивалентов, основанных на использовании гистограмм распределения. В данной работе представлены алгоритмы моделирования статистических эквивалентов, использующие полигоны распределения, которые могут быть как исходными данными, так и построенными по гистограммам. Этот подход приводит к более точным статистическим эквивалентам входных потоков.

**Ключевые слова:** обработка информации, входной поток, статистический эквивалент, гистограмма, полигон, эмпирическая функция распределения, алгоритм моделирования.

**M. S. Ivanova\***

Assistant

**A. P. Shepeta\***

Dr. Sc. Tech., Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## ALGORITHMS FOR MODELING INFORMATION STREAMS OF INFORMATION PROCESSING SYSTEMS SYNTHESIZED BY EMPIRICAL DATA

When designing complex information processing systems and testing the designed systems on a computer, methods of mathematical modeling are used, which make it possible to obtain the characteristics of systems for operating conditions close to real ones. At the same time, it is necessary to have effective algorithms for modeling the flows of input signals corresponding to the real conditions of the systems functioning. This condition will be satisfied if the algorithms are synthesized from empirical data. In real-world conditions, the empirical data set is often insufficient to verify the operability and efficiency of the designed systems. To overcome this drawback, in practice, the method of constructing statistical equivalents of input flows is used, the characteristics of which are statistically indistinguishable from real empirical data.

Empirical data, most often represented by histograms of distributions of flow parameters, therefore, in scientific sources there are works devoted to the synthesis of statistical equivalents based on the use of distribution histograms. This paper presents algorithms for modeling statistical equivalents using distribution polygons, which can be both initial data and plotted from histograms. This approach results in more accurate statistical equivalents of the input streams.

**Keywords:** information processing, input stream, statistical equivalent, histogram, polygon, empirical distribution function, modeling algorithm.

### Введение

При проектировании сложных систем практически на всех этапах жизненного цикла системы используются методы математического

моделирования, позволяющие оценивать характеристики эффективности функционирования системы и вносить соответствующие корректировки в структуры и алгоритмы проектируемой системы [1]. При этом необходимо использовать

методы математического моделирования, которые по максимуму приближают условия моделирования к реальным условиям функционирования системы. Это выполнимо, если потоки информационных и мешающих входных сигналов системы, которые, как правило, представляют собой случайные процессы, будут максимально приближены по своим статистическим характеристикам к реальным сигналам [2].

Поскольку речь идет о математическом моделировании, то даже в том случае, когда имеются записи реальных информационных и мешающих сигналов, все равно необходимо на их основе синтезировать алгоритмы моделирования этих сигналов на ЭВМ, так как на практике подобные записи обычно имеются лишь для некоторых определенных условий функционирования, что не позволяет оценить характеристики проектируемой системы в более расширенных условиях, для которых записи отсутствуют [3]. В силу этого проектировщики вынуждены решать задачу синтеза статистических эквивалентов реальных сигналов, при этом можно лишь потребовать, чтобы разрабатываемые математические модели и основанные на них алгоритмы моделирования статистических эквивалентов не противоречили тем записям реальных сигналов, которые имеются в наличии.

При решении этой задачи применяют несколько подходов. Наиболее распространенным на практике является подход, использующий традиционные критерии согласия, позволяющие аппроксимировать законы вероятностей исходных выборок входных сигналов известными законами распределения [4]. В этом случае получаются достаточно жесткие модели, которые не позволяют исследовать характеристики систем при отклонении статистических характеристик реальных сигналов от характеристик статистических эквивалентов, синтезированных на основе принятых моделей.

Второй подход заключается в использовании модели Хьюбера [5], в которой кроме основного распределения, подобранного на основе эмпирических данных, вводится дополнительное «засоряющее» распределение, что дает возможность исследовать характеристики проектируемой системы и при отклонениях статистических характеристик моделируемых входных сигналов от характеристик, полученных при обработке реальных выборок. В этом случае моделируемый поток входных сигналов является не совсем статистическим эквивалентом наблюдаемых реальных сигналов, но при таком подходе проектировщик получает возможность исследовать робастные свойства проектируемой систе-

мы. В частности, учесть реакцию проектируемой системы при воздействии потоков входных сигналов, распределения которых относятся к распределениям с утяжеленными «хвостами».

Оба эти подхода эффективно применяются при наличии достаточно большой выборки входных сигналов. Если же выборка не слишком большая, то выполнение условия непротиворечивости синтезированных статистических эквивалентов экспериментальным данным проблематично. Кроме этого, в том случае, когда законы распределения входных сигналов полимодальны, то есть имеют хотя бы две моды, что бывает, если входной поток образован смесью потоков с разными распределениями, подобрать теоретическое распределение или базовое распределение в модели Хьюбера практически нереально. Одно из возможных решений построения статистического эквивалента входных потоков при не очень больших выборках и полимодальности предложено в работе [6], где представлены алгоритмы моделирования входных сигналов, статистические характеристики которых не противоречат экспериментальным данным.

#### **Эмпирические данные – гистограммы и полигоны**

Эмпирические данные чаще всего представляются гистограммами, полигонами и эмпирическими функциями распределений [7]. Гистограммы и полигоны фактически являются эмпирическими плотностями распределений – оценками действительной плотности распределения параметров входных сигналов проектируемых систем. Эмпирическая функция распределения – оценка действительной функции распределения параметров входных потоков. Эти эмпирические данные, представленные в виде гистограмм, полигонов и эмпирических функций распределения, являются исходным материалом для разработки математических моделей входных сигналов, а на основании этих моделей и синтезируются алгоритмы моделирования последовательностей входных сигналов, статистические характеристики которых не должны противоречить наблюдаемым в эксперименте статистическим характеристикам реальных сигналов. В идеале моделируемые сигналы и реальные должны иметь одинаковые статистические характеристики и, следовательно, моделируемые и реальные сигналы со статистической точки зрения неразличимы.

В работе [6] в качестве исходного экспериментального материала, на основе которого синтези-

руются статистические эквиваленты, используются гистограммы распределений. При указанном подходе статистический эквивалент потока входных сигналов будет иметь при увеличении размера моделируемой выборки точно такую же гистограмму. В данной статье, основываясь на идеях, изложенных в работах [2], [6], предложен алгоритм моделирования потока входных сигналов проектируемой системы, использующий полигон распределения. При этом, так же как и в модели Хьюбера, мы получаем не совсем статистический эквивалент, поскольку при увеличении размера моделируемой выборки гистограмма ее распределения будет отличаться от исходной экспериментальной гистограммы. Однако в зависимости от аппроксимации гистограммы на ее границах можно добиться большей скорости сходимости полигона к действительной плотности распределения исходного реального потока данных. Кроме того, при переходе к полигону можно учесть и особенности распределений с «утяжеленными» хвостами.

Статистический эквивалент, построенный на основе гистограммы распределения так, как это сделано в работе [6], статистически неотличим от данных эксперимента, поскольку его гистограмма при увеличении количества опытов неограниченно приближается к эмпирической гистограмме. В то же время эта эмпирическая гистограмма, являющаяся оценкой истинной плотности распределения входного потока, не отражает подлинного вида плотности, а лишь приближается к ней. Полигон распределения, построенный по этой гистограмме, может более точно воспроизводить истинную плотность распределения, то есть при увеличении размера выборки полигон сходится к истинной плотности быстрее. Однако это верно лишь в том случае, если мы строим полигон по эмпирическим данным и скорость сходимости оцениваем при увеличении размера наблюдаемой выборки.

В нашем случае размер выборки фиксирован, поэтому при построении полигона распределения на основе имеющейся гистограммы и синтезе на его основе алгоритма моделирования последовательности входных сигналов гистограмма такой последовательности даже при очень большой выборке будет отличаться от исходной эмпирической. Это означает, что мы не можем в этом случае утверждать, что синтезированный статистический эквивалент не противоречит эмпирическим данным. Особенно это относится к крайним точкам гистограммы. Однако, учитывая то, что на практике мы сталкиваемся с определенными видами распределений, относительно которых исходя из физической природы на-

блюдаемых сигналов можно сделать некоторые общие предположения, практически не снижающие общности рассматриваемой задачи, можно ожидать, что алгоритм моделирования потока входных сигналов, построенный на основе полигона, полученного из гистограммы, будет более точно отражать статистические характеристики наблюдаемого потока данных.

### Построение полигона распределения на основе гистограммы

Построение полигона распределения  $p_\xi(x)$  непрерывной случайной величины  $\xi$ , используя ее эмпирическую гистограмму  $h_\xi(x)$ , не делая каких-либо предположений о ее действительной плотности распределения вероятностей  $f_\xi(x)$ , представлено на рис. 1 (для  $n=7$  интервалов). При этом никаких предположений о распределении  $\xi$  не делаем, поэтому область ее определения считаем множеством  $\Omega_\xi \subset (-\infty, +\infty)$ , а положение гистограммы  $h_\xi(x)$  на оси абсцисс (OX) по отношению к оси ординат (OY) произвольно. Преобразование гистограммы  $h_\xi(x)$  в полигон распределения  $p_\xi(x)$  в этом случае является традиционным.

Пусть область определения гистограммы  $\mathbf{a}_x = [a_0, a_n]$  исходной выборки  $\mathbf{X}$ , по которой построена гистограмма  $h_\xi(x)$ , представлена объединением  $n$  подмножеств:

$$\mathbf{a}_x = [a_0, a_n] = \left[ [a_0, a_1] \cup [a_1, a_2] \cup \dots \cup [a_{n-1}, a_n] \right],$$

$$a_i - a_{i-1} = 2\Delta, i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Вектор  $\mathbf{b}_y = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$  – вектор, элементы которого  $b_i$  пропорциональны эмпирическим частотам попадания случайной величины  $\xi$  в интервалы  $[a_i - a_{i-1}]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n-1$ , и  $[a_n - a_{n-1}]$  соответственно.

Масштаб по оси (OY) на рис. 1 выбран таким, чтобы площадь гистограммы  $S_h$  была равна 1, то есть выполнялось равенство:

$$S_h = b_1(a_1 - a_0) + b_2(a_2 - a_1) + \dots + b_n(a_n - a_{n-1}) =$$

$$\sum_{i=1}^n b_i(a_i - a_{i-1}) = 2\Delta \sum_{i=1}^n b_i = 1, \quad (2)$$

так как только в этом случае при увеличении размера выборки и  $n$  гистограмма  $h_\xi(x)$  сходится к истинной плотности распределения  $f_\xi(x)$  выборки  $\mathbf{X}$ .

Полигон распределения  $p_\xi(x)$  выборки  $\mathbf{X}$  получим, соединяя вершины столбцов прямой, при этом необходимо обратить внимание на

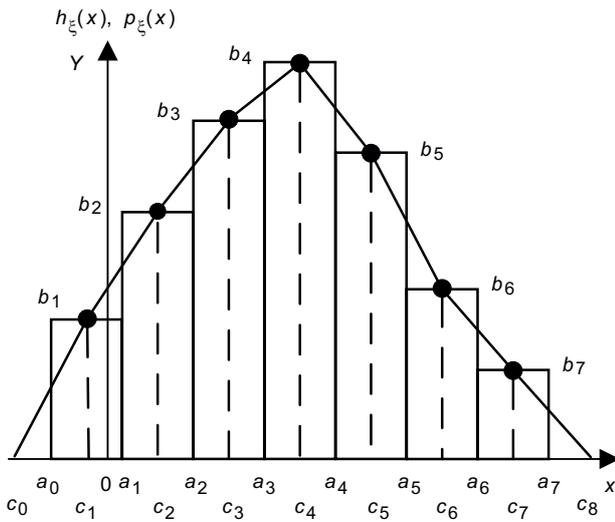


Рис. 1. Гистограмма  $h_{\xi}(x)$  и полигон  $p_{\xi}(x)$  распределения  $\xi$

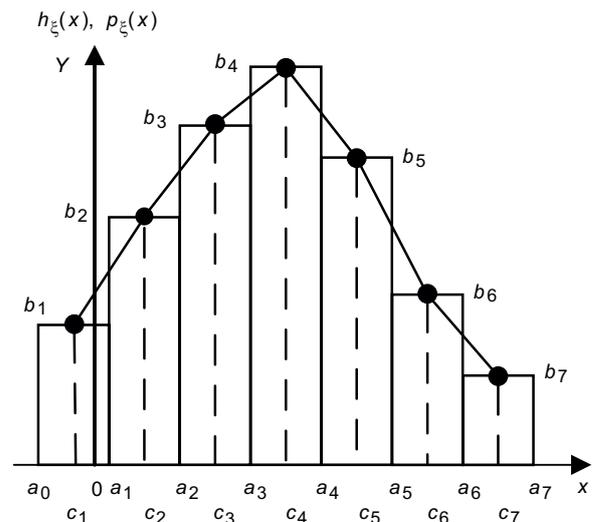


Рис. 2. Гистограмма  $h_{\xi}(x)$  и модифицированный полигон  $p_{\xi}(x)$  распределения  $\xi$

два крайних столбца – в нашем случае вершины крайних столбцов через точки  $(a_0, b_1)$  и  $(a_n, b_n)$  соединены с осью абсцисс в точках  $(c_0 = a_0 - \Delta, b_0 = 0)$  и  $(c_{n+1} = a_{n+1} + \Delta, b_{n+1} = 0)$  соответственно. При таком преобразовании гистограммы  $h_{\xi}(x)$  в полигон  $p_{\xi}(x)$  площадь под кривой полигона  $S_p$  равна

$$S_p = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{(b_i + b_{i-1})}{2} 2\Delta = 2\Delta \left( \frac{b_0 + b_1}{2} + \frac{b_1 + b_2}{2} + \dots + \frac{b_{n-1} + b_n}{2} + \frac{b_n + b_{n+1}}{2} \right) = \Delta \sum_{i=1}^n b_i = 1, \quad (3)$$

поскольку основания трапеций, из которых состоит полигон  $p_{\xi}(x)$ , равны

$$[c_i - c_{i-1}] = 2\Delta, i = 1, 2, \dots, n+1, c_0 = a_0 - \Delta, c_i = (a_i + a_{i-1}) / 2, i = 1, 2, \dots, n, c_{n+1} = a_n + \Delta.$$

При таком построении область определения гистограммы  $\mathbf{a}_x = [a_0, a_n]$  является подмножеством  $\mathbf{a}_x \subset \mathbf{c}_x$  области определения полигона  $\mathbf{c}_x = [c_0, c_{n+1}]$ , являющегося объединением подмножеств  $[c_i - c_{i-1}]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n+1$ ,

$$\mathbf{c}_x = [c_0, c_{n+1}] = \bigcup_{i=1}^{n+1} [c_{i-1}, c_i], \quad (4)$$

где  $(n+1)$ -е подмножество полуоткрытое.

В этом случае полигон является эмпирическим аналогом действительной плотности распределения вероятностей  $f_{\xi}(x)$  случайной ве-

личины  $\xi$ , в котором в качестве ядра аппроксимации плотности распределения на подмножествах  $[c_i - c_{i-1}]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n+1$ , используются трапеции, а не прямоугольники, как в гистограмме. Поэтому при моделировании такого распределения, в отличие от моделирования гистограммы, на каждом подмножестве необходимо моделировать трапецидальное распределение, а не равномерное, как в работе [6].

Чтобы не выходить за пределы области определения гистограммы  $h_{\xi}(x)$ , можно сократить область определения полигона  $p_{\xi}(x)$ , совместив точки  $c_0$  с  $a_1$  и  $a_n$  с  $c_{n+1}$ , то есть приравнять  $c_0 = c_0^* = a_0$  и  $c_{n+1} = c_{n+1}^* = a_n$ . Тогда областью определения модифицированного полигона  $p_{\xi}^*(x)$  будет множество

$$\mathbf{c}_x^* = [c_0^*, c_{n+1}^*] = [a_0, a_n] = \mathbf{a}_x,$$

являющееся объединением подмножеств:

$$\mathbf{c}_x^* = [c_0^*, c_{n+1}^*] = [c_0^*, c_1] \cup \left\{ \bigcup_{i=1}^{n-1} [c_i, c_{i+1}] \right\} \cup [c_n, c_{n+1}^*]. \quad (5)$$

Модифицированный полигон  $p_{\xi}^*(x)$  приведен на рис. 2.

Моделирование случайных последовательностей с плотностью распределения вероятностей  $p_{\xi}^*(x)$  сводится к моделированию трапецидально распределенных величин на подмножествах  $[c_1, c_2], [c_2, c_3], \dots, [c_{n-1}, c_n]$  и равномерно распределенных на двух крайних подмножествах  $[c_0^*, c_1] = [a_0, c_1]$  и  $[c_n, c_{n+1}^*] = [c_n, a_n]$ .

## Заключение

Построение статистического эквивалента входного потока данных сложной системы по его эмпирической гистограмме позволяет получить моделируемый поток, который не противоречит экспериментальным данным – моделируемый поток и реальный не различимы по статистическим характеристикам. При этом приближенно воспроизводится функция распределения вероятностей истинного потока входной последовательности и ее производная, представленная гистограммой.

Переход к полигону распределения позволяет воспроизводить более точно плотность распределения реального потока и производную этой плотности, то есть вторую производную функции распределения. При этом следует учитывать, что имитируемый поток данных уже не будет «чистым» статистическим эквивалентом реального потока, так как его гистограмма будет расходиться с эмпирической гистограммой.

Статистический эквивалент, построенный по полигону, для распределений, встречающихся на практике, может быть намного ближе по статистическим характеристикам к истинному реальному потоку, а не к его отдельной реализации, на основе которого и построена эмпирическая гистограмма, в силу учета второй производной функции распределения. При этом эта «близость» может быть обоснована лишь некоторыми дополнительными предположениями, исходящими из физической природы входного потока исследуемой сложной системы.

## Библиографический список

1. *Израицев В. В., Шенета Д. А.* Моделирование внешних сигналов бортовых приборных комплексов летательных аппаратов пятого поколения // Научное приборостроение. 2000. Т. 10. № 2. С. 14–19.

2. *Шенета Д. А.* Разработка математических моделей и синтез алгоритмов моделирования входных сигналов бортовых систем обработки информации и управления: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2000.

3. *Сесин А. Е., Шенета Д. А.* Математическая модель эхо-сигналов морской поверхности, наблюдаемых бортовыми локаторами летательных аппаратов. Информационно-управляющие системы. 2010. № 2. С. 21–25.

4. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

5. *Хьюбер Д.* Робастность в статистике / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 304 с.

6. *Ivanova M.* Synthesis of algorithms for statistical equivalents of input signals of information processing systems based on empirical data. Bulletin of the UNESCO department “Distance education in engineering” of the SUAI: Collection of the papers. St. Petersburg, Issue 5. SPb.: SUAI, 2020. P. 77–81.

7. *Крамер Г.* Математические методы статистики. М., 1975.

УДК 621.396.96

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-25-28

**В. И. Исаков\***

кандидат технических наук, доцент

**Д. А. Шепета\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ОГИБАЮЩЕЙ ЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ КРОМКИ ЗЕМЛЯ-МОРЕ

При проведении работ по картографированию прибрежных зон морских акваторий одной из важнейших задач является определение очертаний береговой кромки. Большое значение для синтеза алгоритмов обработки сигналов имеют математические модели сигналов РЛС, отраженных от морской поверхности, земной поверхности и береговой кромки, так как именно адекватность моделей реальным эхо-сигналам и определяет характеристики качества алгоритмов и, в частности, точность определения местоположения кромки. В работе рассматриваются наиболее распространенные математические модели перечисленных эхо-сигналов, являющихся для данной задачи информационными, и анализируются возможные практические алгоритмы обработки, непосредственно следующие из этих моделей.

**Ключевые слова:** береговая кромка, зондирующий сигнал, картографирование, математическая модель, алгоритм обработки.

**V. I. Isakov \***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**D. A. Shepeta \***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## DENSITY OF POWER DISTRIBUTION OF THE ENVELOPE OF LOCATION SIGNALS REFLECTED FROM THE LAND-SEA EDGE

When carrying out work on mapping the coastal zones of sea water areas, one of the most important tasks is to determine the outlines of the coastal edge. Mathematical models of radar signals reflected from the sea surface, the earth's surface and the coastal edge are of great importance for the synthesis of signal processing algorithms, since it is the adequacy of the models to real echo signals that determines the quality characteristics of the algorithms and, in particular, the accuracy of determining the edge location. The paper considers the most common mathematical models of the listed echo signals, which are informational for this task, and analyzes possible practical processing algorithms that directly follow from these models.

**Keywords:** coastal edge, sounding signal, mapping, mathematical model, processing algorithm.

При картографировании земной поверхности с помощью радиолокационных средств, расположенных на беспилотных летательных аппаратах, задача выделения кромки суша-водная поверхность занимает особое значение [1]. Это связано как с важностью определения береговой кромки в морских акваториях, что имеет большое практическое значение, так и с особенностями синтеза алгоритмов, вычисляющих очертания береговой кромки. В отличие от обычных систем картографирования, в которых очертания наземных объектов определяются в основном по различной интенсивности отражений в элементах разрешения, при определении береговой кромки отражения от водной поверх-

ности и суши существенно отличаются и законами распределения флуктуаций параметров эхо-сигналов, и пространственно-временными корреляционно-спектральными характеристиками наблюдаемых отражений. Эти отличия позволяют использовать при определении береговой кромки дополнительные возможности при отнесении элементов разрешения наблюдаемой поверхности к морской поверхности, суше или к кромке, в элементе разрешения которой содержатся отражения как от морской поверхности, так и от суши. Исследованию этих дополнительных возможностей и посвящена данная работа.

Плотности распределения параметров эхо-сигналов морской поверхности, суши и кромки

подробно представлены в [2]–[5]. Кратко опишем их, ограничившись маргинальными распределениями, поскольку такой анализ позволяет не только ясно трактовать физику отличий в распределении параметров флуктуаций, но и дает возможность предложить алгоритм обработки наблюдаемых эхо-сигналов, обладающий определенными робастными свойствами.

При рассмотрении математических моделей нас будут интересовать энергетические соотношения, которые и являются основными информационными признаками различения особенностей рельефа местности при ее картографировании. Поэтому, следуя логике работы [1], представим модели, изложенные в этой работе, в виде, необходимом для решения поставленной задачи. Необходимо учитывать, что при определении очертаний кромки мы анализируем эхо-сигналы от трех групп элементов разрешения: элементов разрешения морской поверхности, земли и элемента разрешения, в котором присутствуют отражения от моря и суши (элемент кромки). Статистические характеристики эхо-сигналов этих элементов различны как по функциональному виду плотности распределения вероятностей параметров, так и по энергетическим характеристикам [4], [5]. Определение кромки, собственно, и состоит в отнесении этих элементов разрешения к указанным трем группам – координаты элементов разрешения, отнесенных к кромке, и определяют очертания береговой линии.

Для решения поставленной задачи – определения элемента разрешения, соответствующего кромке, необходимо выяснить, какие параметры распределений могут быть использованы как информационные параметры и как они зависят от эффективной площади рассеяния элементов [6]. Нас интересуют не конкретные числовые значения этих параметров, которые зависят от условий наблюдения, характеристик бортовой РЛС, режимов ее работы, конкретных видов подстилающих поверхностей, что невозможно учесть в статье ограниченного объема, а относительные соотношения параметров, позволяющие правильно классифицировать элементы разрешения, определяя элемент кромки. Следует также учесть и тот факт, что здесь проблематично синтезировать «оптимальные» алгоритмы, поскольку статистические характеристики рассматриваемых трех видов элементов различны и заранее неизвестны. Поэтому в данном случае желательно рассмотреть некоторые известные практические алгоритмы, малочувствительные к функциональному виду распределений, но все же учитывающие априорные данные о типах распределений, указанных элемен-

тов разрешения. Эти алгоритмы должны зависеть от энергетических характеристик эхо-сигналов, а с учетом относительной разности в мощности отражений от разных типов подстилающих поверхностей – от отношения удельных эффективных поверхностей рассеяния моря и суши. Эти ограничения и накладывают определенную специфику на использование математических моделей отражений от моря, земли и кромки, рассмотренные в работе [1], ограничивают выбор информационных признаков, по которым осуществляется классификация элементов разрешения.

Необходимо учитывать и тот факт, что для повышения точности картографирования, необходимо уменьшать размеры элементов разрешения, которые определяются в полярной системе координат (рассматриваем плоскую картину). Уменьшение размеров элементов разрешения по координате дальность может быть достигнуто за счет уменьшения длительности зондирующих импульсов (сжатия соответствующего широкополосного сигнала) и не вызывает особых технических трудностей. Повышение разрешающей способности бортовой малогабаритной РЛС по угловой координате в силу малой апертуры антенной системы бортовой РЛС достигается за счет реализации режима синтезирования апертуры. При этом необходимо учесть, что высокое разрешение может быть достигнуто только при достаточно больших скоростях движения летательного аппарата, на котором базируется бортовая аппаратура [7]. Это приводит к тому, что выборка информационных эхо-сигналов, по которым производится классификация элементов разрешения, не может быть большой (информационные признаки не должны существенно меняться в пределах выборки), что также накладывает определенные ограничения на выбор информационных параметров классификации.

Из приведенных выше рассуждений следует, что поскольку все элементы разрешения наблюдаются в одинаковых условиях, то их отличия, заключающиеся в отличиях удельных эффективных поверхностях рассеяния, можно определить по мощности отраженных сигналов. При этом, если рассмотреть случай малых собственных шумов приемных устройств бортовой РЛС, а это условие необходимо для выявления информативности исследуемых признаков и алгоритмов, достаточно ограничиться рассмотрением амплитудных или мощностных характеристик эхо-сигналов. Учитывая небольшой размер анализируемых выборок эхо-сигналов, необходимо использовать такие параметры рассматриваемых распределений, которые могут быть доста-

точно точно и сравнительно просто определены по небольшой выборке: пространственной, при обработке эхо-сигналов одной дорожки дальности или временной, при реализации режима синтезирования апертуры [7]–[9]. Возможна обработка пространственно-временной выборки, но эти алгоритмы достаточно сложны.

Наиболее простыми в реализации и хорошо зарекомендовавшими себя при практическом применении являются алгоритмы оценки среднего значения и медианы обрабатываемой выборки. Поэтому рассмотрим особенности статистических характеристик эхо-сигналов моря и суши, оценивая возможности классификации сигналов при использовании этих простых алгоритмов, при этом информационными параметрами классификации будут среднее значение и медиана.

Для описания флуктуаций амплитуд или мощностей эхо-сигналов морской поверхности используем логарифмически-нормальное распределение, а для описания флуктуаций амплитуд или мощностей эхо-сигналов суши – распределение Вейбулла [10], [11]. Именно эти распределения и используются наиболее часто в инженерных расчетах и теоретических исследованиях при разработке и синтезе сложных систем обработки информации, носителями которой являются локационные сигналы, отраженные от подстилающих поверхностей моря и суши.

При использовании амплитудных характеристик эхо-сигналов плотность распределения вероятностей амплитуд эхо-сигналов морской поверхности определяется выражением

$$f(A_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{A_L} A_L} \exp\left[-\frac{(\ln A_L - \ln \bar{A}_L)^2}{2\sigma_{A_L}^2}\right], \quad (1)$$

$$A_L > 0,$$

из которого следуют формулы, определяющие среднее значение  $\hat{A}_L$  и медиану  $\tilde{A}_L$  логарифмически-нормального распределения через его параметры и мощность принимаемого сигнала, пропорциональную удельной отражающей способности элемента разрешения.

Среднее значение и медиана соответственно

$$\text{равны } \tilde{A}_L = \bar{A}_L \cdot \exp\left(\frac{\sigma_{A_L}^2}{2}\right) \text{ и медиану } \hat{A}_L = \bar{A}_L [12].$$

Для отражений от земной поверхности, плотность распределения вероятностей амплитуд определяется распределением Вейбулла

$$f(A_W) = \alpha_A \lambda_A A_W^{\alpha_A - 1} \exp(-\lambda_A A_W^{\alpha_A}), \quad A_W > 0, \quad (2)$$

из которого следуют формулы, определяющие среднее значение  $\hat{A}_W$  и медиану  $\tilde{A}_W$  распределения Вейбулла через его параметры и мощность принимаемого сигнала, пропорциональную удельной отражающей способности элемента разрешения.

Среднее значение и медиана соответственно

$$\text{равны } A_W = \frac{\lambda_A}{\alpha_A} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_A}\right) \text{ и } \tilde{A}_W = \lambda_A \ln(2)^{1/\alpha_A},$$

где  $\Gamma(\cdot)$  – гамма функция [12].

Вторые начальные моменты распределений амплитуд определяют мощность принимаемых сигналов. Аналогичные выражения получают и при использовании распределений мощностей эхо-сигналов.

Расчеты, проведенные по выражениям (1) и (2), показывают, что эти два параметра распределений – среднее значение и медиана амплитуд (аналогично для мощностей) позволяют классифицировать элементы разрешения даже в том случае, когда мощности эхо-сигналов от морской поверхности и суши совпадают, так как при совпадении мощностей расходятся медианы. Это, собственно, и является исключительной особенностью рассматриваемых информационных признаков, которые достаточно несложно оценивать по амплитудам или мощностям принимаемых эхо-сигналов. При их оценивании с помощью широко известных алгоритмов скользящего среднего и медианного усреднения неявно учитывается функциональное различие законов распределения наблюдаемых выборок, в том числе и корреляция выборок, присутствующая при оценке этих признаков в элементах разрешения морской поверхности.

## Библиографический список

1. Исаков В. И., Шенета Д. А. Моделирование локационных сигналов, отраженных от кромки земля-море. Информационно-управляющие системы. 2017 (90). № 5. С. 89–94.
2. Сесин А. Е., Шенета Д. А. Математическая модель эхо-сигналов морской поверхности, наблюдаемых бортовыми локаторами летательных аппаратов / Информационно-управляющие системы. 2010. № 2. С. 21–25.
3. Подоплекин Ю. Ф., Шенета Д. А., Ненашев В. А. Моделирование входных сигналов бортовой РЛС, обусловленных отражениями зондирующего сигнала от подстилающих поверхностей земли и моря // Морской вестник. 2016. № 4 (60). С. 69–71.

4. *Тверской Г. Н., Терентьев Г. К., Харченко И. П.* Имитаторы эхо-сигналов судовых радиолокационных станций. Л.: Судостроение, 1973. 228 с.

5. *Кулемин Г. П.* Радиолокационные помехи от моря и суши РЛС сантиметрового и миллиметрового диапазонов // Труды междунар. науч.-техн. конф. Киев: АН Украины, НПО Квант, 1994. Вып. 1. С. 23–29.

6. *Блаунштейн Н. Ш., Сергеев М. Б., Шенета А. П.* Прикладные аспекты электродинамики. СПб.: Аграф+, 2016. 272 с.

7. On-Board Unlimited Aircraft Complex of Environmental Monitoring / M. Wattimena, V. Nenashev, A. Sentsov, A. Shepeta // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg, 2018. P. 1–5.

8. *Ненасhev В. А., Сенцов А. А., Куюмчев Г. В.* Моделирование процесса формирования радиолокационного изображения высокого разрешения в бортовых РЛС // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 2. № 3. С. 48–56.

9. *Nenashev V., Sentsov A., Shepeta A.* Formation of radar image the earth's surface in the front zone review two-position systems airborne radar // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). 2019. P. 8840641.

10. *Nenashev V., Sentsov A., Shepeta A.* The Problem of Determination of Coordinates of Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg, 2018. P. 1–5.

11. *Isakov V., Shepeta A., Nenashev V.* Algorithm for Modeling Location Signals Reflected from the Edge of Various Underlying Surfaces. 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2020. P. 1–5.

12. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит. 2006. 816 с.

УДК 621.38

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-29-31

**В. А. Килимник\***

кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела биотехнических проблем

**А. А. Чеkmенева\***

магистр

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## КОМПЛЕКСНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Рассмотрена структура комплексного устройства, позволяющего оценивать содержания кислорода и углекислого газа в воздушной среде. Формирование анализируемого объема воздушной среды осуществляется микрокомпрессором. Управление и анализ оценки параметров – микроконтроллером с отображением результата на графическом индикаторе.

**Ключевые слова:** измерение, кислород, углекислый газ, оценка, воздушная среда, комплексное устройство.

**V. A. Kilimnik\***

PhD Sc. Tech., Head of the Research Department of Biotechnical Problems

**A. A. Chekmeneva\***

Master

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## INTEGRATED DEVICE FOR ASSESSING THE OXYGEN AND CARBON DIOXIDE CONTENT IN THE AIR

The structure of a complex device that allows to estimate the content of oxygen and carbon dioxide in the air is considered. The formation of the analyzed volume of air is carried out by a microcompressor. The control and analysis of the parameter estimation is carried out by a microcontroller with the result displayed on a graphical indicator.

**Keywords:** measurement, oxygen, carbon dioxide, assessment, air environment, complex device.

Целью работы является разработка структуры и принципов построения на современной элементной базе устройства для одновременной оценки содержания кислорода и углекислого газа в воздушной среде.

Необходимость в таком устройстве возникает при оценке состава воздушной среды в производственных и бытовых помещениях, а также при проведении научно-исследовательских работ по физиологии дыхания.

Своевременный контроль газового состава атмосферы в помещении лабораторий, офисов и бытовых помещениях позволит проводить его коррекцию путем проветривания помещения для нормализации газового состава, а значит, качество жизни работающего персонала. Исходя из требований к воздуху рабочих зон (ГОСТ 30494-2011 [1], [2]) содержание кислорода в атмосфере в нормальных условиях (давление, влажность, температура) составляет 21–22 %, углекислого газа – 400–1000 ppm (миллионных долей процента).

Во время проведения научных исследований (особенно в области физиологии дыхания) часто необходимо брать пробы выдыхаемого воздуха в определенный момент времени, как правило, в конце выдоха. В момент окончания выдоха концентрация кислорода минимальна, а концентрация углекислого газа – максимальна. Предлагаемое устройство позволяет оценить эти значения. Концентрация кислорода в выдыхаемом воздухе в конце выдоха достигает 10–12 %, а содержание углекислого газа – до 40000 ppm.

Для обеспечения работы разрабатываемого устройства в широких пределах оцениваемых параметров необходимо корректно подойти к выбору датчиков. Правильный выбор датчиков позволит синтезировать комплексную и универсальную по применению структуру устройства. На рис. 1 представлена разработанная структурная схема устройства для одновременной оценки содержания кислорода и углекислого газа в воздушной среде.

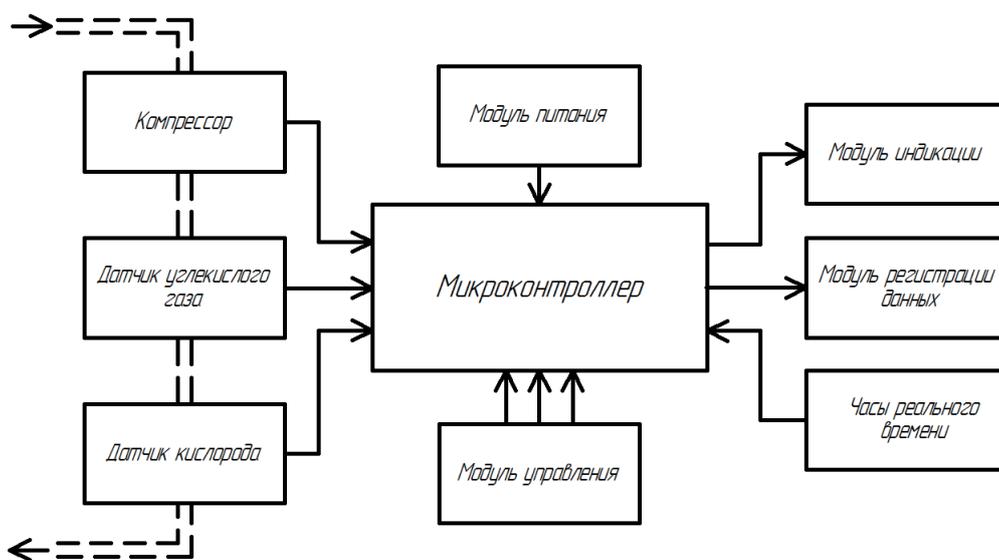


Рис. 1. Структурная схема комплексного устройства для оценки содержания кислорода и углекислого газа в воздушной среде

По результатам поиска найдены следующие датчики оцениваемых параметров атмосферного воздуха: датчик кислорода – Oksik-11 [3], датчик углекислого газа – SCD30 [4]. Основными критериями для выбора датчика Oksik-11 являлись доступность на рынке (производство в Санкт-Петербурге), большой срок службы (до 10 лет), выходное значение в виде напряжения и небольшие габариты.

В силу специфики оценки содержания углекислого газа в воздушной среде необходимо одновременное измерения влажности и температуры. Этому требованию удовлетворяет датчик SCD30 фирмы Sensirion. Основными техническими характеристиками датчика является малые габариты, цифровой выход по интерфейсу I2C, измеряемый диапазон содержания углекислого газа составляет 400–40000 ppm, что полностью удовлетворяет требованиям эксплуатации разрабатываемого устройства.

Выбор остальных элементов устройства производился исходя из доступности на рынке и приемлемой стоимости. Требования к микроконтроллеру (далее МК) определялись возможностью реализации алгоритма оценки значений параметров окружающей среды, их обработки, индикации и регистрации. Для комплексного устройства был выбран МК типа Atmega328P. Данный процессор широко применяется в устройствах серии Arduino, что позволяет существенно ускорить разработку и изготовление макета устройства.

Для индикации оцениваемых параметров служит графический OLED индикатор 128 x 64, который был выбран исходя из габаритов, малого энергопотребления и наличия программных драйверов для подключения к МК. Целесообразным является наличие возможности регистрации получаемых данных о газовом составе с привязкой их ко времени и факту внешнего воздействия. Для регистрации параметров углекислого газа и кислорода применяется плата, содержащая часы реального времени (ЧРВ) и интерфейс для подключения SD карты.

В качестве источника питания используется Li-Pol аккумулятор LP103450-PCM емкостью 2000мАч с рабочим напряжением 4,2–3,6 В. Контроль заряда и защита аккумулятора осуществляется с помощью модуля TP4056. Основные характеристики: входное напряжение: 4,5–5,5 В, зарядный ток: 0,5–1 А, входной разъем: micro-USB.

Для создания анализируемого потока воздуха применяется компрессор типа SC3101PM [5], отличающийся малыми габаритами, требуемой производительностью и низким напряжением питания. В качестве элементов управления применяются мембранные кнопки, обеспечивающие надежную и долговременную работу устройства.

На основе структурной схемы и выбранной элементной базы была разработана электрическая принципиальная схема устройства и изготовлен макет (рис. 2).

На рис. 3 представлен внутренний вид макета устройства, где расположены: 1 – индикатор,



Рис. 2. Внешний вид комплексного устройства для оценки содержания кислорода и углекислого газа в воздушной среде

### Библиографический список

1. Требования к воздуху рабочих зон. URL: <http://www.ecocat.biz/vozduh%20trebovania> (дата обращения: 09.12.2020).
2. ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-30494-2011> (дата обращения: 09.12.2020).
3. Датчик кислорода. URL: <https://www.eksis.ru/catalog/sensors-and-mikrokompressory/product293.php> (дата обращения: 09.12.2020).
4. Sensirion SCD30 Sensor Module. <https://docs.rs-online.com/2d49/0900766b816b6f9d.pdf> (дата обращения: 09.12.2020).
5. Компрессор типа SC3101PM. URL: <https://iar-duino.ru/lib/d4ecfd50802cb0e4431ae33301548ac1.pdf> (дата обращения: 09.12.2020).

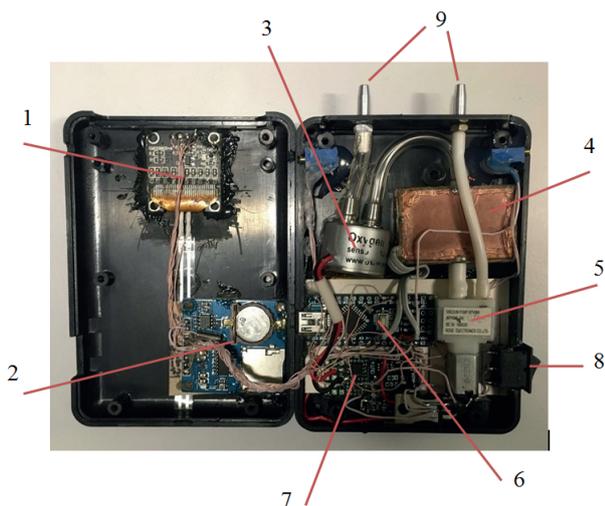


Рис. 3. Внутренний вид макета устройства для оценки содержания кислорода и углекислого газа в воздушной среде

2 – модуль ЧРВ и SD карты, 3 датчик кислорода Oksik-11, 4 – датчик углекислого газа в корпусе, 5 – микрокомпрессор, 6 – плата МК Atmega328P, 7 – модуль контроллера заряда, 8 – выключатель питания, 9 – штуцера для подключения внешних устройств. Общие габариты макета устройства 105×75×25 мм.

Таким образом, разработанное устройство позволяет решать задачу комплексной оценки параметров воздушной среды на содержание кислорода и углекислого газа. Устройство найдет применение в производстве, быту и в проведении научно-исследовательских работ.

УДК 621.38

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-32-34

**В. А. Килимник\***

кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела биотехнических проблем

**А. А. Чекменева\***

магистр

**Е. О. Фаталиева\***

магистр

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ КОЖНОГО ПОКРОВА

Представлена разработка устройства для оценки относительной влажности кожного покрова, которое предназначено для уточнения диагноза и выбора метода лечения больных с острой сердечной недостаточностью. Устройство также позволяет регистрировать влажность, температуру и атмосферное давление окружающего воздуха.

**Ключевые слова:** влажность, оценка, кожный покров, температура, атмосферное давление, регистрация, данные, острая сердечная недостаточность.

**V. A. Kilimnik\***

PhD Sc. Tech., Head of the Research Department of Biotechnical Problems

**A. A. Chekmeneva\***

Master

**E. O. Fatalieva\***

Master

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## DEVICE FOR ASSESSING THE RELATIVE HUMIDITY OF THE SKIN

The article presents the development of a device for assessing the relative humidity of the skin, which is designed to clarify the diagnosis and choice of treatment method for patients with acute heart failure. The device also allows you to record the humidity, temperature and atmospheric pressure of the surrounding air.

**Keywords:** humidity, assessment, skin, temperature, atmospheric pressure, registration, data, acute heart failure.

Целью представленной работы является разработка устройства для оценки относительной влажности кожного покрова в условиях палаты реанимации. Место использования предъявляет определенные требования к элементам устройства (особенно датчика, непосредственно касающегося кожного покрова обследуемого). Необходимо также учитывать специфику применения устройства в реальных условиях (минимум нагрузки на врача, автоматическая регистрация времени и результатов оценки параметров и т. д.).

Данные, представленные устройством, позволяют лечащему врачу уточнить не только диагноз, но и оценить тактику лечения конкретного больного, получая результат воздействия (фармакологического, физиотерапевтического и др.) в цифровой форме непосредственно во

время и после проведения соответствующей процедуры [1].

На рис. 1 представлена структурная схема устройства для оценки относительной влажности кожного покрова.

Синтез структуры устройства непосредственно связан с выбором датчика относительной влажности. Исходя из информационного обзора оптимальным является выбор датчика, сочетающего в своем составе не только измерение влажности, но и температуру окружающей среды и атмосферного давления. По данным медицинских сотрудников наличие измерителя атмосферного давления в устройстве является важным для оценки состояния метеочувствительных пациентов. Таким требованием удовлетворяет датчик фирмы Bosch типа ВМЕ280 [2]. Основные характеристики измеряемых по-

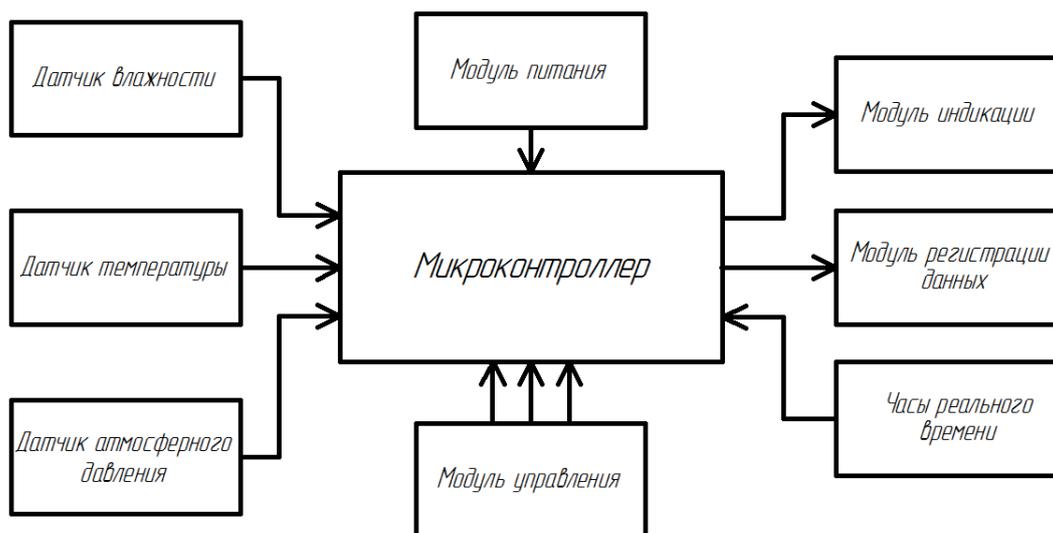


Рис. 1. Структурная схема устройства для оценки относительной влажности кожного покрова

казателей данного датчика: диапазон измерения влажности 20–95 %, пределы измеряемого давления: 225–825 мм рт. ст. и температурный диапазон: 0–65 °С. Точность измерения всех параметров не хуже 5 %.

В качестве управляющего модуля используется микроконтроллер (МК) фирмы Atmel типа Atmega 328P [3]. Для программирования данного МК существует большое количество библиотек, что ускоряет процесс разработки макета устройства. При разработке использовалась плата Arduino Nano, построенная на базе данного МК, позволяющая его программировать по интерфейсу USB.

Для возможности дальнейшей обработки оценивающих параметров необходимо сохранять данные с привязкой ко времени. Для этого применяется модуль часов реального времени (ЧРВ) с интерфейсом для SD карты.

Визуализация данных обеспечивается применением OLED символьного индикатора (16 символов на 2 строки). Выбранный индикатор дает хорошую видимость при любой освещенности.

В качестве источника питания используется Li-Pol аккумулятор LP103450-PCM емкостью 1800 мАч с рабочим напряжением 3,6–4,2 В. Контроль заряда и защита аккумулятора осуществляется с помощью модуля TP4056.

На рис. 2 представлен макет устройства, оценивающего относительную влажность кожного покрова.



Рис. 2. Устройство для оценки относительной влажности кожного покрова

Процедура измерения влажности кожи состоит из двух этапов. На первом измеряются параметры окружающей среды (температура, относительная влажность, атмосферное давление). После фиксации данных параметров переходят к этапу измерения влажности кожного покрова. Датчик находится в корпусе из биосовместимого материала. Измерение происходит путем наложения датчика на поверхность участка кожи, относительную влажность которой необходимо замерить. После установления показаний влажности среды внутри датчика происходит регистрация на SD-карту с привязкой ко времени.

Вопрос стерильности корпуса датчика при измерении у разных пациентов решается путем применения одноразовых чехлов.

Таким образом, разработанное устройство соответствует требованиям медицинских сотрудников и после технических испытаний может быть применено для научно-исследовательских работ в клинической практике. Применение этого устройства позволит уточнить поставленный диагноз больным с острой сердечной недостаточностью и скорректировать лечебный процесс.

### Библиографический список

1. Sensing moisture level of human skin. URL: <https://www.iit.it/technology-transfer-docs/526-technology-teaser-sensing-moisture-level-of-human-skin-z-0/file> (дата обращения: 09.12.2020).
2. Датчик температуры, влажности и давления BME280. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf> (дата обращения: 09.12.2020).
3. Микроконтроллер Atmel. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/549/DOC001549488.pdf> (дата обращения: 09.12.2020).

УДК 620.9, 621.311

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-35-44

**А. В. Сорокин\***

ассистент

**Н. И. Мирошниченко\*, А. С. Раскопина\*, М. Д. Синкин\***

студенты

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИМУЛЯЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ SMART GRID

Текущее состояние электроэнергетического оборудования находится в критической степени износа и требует энергоэффективных решений и развитие энергвозобновляемых источников. Поэтому в настоящее время активно развиваются технологии интеллектуальных сетей электроснабжения. Такие системы направлены на повышение эффективности эксплуатации, повышения пропускной способности сети, оптимизацию и распределение нагрузки в сети, что снижает потребность в затратах на новые подстанции и линии электропередачи. Однако внедрение современных технологий сталкивается с проблемами технической интеграции в существующую инфраструктуру и требует моделирования и симуляции. Сочетание традиционных сетей, интеллектуальных систем, возобновляемых источников энергии требует интеграции современных информационных технологий, которые необходимо протестировать и проанализировать перед внедрением в реальную электросеть, чтобы избежать рисков по срокам и возможности интеграции. Целью работы является необходимость рассмотрения модели интеллектуальной сети для определения взаимодействия между различными объектами, участвующими в управлении энергией, и теми, которые вносят вклад в передачу энергии. В работе рассмотрены применяемые модели для симуляции интеллектуальных сетей SMART GRID, обсуждается алгоритм моделирования и моделирования для анализа поведения системы и потребления энергии в среде интеллектуальной сети. Поскольку поведение системы и потребление энергии представляют собой критически важную информацию для разработки алгоритма, показанные примеры решений моделируют различные реалистичные сценарии для интеллектуальных сетей образом.

**Ключевые слова:** интеллектуальные сети электроснабжения, SMART GRID, электроэнергетика, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии.

**A. V. Sorokin\***

Assistant

**N. I. Miroshnichenko\*, A. S. Raskopina\*, M. D. Sinkin\***

Students

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## SMART GRID MODELING AND SIMULATION

The current analyses indicate that the working time of existed power equipment has already exceeded the given service life. Therefore, the whole power industry needs energy-efficient solutions and renewable energy sources that could significantly reduce operational costs. Such systems are directed at increasing the operating efficiency, increasing grid capacity, optimization of power distribution, which, therefore decreases the operational cost for new substations, power equipment, and power lines. However, the introduction of modern technology and state-of-the-art equipment faces challenges with regard to technical issues in the existed power infrastructure. Thus, such integration needs modeling and simulation. A combination of traditional power electrical equipment and new intelligent power networks should be analyzed and tested prior to the stage of implementation. Such analysis and testing allow avoiding most of the possible risks. This paper considers a SMART GRID model to simulate the interaction between the various objects involved in energy management and analyze the energy transmission. The paper also considers the examples of existing models, discusses the algorithm for the system analyzing and energy consumption in the SMART GRID environment. The system operation and energy consumption are critical information for algorithm design. The provided solution examples show the various realistic SMART GRID scenario simulations.

**Keywords:** SMART GRID, electricity, energy efficiency, renewable energy.

### Введение

Интеллектуальная электросеть – это общее название для применения инновационных систем, облачных решений, нейронных сетей и се-

тевых возможностей в простой системе распределения электроэнергии. Интеллектуальная электросеть – SMART GRID представляет собой двусторонний обмен, при котором электричество могут обменивать в обоих направлениях –

между энергокомпаниями и потребителями. Эта растущая сеть связи, автоматизации, компьютеров и управления помогает сделать сеть более эффективной, надежной, безопасной и «зеленой» [1].

Своевременное управление электроэнергетической инфраструктурой необходимо для обеспечения надежности и снижения аварийности высоковольтного оборудования и линий электропередач. Электроэнергетические предприятия сталкиваются с необходимостью внедрения новых стандартов эксплуатации и технического обслуживания, чтобы постоянно улучшать баланс между надежностью электропередачи и стоимостью капитальных затрат. Одной из ключевых задач в энергетическом секторе является управление обслуживанием и ремонтом оборудования. Большое количество единиц оборудования размещено на больших площадях и требует постоянного сервисного обслуживания и ремонта. Сбор и хранение информации о состоянии оборудования в единой системе управления с возможностью оперативного предоставления ее различным потребителям в режиме реального времени позволяет сократить время ремонта, поиска неисправности, увеличить ресурс узлов и агрегатов за счет эффективного и своевременного обслуживания, оптимизировать логистику и загруженность [2].

Состояние электрических сетей в России приближается к критической степени износа. Запас эффективности и прочности энергосистем практически исчерпан. Текущий износ оборудования в энергетике составляет до 70 % основных фондов электросетевого хозяйства. В большинстве случаев ресурс используемых агрегатов давно выработан. В условиях резкого увеличения объемов энергопотребления диспетчерские и ремонтные службы не всегда справляются с возникающими ситуациями, что приводит к соответствующим последствиям и потерям для энергокомпаний. Поиск неисправностей занимает много времени, а средства поиска аварийно-опасных участков не автоматизированы. Потребность в новых современных решениях, способных снизить издержки обслуживания, повысить экологичность и безопасность, является необходимым условием развития современной энергетики в целом.

Текущий уровень потребления электроэнергии требует быстрого и максимально точного анализа состояния электроэнергетического оборудования для локализации проблем или их предотвращения, предварительного прогнозирования пиковой нагрузки на систему. Энергетические сети все чаще нуждаются в дополне-

нии новыми цифровыми интеллектуальными решениями, которые могут выполнять задачи сбора и анализа данных больших размеров.

Мировая практика показывает, что процесс модернизации электроэнергетики в направлении создания сетей электроснабжения системно и последовательно идет уже несколько лет. Управление электросетью с помощью внедрения интеллектуальных систем, инновационных технических решений, систем мониторинга и предиктивного анализа обеспечивает автоматизацию, мониторинг и контроль двусторонней передачи энергии на всех этапах – от электростанции до потребителя [3]. Сегодня в России успешно внедряются инновационные решения на ряде ведущих электроэнергетических компаний, таких как ПАО «Россети», «ЕвросибЭнерго», МРСК Северо-запада, и многие другие. От стадии пилотного проекта развитие интеллектуальных сетей переходит в стадию массового внедрения. Поэтому все более актуальными становятся вопросы интеграции инновационных решений в существующую инфраструктуру.

Интеллектуальные сети SMART GRID позволяют реализовать возможность эффективной интеграции электростанций на основе возобновляемых источников энергии. Существующие электроэнергетические компании и обслуживаемая ими инфраструктура не отвечает требованиям экологичности. Поэтому внедрение возобновляемых источников энергии, таких как ветрогенераторы, солнечные батареи, в настоящее время является необходимостью. Отказ от углеродосодержащих источников энергии в долгосрочной перспективе является единственным экологичным решением для электроэнергетики.

Взрывной характер развития Smart Grid получили благодаря стремительному развитию информационных и компьютерных технологий, возможности локальных и глобальных коммуникационных сетей, протоколов связи и сети Интернет [5].

### **Виды инфраструктур и протоколы взаимодействия**

Коммуникационная система является основным компонентом инфраструктуры связи smart grid. С обновлением технологий и приложений для достижения передовой инфраструктуры интеллектуальных сетей для анализа огромного объема данных для контроля и ценообразования в реальном времени [6]. Беспроводная и проводная связь – это два основных типа средств связи, которые могут использоваться для передачи

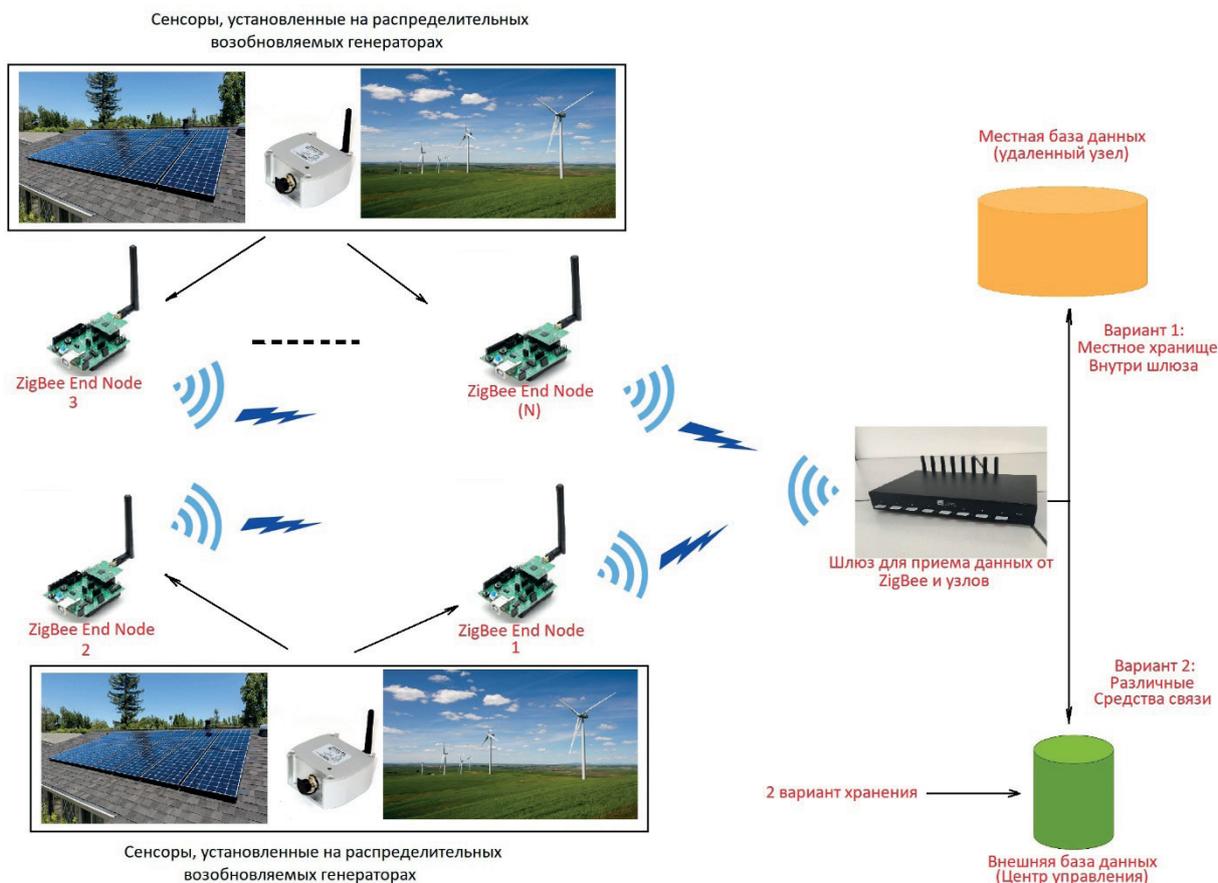


Рис. 1. Интеграция модулей Zigbee в общую систему [9]

информации между интеллектуальными вопросами и поставщиками. В SMART GRID используются два типа информационных структур. Первый – от электроприборов до интеллектуального счетчика с использованием беспроводных коммуникационных технологий, таких как Zigbee, NB IoT и т. д. Второй поток используется для обмена данными между интеллектуальным счетчиком и коммунальными дата-центрами с использованием сотовых технологий [7].

В беспроводных коммуникационных технологиях Zigbee использует сравнительно низкую мощность, стоимость, скорость передачи данных и сложность. Zigbee используется в SMART GRID для автоматического считывания показаний счетчиков, домашней автоматизации и мониторинга энергии. Zigbee имеет полосу пропускания 2,4 ГГц и 16 каналов, каждый из которых использует полосу пропускания 5 МГц, а максимальная выходная мощность составляет 0 дБм. Максимальная дальность передачи составляет от 1 до 100 м при скорости передачи данных 250 Кбит/с. Zigbee использует регулиру-

емый протокол, расположенный на стандарте IEEE 802.15.4 [8].

Протокол Zigbee является протоколом для устройств с низким энергопотреблением. Протокол поддерживает топологии сети «точка-точка», «дерево» и «звезда» и самоорганизующуюся, и самовосстанавливающуюся mesh-топологию с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений. Согласно спецификации Zigbee имеет возможность выбора алгоритма маршрутизации в зависимости от требований приложения и состояния сети, механизм стандартизации приложений – профили приложений, библиотеку стандартных кластеров, конечные точки, привязки, гибкий механизм безопасности. Помимо этого, ZigBee обеспечивает простоту развертывания и обслуживания [10].

Ячеистая топология, или mesh-сеть (*wireless mesh*), – это комбинация узлов, объединенных в группы и работающих как самостоятельный маршрутизатор. Самовосстанавливающиеся свойства этих узлов являются необходимыми для поиска маршрута через активные узлы. Ин-

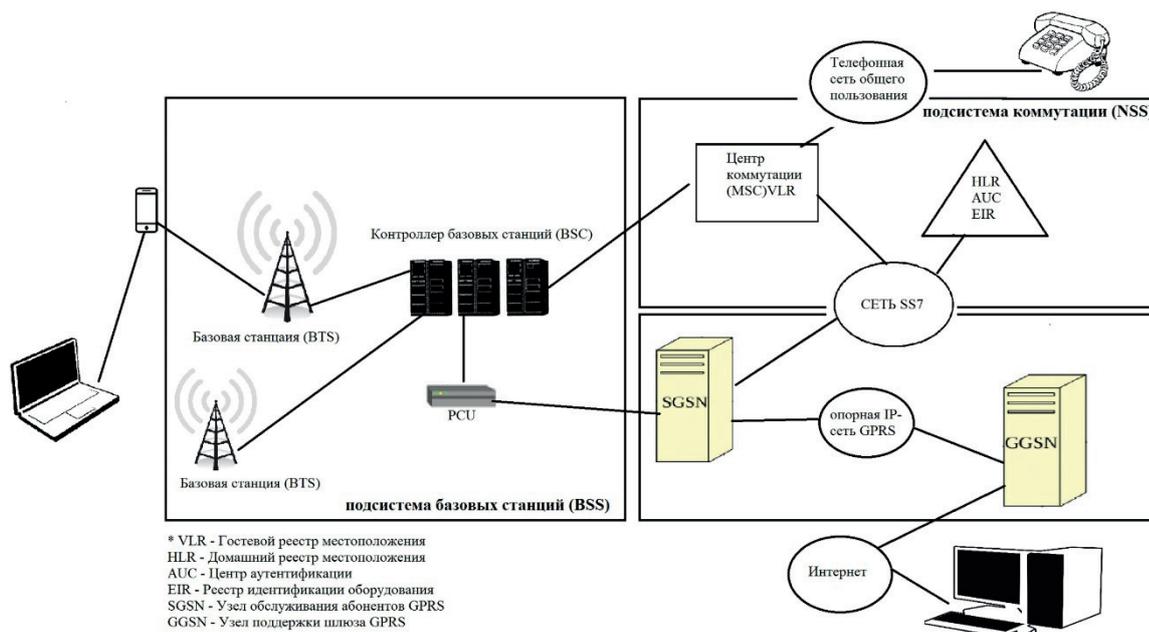


Рис. 2. Структура сети GSM [11]

фраструктуры ячеистой топологии децентрализованы, поскольку каждый узел передает информацию следующему узлу [11].

GSM (*Global System for Mobile Communications*) – это глобальная система мобильной связи, используемая для передачи данных и голосовых услуг. GSM – это сотовая технология, которая связывает мобильные устройства с сотовой сетью [12].

Система GSM состоит из трех основных подсистем: базовых станций (BSS – Base Station Subsystem), коммутации (NSS – Network Switching Subsystem), центра технического обслуживания (OMC – Operation and Maintenance Centre).

В отдельный класс оборудования GSM выделены терминальные устройства – подвижные станции (MS – Mobile Station), так же известные как мобильные (сотовые) телефоны [13].

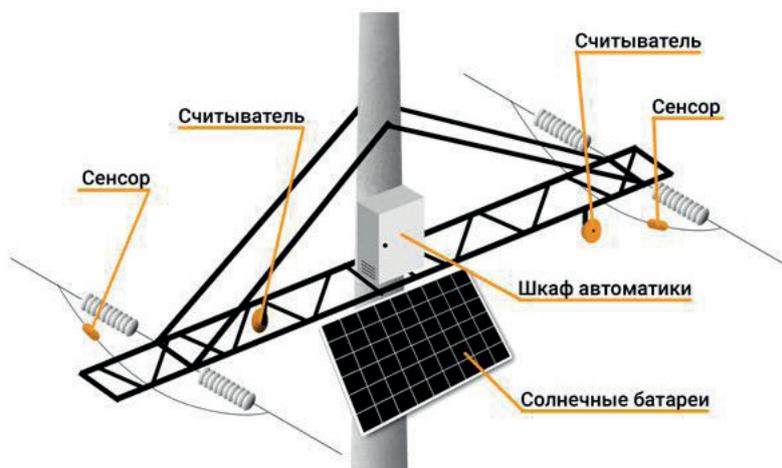


Рис. 3. Комплекс температурного мониторинга электроэнергетического оборудования линий электропередач для 110кВ [15]

Сотовые сети также являются подходящим вариантом для связи между удаленными узлами для бытовых потребителей. Сотовые сети используются для построения выделенного пути для коммуникационной инфраструктуры, позволяющей разворачивать интеллектуальные счетчики на широкой территории. Различные технологии сотовых сетей, такие как 2G, 2.5G, 3G, WiMAX, LTE, Nb-IoT, используются для обмена данными между интеллектуальным счетчиком и служебным дата-центром [14].

### Варианты технологий интеграции интеллектуальных сетей

Одним из примеров интеграции является система мониторинга основных узлов и агрегатов электроэнергетического оборудования, основанная на использовании пассивных датчиков температуры. Такая система позволяет контролировать нагрузку линий электропередач и пропускную способность.

Использование пассивных датчиков оправдано из-за их уникальных свойств, таких как повышенная стойкость к внешним воздействиям (повышенная температура, высокое напряжение), отсутствие необходимости в источниках питания.

Комплекс, показанный на рис. 4, предназначен для использования в составе системы автоматического контроля состояния провода воздушных линий электропередачи с передачей информации в SCADA систему потребителя.

SCADA система представляет собой пакет программ, предназначенный для обеспечения работы в реальном времени систем мониторинга, обработки, отображения и архивирования информации о контролируемом объекте [16]. SCADA может являться частью АСУ ТП, АСКУЭ, системы экологического мониторинга, научного эксперимента, автоматизации здания и т. д. Такие программы устанавливаются на рабочие станции или ПК и для связи с объектом используют стандартные драйвера ввода-вывода или OPC/DDE серверы. Программный код может быть как написан на одном из языков программирования, так и сгенерирован в среде проектирования [15]. Сбор и визуализация данных о температуре осуществляется через Web-интерфейс на сервере.

Такие системы обладают следующими характеристиками:

- устойчивость к внешним воздействиям;
- применение в высоковольтных сетях;
- использование пассивных сверхнадежных датчиков (отсутствие электроники и элементов питания);
- дальность опроса беспроводных датчиков от 1 до 12 м;
- высокая точность измерения (для датчиков температуры – 1 °С);
- возможность мониторинга системы в режиме реального времени.

Внедрение комплексов контроля в качестве элемента интеллектуальной сети электроснабжения на базе акустоэлектронных датчиков является инновационным решением, способствующим повышению энергоэффективности.

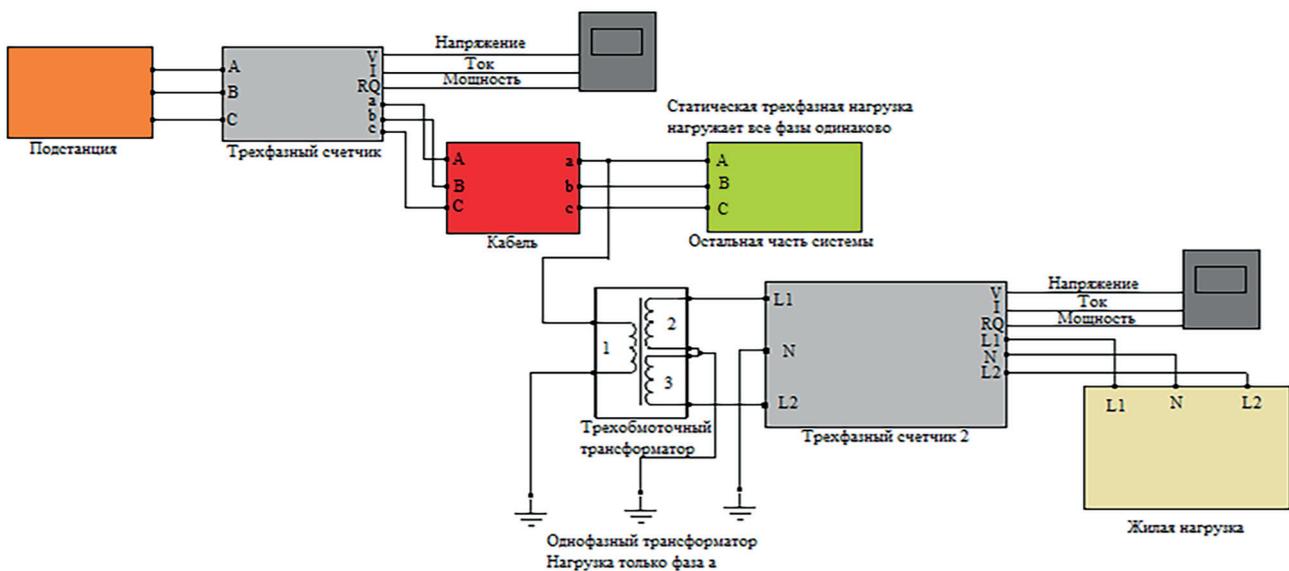


Рис. 4. Модель SMART GRID с модификациями [16]

Модель фотоэлектрической системы (PV system),  
установленной на дома 4&5

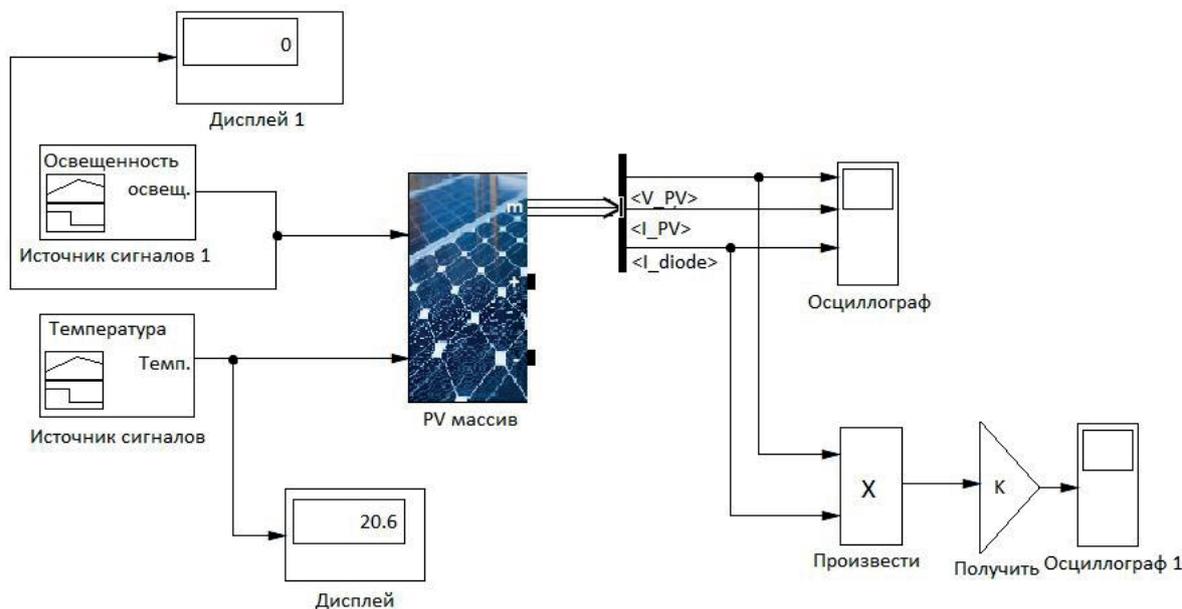


Рис. 5. Пример модели фотоэлектрической системы [16]

**Выгоды от внедрения:**

- 1) управление мощностью исходя из реальной температуры провода;
- 2) увеличение полезного отпуска до 50 % в зимний период;
- 3) контроль температуры провода на участках линии с увеличенными пролетами (переходы через инженерные и естественные преграды);
- 4) контроль температуры контактных соединений шлейфов;
- 5) фиксация попадания молнии в провод ВЛ.

**Моделирование системы**

Типовые модели, применяемые в [16], могут быть использованы для симуляции систем с использованием элементов в виде комплексов контроля на пассивных датчиках температуры.

Для упрощенного расчета мощности бытовых систем, потребляющих электроэнергию из источников, интегрированных в интеллектуальную сеть, достаточно получить значения потребляемой и выходной мощностей системы

(возобновляемых источников электроэнергии – ветрогенераторы, солнечные батареи и т. п.), а также задать различные сценарии потребления электроэнергии.

В качестве примера модели расчета потребления и генерации электроэнергии для бытовых потребителей (жилые дома) можно рассмотреть модель интеллектуальной сети, разработанной Центром электромеханики Техасского университета для Pecan Street Inc с некоторыми модификациями, показанными на рис. 4, 5.

В этой модели профиль нагрузки и выработка солнечной энергии для каждого из 5 домов считываются из файла MATLAB с использованием блока «From File» в SIMULINK.

Мощность, вырабатываемая источниками электроэнергии  $P_{grid}$ , определяется для пяти сценариев:

- дом 1 – без фотоэлектрической генерации;
- дом 2 – без фотоэлектрической генерации.

Пик нагрузки смещен в непииковый период (реакция на спрос).

- дом 3 – без фотоэлектрической генерации;
- дом 4 – установлена фотоэлектрическая система. Мощность, потребляемая от сети, становится меньше.

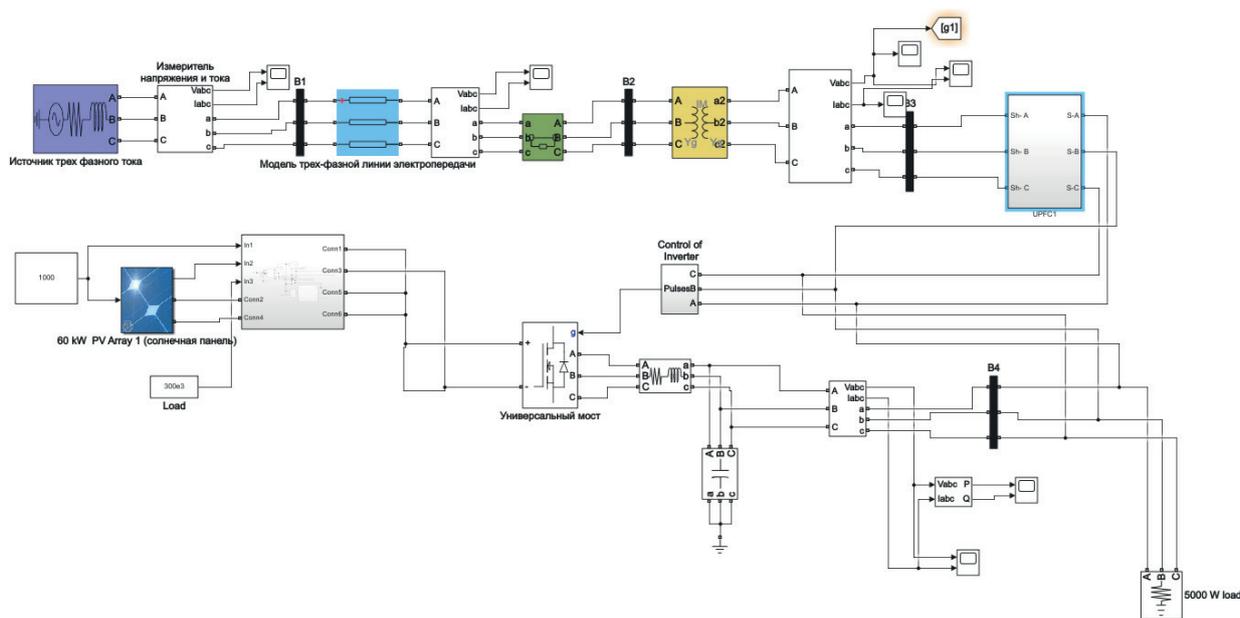


Рис. 6. Упрощенная модель системы температурного мониторинга электроэнергетического оборудования линий электропередач для 110кВ [17]

– дом 5 – установлена фотоэлектрическая система. Кроме того, пик нагрузки переместился в непииковый период.

На основе приведенной выше модели получают три кривые:

- кривая текущего потребления электроэнергии ( $P_{load}$ );
- кривая выходной мощности ( $P_{solar}$ );
- мощность, потребляемая из сети ( $P_{grid}$ ).

Формула по данным трем кривым:

$$P_{grid} = P_{load} - P_{solar}, \quad (1)$$

где  $P_{grid}$  – величина потребления, которая используется для расчета расходов на электроэнергию, понесенных пользователем.

Как правило, для интеллектуальных сетей применяют топологическую модель, которая позволяет построить имитационную модель с целью анализа каскадных отказов.

Для построения топологической модели рассмотрим комплекс температурного мониторинга электроэнергетического оборудования линий электропередач для 110кВ, показанный на рис. 3.

Используемая система, показанная на рис. 3, может быть представлена в виде модели на рис. 6. Здесь показана модель, выполненная в Simulink. В ней используется генератор трехфазного тока, измерители напряжения и тока, модель трехфазной линии электропередачи, а

также солнечные батареи и блок «*Three-Phase Breaker*», который представляет собой трехфазный выключатель, где время открытия и закрытия управляется от любого внешнего сигнала (режим внешнего управления) или от таймера внутреннего контроля (режим внутреннего контроля). Блок «*Three-Phase Breaker*» использует три блока прерывателя, соединенные между входными параметрами и выходными параметрами блока. Блоки, симулирующие короткие замыкания, не показаны на этой модели.

Среди доступных моделей энергосистем для каскадного анализа в данной работе выбрана топологическая, на основе которой можно продемонстрировать предварительные результаты для дальнейшего исследования. Большинство информации о структуре энергосистемы может быть получено в виде набора геоданных. В отличие от обширных динамических рабочих состояний и параметров, эти топологические данные более доступны. Они являются источниками неизменной во времени информации, которая не подвержена переходным состояниям энергосистем [18].

Среди доступных моделей энергосистем для каскадного анализа в работе выбрана топологическая модель, на основе которой возможно продемонстрировать предварительные результаты и информацию для дальнейшего исследования. Большинство информации о структуре энерго-

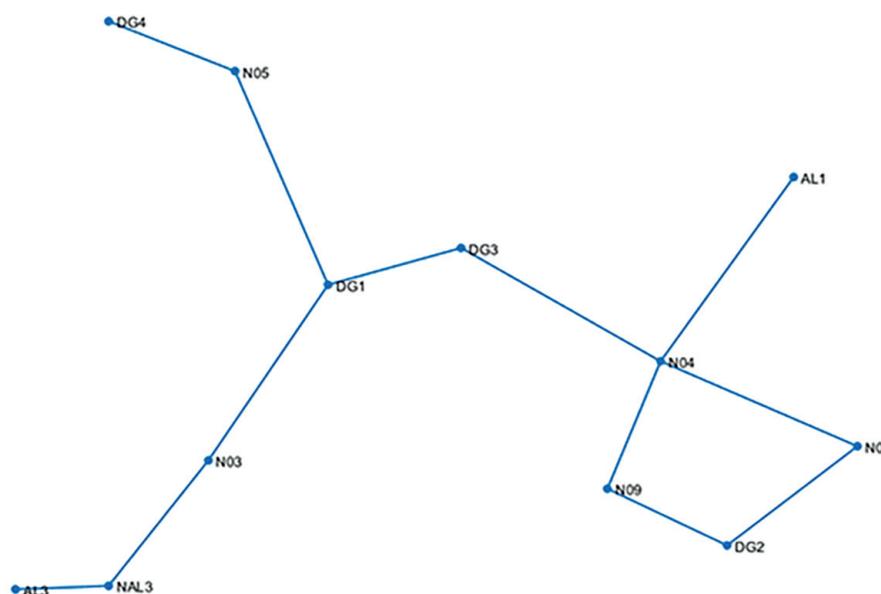


Рис. 7. Пример топологической модели системы интеллектуальной сети электроснабжения

системы может быть получено в виде набора геопространственных данных. В отличие от обширных динамических рабочих состояний и параметров, эти топологические данные более доступны. Они являются источниками неизменной во времени информации, которая не подвержена переходным состояниям энергосистем. Для представления энергосистемы в виде топологической сети необходимо задать следующие определения.

Все части энергосети называются узлами, независимо от типа подстанции (генератор, нагрузка). Линия передачи, которая подключает одну подстанцию на каждом конце, будет рассматриваться как ответвление в сети.

Следовательно, энергосистема рассматривается как двунаправленный невзвешенный граф – упрощение, которое помогает значительно снизить время моделирования.

Определим нагрузку, от которой зависит процесс каскадирования отказов. В ряде статей показано, что нагрузка связана с возможностью подключения или «центральностью» своих соседей. Это означает, что узел либо подключается к большому количеству соседей, либо, если прямые соседи имеют больше возможностей подключения, то с большей вероятностью будет увеличена доля нагрузки в подаче энергии. Поэтому в этой работе мы определяем нагрузку узла как произведение его степени и суммы степени всех его соседей.

Пусть  $Deg(v)$  – степень узла  $v$ ;  $Nbr(v)$  – степень множества соседних узлов  $v$ , тогда нагрузка для каждого узла  $v$ , обозначенная как  $L(v)$ , рассчитывается следующим образом:

$$L(v) = Deg(v) \sum_{n \in Nbr(v)} Deg(n). \quad (2)$$

Когда узел ( $v$ ) отключен вследствие каскадного отказа, его нагрузка будет пропорционально перераспределена на соседей  $u \in Nbr(v)$ , а нагрузка каждого активного соседа  $n$  неисправного узла будет обновляться в соответствии с уравнением (3):

$$\Delta L(n) = \frac{L(n)}{\sum_{u \in Nbr(v)} L(u)} L(v). \quad (3)$$

### Анализ результатов моделирования

В результате моделирования может быть получена топологическая модель, пример которой показан на рис. 7

Анализ результатов моделирования подобных систем позволяет получить информацию о потребляемой нагрузке узлов топологической модели.

В табл. 1 показаны узлы, величина нагрузки которых достаточно велика, это повышает вероятность выхода их из строя, где  $P_o F_f$  – процент



Рис. 8. Программный интерфейс комплекса контроля состояния электроэнергетического оборудования

Таблица 1

**Информация о наиболее перегруженных узлах топологической модели**

Node ID	Load	$P_o F_f (\%)$
15	2496	92.94
14	2112	92.94
38	1380	92.75
53	1131	92.94
29	825	92.75
77	781	92.75
76	741	92.94
57	702	92.94
55	689	92.94

отказов при условии, что задана определенная точность.

Каждый каскадный сбой начинается с отдельного узла, у которого самая большая нагрузка.

Программное обеспечение комплекса, показанного на рис. 3, иллюстрирует интерфейс, который показан на рис. 8.

### Заключение

В статье показаны примеры моделей и способы симуляции интеллектуальных сетей электроснабжения.

Представленные системы, модели и интерфейс программного обеспечения иллюстрируют принципы работы и взаимодействия структурных элементов таких систем. Также представлен обзор интерфейсов их взаимодействия. Типовые подходы моделирования рассматривают интеллектуальные сети электроснабжения как многослойную систему, где каждый слой – уровень абстракции от физического (устройства, датчики), высокоуровневого – в виде облачных решений, позволяющих обработать результаты.

В дальнейших исследованиях на основе показанных моделей необходимо решить проблемы интеграции в отечественные сети электроснабжения с целью повышения их энергоэффективности, экологичности и безопасности.

Внедрение интеллектуальных сетей электроснабжения позволяет значительно снизить капитальные затраты и издержки сервисного обслуживания, а также продлить срок службы оборудования за счет эффективного использования ресурса оборудования.

### Библиографический список

1. Powerelectronicsnews: The Smart Grid: What's "the grid" and how is it "smart?". URL: <https://www.>

powerelectronicsnews.com/the-smart-grid-whats-the-grid-and-how-is-it-smart/ (дата обращения: 11.11.2020).

2. Tadviser: Smart Grid. URL: <https://clck.ru/S264K> (дата обращения: 04.12.2020).

3. Smart energy summit: Умные электросети SMART GRID в России: кейсы, перспективы, сложности. URL: <http://smartenergysummit.ru/novosti/umnyie-elektroseti-smart-grid-v-rossii-kejsyi-perspektiviyi-slozhnosti> (дата обращения: 04.12.2020).

4. Nv, Что такое Smart Grid? URL: <https://nv.ua/ukraine/so-skorostyu-sveta/chto-takoe-smart-grid-50055452.html> (дата обращения: 04.12.2020).

5. Abok: Введение в Smart Grid. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=5363](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5363) (дата обращения: 17.11.2020).

6. Sferamagazine: Электронные компоненты и материалы. URL: <http://sferamagazine.ru/477777-science-knows-no-boundaries-cc2530-rt5350-kit-zigbee-wifi-board-openwrt-things.html> (дата обращения: 05.12.2020).

7. Wikipedia: Zigbee. URL: <https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Zigbee> (дата обращения: 05.12.2020).

8. Telecommunications for smart grid: Backhaul solutions for the distribution network / D. Laverty, D. Morrow, R. Best.

9. Gungor V., Lu B., Hancke G. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid // IEEE transactions on industrial electronics. 2010. Vol. 57. N. 10. P. 3557–3564.

10. Wikipedia: GSM. URL: <https://ru.m.wikipedia.org/wiki/GSM> (дата обращения: 05.12.2020).

11. Yi P., Iwayemi A., Zhou C. Developing zigbee deployment guideline under wifi interference for SMART GRID applications // IEEE transactions on smart grid. 2011. Vol. 2. N 1. P. 110–120.

12. Wikipedia: Cellular network. URL: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Cellular\\_network](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Cellular_network) (дата обращения: 05.12.2020).

13. SMART GRID technologies: communication technologies and standards / V. Gungor, D. Sahin, T. Kocak et al. // IEEE transactions on Industrial informatics. 2011. Vol. 7. N. 4. P. 529–539.

14. Pdfs: Various Types of SMART GRID Techniques: A Review. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/88eb/3dfcb9e33fcb6af40451a2130dbb381c2a9f.pdf> (дата обращения: 22.11.2020).

15. Rfsaw: RFSens. URL: <http://rfsaw.ru/> (дата обращения: 18.12.2020).

16. Wikipedia: SKADA. URL <https://ru.wikipedia.org/wiki/SCADA> (дата обращения: 18.12.2020).

17. Slideshare: Real Time Pricing Simulator for Smart Grids. URL: [https://www2.slideshare.net/SwantikaDhunia/real-time-pricing-simulator-for-smart-grids?from\\_action=save](https://www2.slideshare.net/SwantikaDhunia/real-time-pricing-simulator-for-smart-grids?from_action=save) (дата обращения: 18.12.2020).

18. Mathworks: Microgrid Hybrid PV/ Wind / Battery Management System. URL: [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/60550-microgrid-hybrid-pv-wind-battery-management-system?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/60550-microgrid-hybrid-pv-wind-battery-management-system?s_tid=srchtitle) (дата обращения: 20.12.2020).

УДК 004.942

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-45-47

С. Г. Толмачев\*

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШУМОВ ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА

Предложена методика составления математической модели шумов сигналов управления антенной бортового радиолокационного визира (РЛВ) беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в режиме сопровождения неподвижного объекта по результатам корреляционного анализа телеметрических (ТМ) измерений, полученных в процессе натурных испытаний.

**Ключевые слова:** телеметрические измерения, радиолокационный визир, авторегрессионная модель, корреляционный анализ.

S.G. Tolmachev\*

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF NOISE OF THE ANGULAR COORDINATE METER OF AN OBJECT

The technique of drawing up of mathematical model of noise in the control signals of the antenna of the airborne radar unmanned aerial vehicle in maintenance mode, a stationary object according to the results of correlation analysis of telemetry measurements, obtained during field tests.

**Keywords:** telemetry measurements, radar, autoregressive model, correlation analysis.

Использование БПЛА для решения задач мониторинга обстановки в заданных районах морской или земной поверхности определяет необходимость включения в состав систем управления (СУ) движением БПЛА средств обнаружения и распознавания наблюдаемых объектов (ОН). Для этого применяются оптические или радиолокационные визиры (РЛВ), позволяющие в режиме сопровождения обнаруженного объекта измерять его угловые координаты и дальность до него.

Отработка на этапе математического моделирования законов управления движением БПЛА относительно сопровождаемых ОН предъявляет требования учета погрешностей измерения их координат. Эти погрешности обусловлены как инструментальными ошибками самого РЛВ, как измерителя угловых координат ОН, так и влиянием возмущений внутри СУ угловым положением антенны РЛВ, возникающие из-за нелинейных характеристик элементов контура управления, дискретизации сигналов управления по величине и времени. С точки зрения РЛВ все составляющие движения БПЛА влияют на угловое положение линии визирования ОН. Контур сопровождения ОН задает направление на него относительно корпуса БПЛА в пределах диаграммы направленности антенны.

В работе [1] показана целесообразность использования результатов анализа параметров ТМ измерений в качестве модели интегральных динамических возмущений: угловых параметров линии визирования ОН и углов поворота антенны РЛВ относительно корпуса БПЛА. ТМ информация, регистрируемая в процессе натурных испытаний БПЛА, позволяет получить исходные данные для формирования математической модели погрешностей измерения угловых координат ОН и определения ее параметров.

Перечень необходимой ТМ информации показан на рис. 1 и включает в себя:

- углы поворота антенны РЛВ относительно корпуса БПЛА в режиме сопровождения ОН –  $\psi_A(t)$  и  $\vartheta_A(t)$ ;

- угловое положение строительной горизонтали фюзеляжа БПЛА  $\psi(t)$  и  $\vartheta(t)$ ;

- линейные координаты БПЛА  $X_{\text{БПЛА}}$ ,  $Y_{\text{БПЛА}}$ ,  $H_{\text{БПЛА}}$  в заданной декартовой системе координат, в которой ось  $X$  ориентирована на север, а начало системы координат совпадает с местом старта БПЛА.

Координаты эталонного ОН –  $X_{\text{ОН}}$  и  $Y_{\text{ОН}}$  в системе координат  $OXYZ$  считаются заранее известными. Перечисленные параметры принимаются за реальные изменения траекторных па-

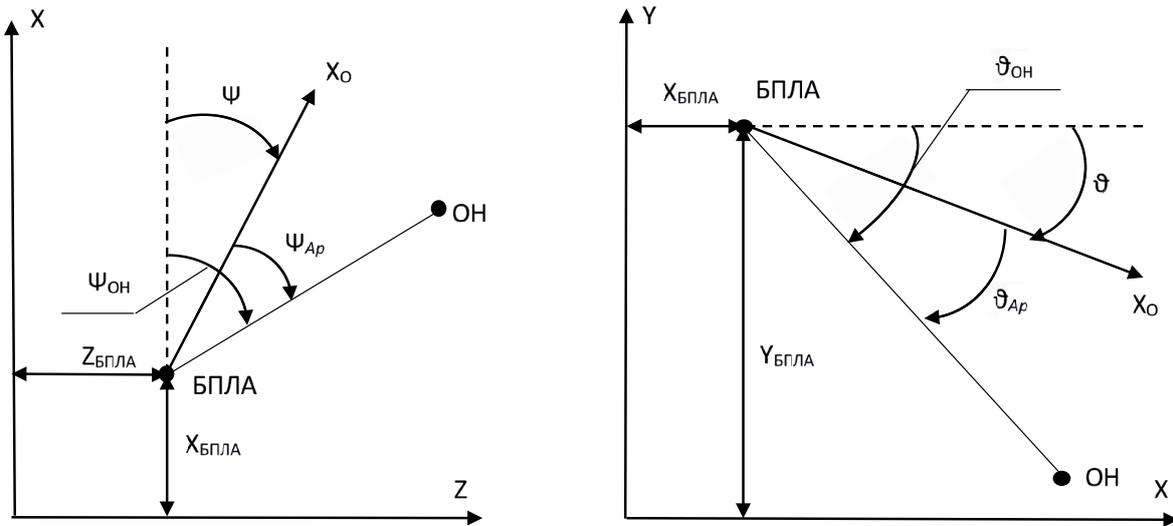


Рис. 1. Углы визирования объекта в горизонтальной и вертикальной плоскостях

раметров, привязанные к единым временным отсчетам, повторяющимся с известным шагом.

Необходимо определить параметры математической модели интегральных шумов, присутствующих в сигналах управления антенной бортового РЛВ  $\psi_A(t)$  и  $\vartheta_A(t)$ . Расчетные значения  $\psi_{Ap}(t)$  и  $\vartheta_{Ap}(t)$  определяются в каждый момент времени по известным координатам ОН и текущим координатам БПЛА:

$$\psi_{Ap} = \arctan \frac{Z_{ОН} - Z_{БПЛА}}{X_{ОН} - X_{БПЛА}} - \psi,$$

$$\vartheta_{Ap} = \vartheta - \arcsin \frac{Y_{БПЛА} - Y_{ОН}}{D_{ОН}}, \quad (1)$$

$$D_{ОН} = \sqrt{(X_{ОН} - X_{БПЛА})^2 + (Y_{ОН} - Y_{БПЛА})^2 + (Z_{ОН} - Z_{БПЛА})^2}.$$

Разность этих значений  $\Delta\psi_A(t) = \psi_{Ap}(t) - \psi_A(t)$  и  $\Delta\vartheta_A(t) = \vartheta_{Ap}(t) - \vartheta_A(t)$  несет в себе информацию об интегральных динамических шумах, параметры которых необходимо определить путем статистической обработки ТМ информации.

На рис. 2 приведены графики временных зависимостей значений шумов  $\Delta\psi_A(t)$  и  $\Delta\vartheta_A(t)$ , полученные в результате обработки одной реализации ТМ данных, полученной в процессе натурных испытаний БПЛА. Значения на оси ординат приведены в условных угловых единицах.

Шумы измерений угловых координат ОН  $\Delta\psi_A(t)$  и  $\Delta\vartheta_A(t)$  представляют собой случайный процесс, обусловленный рядом перечисленных факторов. Интегральная оценка параметров этих шумов может быть сделана на основе статистического анализа множества реализаций ТМ данных. Она должна включать в себя как статистические параметры шумов – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение,

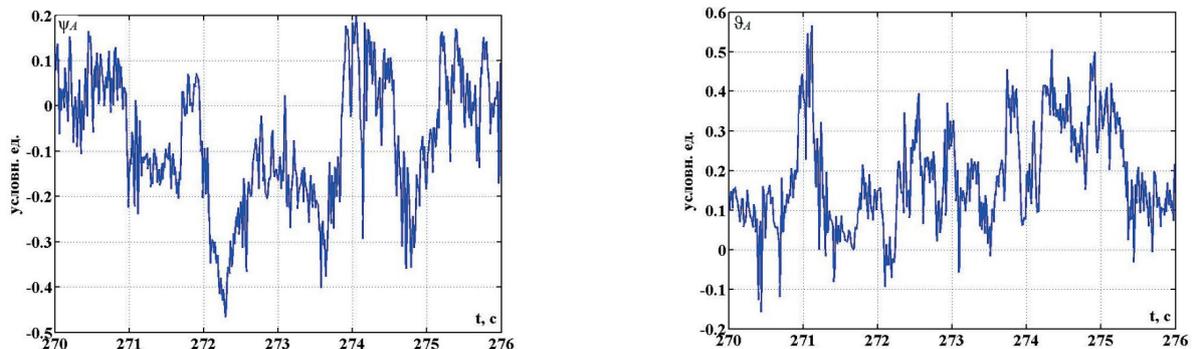


Рис. 2. Шумы измерения угловых координат объекта

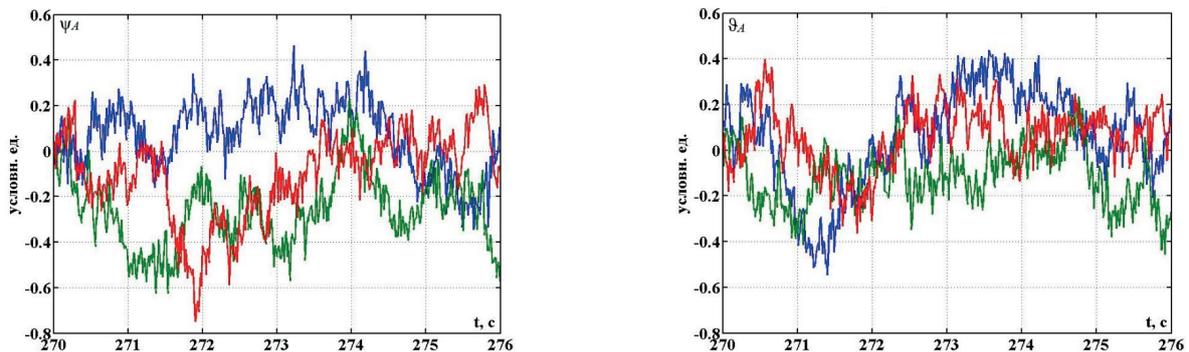


Рис. 3. Результаты моделирования шумов измерения угловых координат объекта

усредненные по множеству реализаций процессов, так и параметры, полученные в результате корреляционного анализа этих процессов.

Одним из возможных вариантов математической модели, позволяющей воспроизводить реализации динамических шумов  $\Delta\psi_A(t)$  и  $\Delta\theta_A(t)$ , является авторегрессионная.

Авторегрессия – это модель временного ряда, в которой наблюдения на предыдущих временных шагах используются в качестве входных данных для уравнения регрессии для прогнозирования значения на следующем временном шаге. Используем приближенную линейную модель авторегрессии порядка  $p$  по методу Бурга в виде передаточной функции фильтра [2]:

$$H(z) = \sigma_{\text{ш}} / (1 + a_2 z^{-1} + a_3 z^{-2} + \dots + a_{p+1} z^{-p}). \quad (2)$$

Порядок фильтра  $p$ , его коэффициенты  $a_i$  и среднеквадратическое значение белого шума  $\sigma_{\text{ш}}$  определяются на основе автокорреляционных свойств исходного процессов  $\Delta\psi_A(t)$  и  $\Delta\theta_A(t)$ . На рис. 3 в качестве примера приведены реализации шумовых процессов, полученные на модели шестого порядка ( $p=6$ ).

Таким образом, предлагаемая методика составления математической модели шумов измерения РЛВ угловых координат неподвижного объекта по данным ТМ измерений заключается в следующем:

– для каждого момента времени  $t$  регистрации ТМ данных фиксируются параметры  $X_{\text{ВПЛА}}, Y_{\text{ВПЛА}}, H_{\text{ВПЛА}}, \psi, \theta, \psi_A, \theta_A$ ;

– для этих значений  $t$  вычисляются расчетные углы визирования ОН  $\psi_{Ap}(t)$  и  $\theta_{Ap}(t)$  согласно (1);

– вычисляются значения погрешностей измерения угловых координат ОН:  $\Delta\psi_A(t) = \psi_{Ap}(t) - \psi_A(t)$  и  $\Delta\theta_A(t) = \theta_{Ap}(t) - \theta_A(t)$ ;

– для полученных на интервале наблюдений временных зависимостей  $\Delta\psi_A(t), \Delta\theta_A(t)$  формируется приближенная линейная модель авторе-

грессии порядка  $p$  в виде передаточной функции фильтра (2), на вход которого подается белый шум;

– коэффициенты фильтра  $a_i$  и среднеквадратическое значение белого шума  $\sigma_{\text{ш}}$ , подаваемого на его вход, определяются по методу Бурга [2].

Верификация полученной математической модели должна основываться на соответствии статистических параметров случайных процессов  $\Delta\psi_A(t)$  и  $\Delta\theta_A(t)$ , полученных по результатам натуральных испытаний и реализованных на математической модели. Для подтверждения соответствия модели не только конкретным частным условиям испытаний необходимо иметь представительную выборку ТМ измерений натуральных испытаний. Для выбора лучшего варианта модели следует также сопоставить результаты, полученные на авторегрессионных моделях, использующих для расчета их параметров ковариационный метод, метод Юла-Уокера и др. Но эти вопросы выходят за рамки настоящей публикации.

### Библиографический список

1. Шаров С. Н. Модели интегральной оценки динамического шума сигналов управления летательного аппарата // Сб. трудов научно-практ. конф. РАРАН. Радиоэлектронное и ракетное вооружение ВМФ: Взгляд в будущее. СПб.: АО «Концерн «Гранит-Электрон», 2020. С. 96–108.

2. Дьяконов В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2016. 976 с.

УДК 004.93

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-48-53

**А. В. Яковлев\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ DEEP LEARNING ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ КОГНИТИВНОЙ УСТАЛОСТИ ЧЕЛОВЕКА ПО ЕГО РЕЧИ

Представлены предварительные результаты применения метода глубокого обучения нейронных сетей (библиотека *auDeep*) для оценки уровня утомления человека на основе его речи. Исходными данными для обучения стал собственный набор экспериментальных данных. Образцы речи в нем были получены из видеозаписей сервиса YouTube, прошедших специальную обработку и экспертное оценивание. Оценка качества классификации показала приемлемые значения определения состояния «после нагрузки», то есть когда человек уже утомлен. Классификация состояния «во время нагрузки» была неустойчива и сильно зависела от качества аудиозаписей.

**Ключевые слова:** глубокая нейронная сеть, утомление, когнитивная усталость, усталость центральной нервной системы, речь.

**A. V. Yakovlev\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## THE USE OF DEEP LEARNING METHODS TO EVALUATE THE INDIVIDUAL'S CENTRAL FATIGUE BY HIS SPEECH

The article presents preliminary results of applying the deep learning method of neural networks (*auDeep* library) to assess the level of human fatigue based on his speech. The source data for training was own set of experimental data. Samples of speech in it were obtained from videos of the YouTube service, which underwent special processing and expert evaluation. Assessment of the quality of classification showed acceptable values for determining the state of «after load», i. e. when a person is already tired. The classification of the state «during loading» was unstable and depended strongly on the quality of the audio recordings.

**Keywords:** deep neural network, DNN, fatigue, cognitive fatigue, central fatigue, speech.

### Введение

Когнитивная усталость – распространенный, но малоизученный симптом, который часто сопровождает состояние нервно-психической неустойчивости у человека, свидетельствует о нахождении человека в состоянии стресса. Когнитивная усталость человека на рабочем месте является причиной большого числа несчастных случаев на производстве, в горнодобывающей промышленности, в дорожном и воздушном транспорте, в любых рабочих сменах продолжительностью более 12 час. [1].

### Состояние исследований

Вместе с периферической усталостью когнитивная усталость формируют феномен общей усталости человека. Однако, в отличие от периферической усталости, связанной с такими известными механизмами, как нарушение нерв-

но-мышечной передачи, метаболические нарушения, дефекты мышечных мембран или недостаточность периферического кровообращения [2], когнитивная усталость (синонимы: усталость центральной нервной системы, усталость ЦНС, англ. – central nervous system fatigue, central fatigue) представляет собой неспособность поддерживать внимание, что требует самомотивации для оптимизации производительности [3].

Сегодня рассматривается несколько различных подходов к измерению когнитивной усталости [4], которые основаны на оценке снижения: 1) работоспособности, происшедшей после длительного периода времени (продолжительных усилий); 2) работоспособности после тяжелого умственного напряжения; 3) работоспособности после тяжелой физической нагрузки; 4) работоспособности во время сильных, но мотивированных (поддерживаемых) умственных усилий. Последний подход получил наибольшую эмпирическую поддержку в работах [5], [6], [10], [13]

и наиболее тесно связан с определением когнитивной усталости.

Спорным вопросом является использование самооценочных субъективных оценок усталости, также известной как утомляемость, при проведении исследований и построении математических моделей. Они существенно отличаются от объективных оценок когнитивной или физической усталости. Так, большинство клинических оценок усталости основаны на субъективных отчетах. Самостоятельные сообщения об усталости обычно коррелируют с депрессией [14, [9] и тревогой [10], но не с объективными показателями тяжести, продолжительности или течения заболевания [9], [16], [17], [18], [19], [20]. Кроме того, в то время как усталость коррелирует с ощущаемой когнитивной дисфункцией [15], большинство проведенных исследований не смогли продемонстрировать значимые связи между субъективными сообщениями об усталости (утомляемости) и широким спектром нейробиологических показателей [4].

В связи с изложенным выше, среди исследователей большую распространение для регистрации усталости имеют методы объективной регистрации.

Золотым стандартом для нейробиологов, изучающих усталость, является электроэнцефалограмма (ЭЭГ). Однако получить хорошие измерения ЭЭГ вне клинических условий практически невозможно. В ряде работ для оценки утомления вместо ЭЭГ предлагается проводить измерения электрокардиограммы (ЭКГ) с использованием в качестве фактора вариабельности сердечного ритма (ВСР). Однако хорошие измерения ЭКГ также трудно достижимы в условиях, когда люди перемещаются в своей рабочей среде [1].

Одним из перспективных методов оценки усталости может рассматриваться измерение ВСР по данным фотоплетизмографии (ФПГ), на основании показаний датчика, размещенного на ухе [1]. Достоинством такого размещения измерительного модуля может быть его ненавязчивость для человека, возможность долгого ношения, низкая отвлекаемость от исполнения рабочих обязанностей и относительно высокая точность измерений. В работе [16] предложен подход к выявлению такого проявления утомления водителя, как сонливость (англ. – Driver Drowsiness), с помощью вейвлет-анализа ВСР и метода опорных векторов.

С развитием и существенным удешевлением видеоборудования все большее распространение получают методы мониторинга усталости человека, основанные на видеорегистрации лица

человека [17], [18]. Их достоинством является то, что они не мешают человеку выполнять привычные действия, не отвлекают его.

Другим актуальным подходом для оценки усталости человека является анализ его речи. По сравнению с анализом видео речь является более удобным показателем для анализа, так как для ее регистрации не требуется какого-либо иного устройства, кроме микрофона, и присутствует меньшая зависимость от ряда внешних факторов, таких как освещенность, угол съемки, характеристики камеры и т. п.

Однако анализ речевой продукции человека на предмет оценки уровня его когнитивной усталости представляет существенную алгоритмическую сложность, которая связана со сложностью самого речевого анализа и методов его анализа. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены аудиограммы и спектрограммы двух одинаковых высказываний испытуемого в разные моменты его деятельности: при отсутствии когнитивной усталости (рис. 1, а) и при ее высоком уровне (рис. 1, б).

Как можно видеть, между обоими рисунками присутствуют определенные отличия, однако четкие различительные признаки выделить очень сложно. В этой связи актуально решение задачи разработки модели оценки когнитивной усталости человека по его речи, которая обладала бы высокими прогностическими способностями. Разработка подобной модели является классической задачей теории распознавания образов и предполагает реализацию как минимум двух взаимосвязанных этапов (рис. 2) [19]: этап формирования набора экспериментальных данных и этап непосредственно разработки самой модели.

Проведенный анализ научных публикаций показал, что сегодня актуальны два основных подхода к построению моделей различных состояний человека по его речи. Первый связан с генерацией большого числа низкоуровневых дескрипторов речевого сигнала [20]. Основным средством для получения этих показателей из исходного речевого сигнала является библиотека openSmile (от англ. – The Munich Open-Source Large-scale Multimedia Feature Extractor) [21]. Второй подход основан на анализе речевого сигнала с использованием глубоких нейронных сетей. Наиболее перспективным средством, реализующим специализированную нейронную сеть, адаптированную для работы со звуками, является библиотека auDeep [22], [23].

В то же время реализация этапа формирования набора экспериментальных данных предполагает три варианта получения исходных дан-

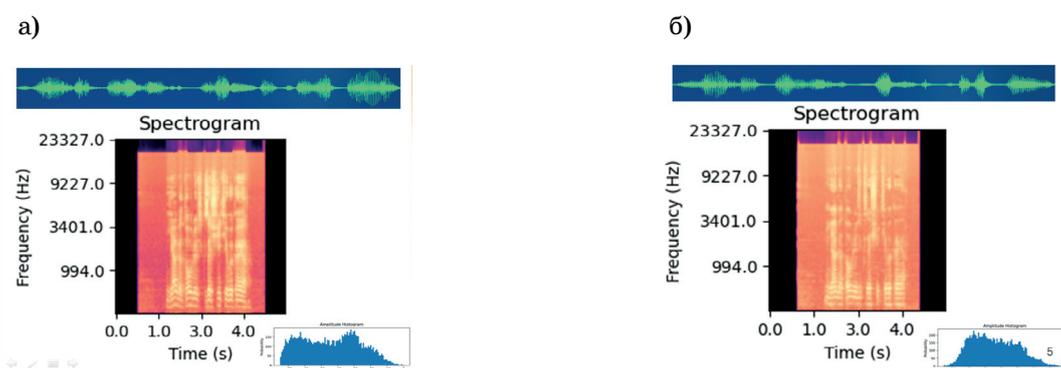


Рис. 1. Пример речевой продукции человека (произнесена одинаковая фраза) при различных уровнях его когнитивной усталости: а – испытуемый в состоянии оптимальной работоспособности, утром, через 2 часа после пробуждения (когнитивная усталость отсутствует); б – испытуемый в состоянии сниженной работоспособности, около 2 часов ночи, после продолжительной умственной нагрузки (высокий уровень когнитивной усталости)

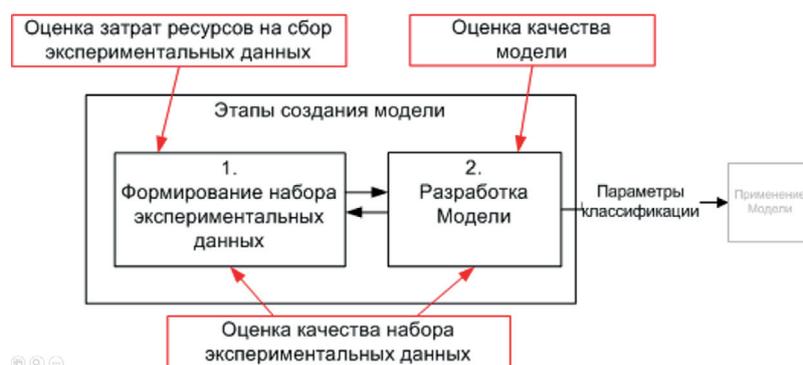


Рис. 2. Этапы создания модели оценки когнитивной усталости человека по его речи

ных для обучения: проведение собственных экспериментальных исследований, использование готовых наборов данных (т. н. датасетов, англ. – datasets) и использование данных из открытых источников. Проведение собственных экспериментальных исследований [24] связано со значительными затратами ресурсов (временных, финансовых, организационных и др.). Собственно, следствием этого является то, что готовых наборов речевых данных по тематике когнитивной усталости человека в открытом доступе нет. Использование данных из открытых источников, таких как видеосервисы YouTube, позволяет получить доступ к неограниченному объему речевых данных, однако предполагает привлечение экспертов для оценки (разметки) полученных аудиофайлов.

### Материалы и методы

В связи с тем, что возможности библиотеки openSmile были изучены в работе [25] в ходе разработки специализированного стенда, целью настоящего исследования было проведение пилотного эксперимента по изучению возможностей библиотеки auDeer в области оценки уровня когнитивной усталости человека.

Использована версия 0.9.4 библиотеки auDeer (<https://github.com/auDeer/auDeer>). Эта библиотека использует глубокую нейронную сеть с архитектурой автоэнкодера из библиотеки TensorFlow. Технологическая цепочка обработки данных представлена на рис. 3.

Для формирования набора экспериментальных данных на сервисе YouTube были отобраны

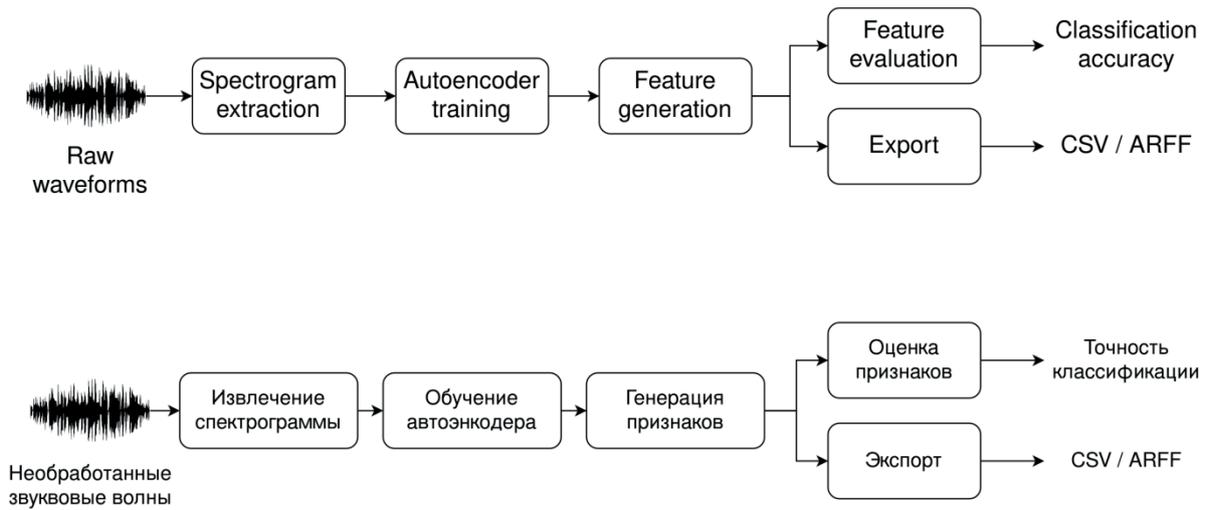


Рис. 3. Технология обработки данных, реализованная в библиотеке aiDeer

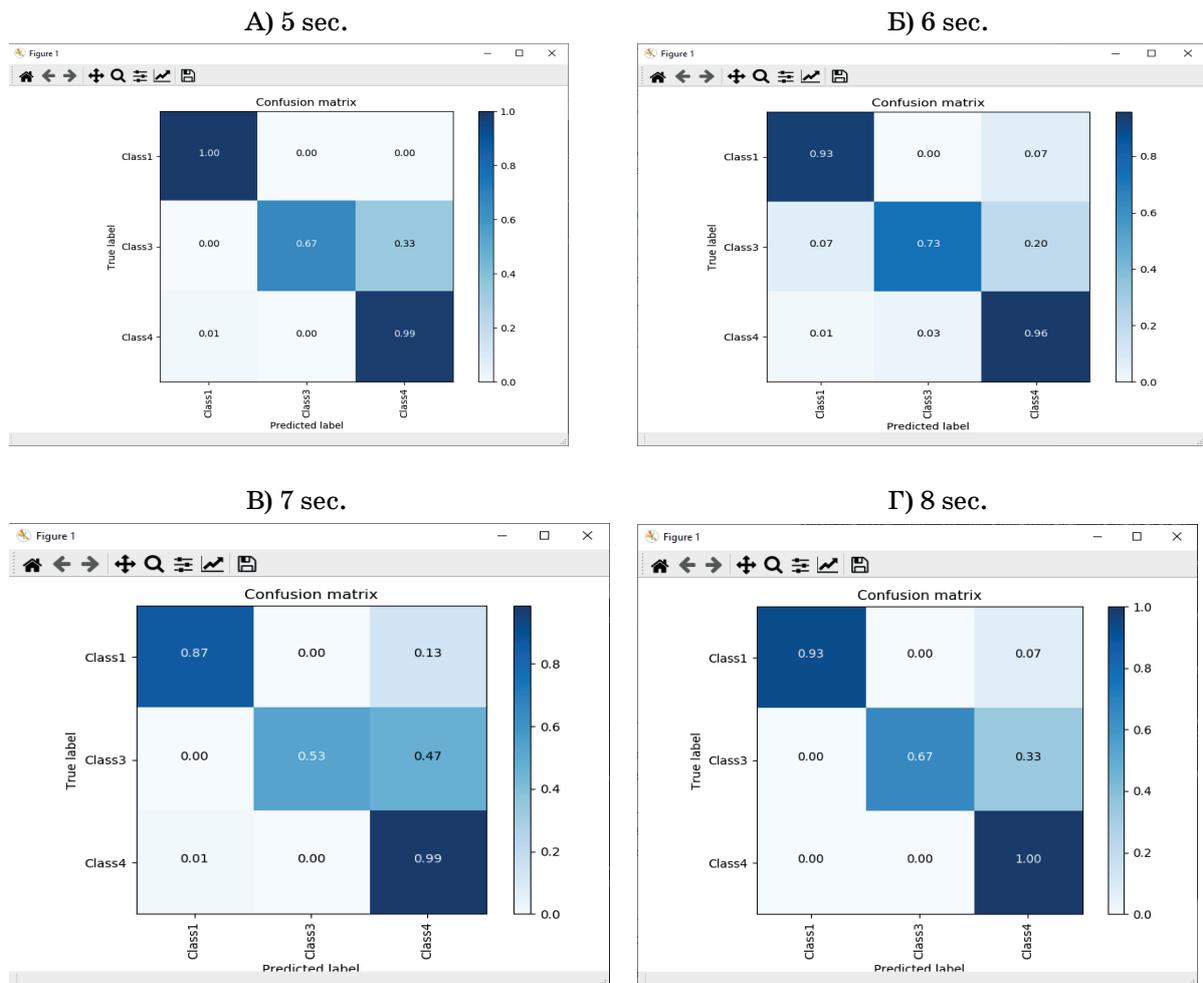


Рис. 4. Матрица метрики ошибки для сформированного набора экспериментальных данных для разных длительностей исходных данных

более 20 видеозаписей. В соответствии с разработанной методикой они были отредактированы, конвертированы в аудиозаписи и отнесены к одному из трех классов когнитивной усталости: состояние готовности (class 1); состояние во время нагрузки (class 3); состояние после нагрузки (class 4).

Далее полученный набор экспериментальных данных был преобразован в соответствии с требованиями к исходным данным, предъявляемых библиотекой auDeer. При обучении использовались речевые фрагменты длительностью 5, 6, 7 и 8 сек.

### Результаты

В результате проведенного обучения получена матрица метрики ошибки для сформированного набора экспериментальных данных (рис. 4).

Анализ полученной матрицы метрики ошибки позволяет сделать вывод о том, что предложенный подход к формированию набора экспериментальных данных из открытых источников себя оправдал и библиотека auDeer показала удовлетворительное качество обучения даже на данных небольшого объема, полученных из открытых источников, без проведения дорогостоящих экспериментальных исследований. Также можно отметить, что увеличение длительности анализируемых фрагментов, соответствующих каждому из состояний когнитивной усталости человека, незначительно, но повышает качество обучения.

### Выводы

Анализ результатов проведенного пилотного эксперимента показал, что применение алгоритмов глубокого обучения (в частности, библиотеки auDeer) для оценки уровня когнитивной усталости человека перспективно. Эти методы не требуют значительных теоретических исследований и «ручного» труда исследователей по изучению данных, как это происходит при анализе низкоуровневых дискрипторов при использовании библиотеки openSmile.

Вместе с тем предложенная методика требует существенной доработки. Актуальной задачей является расширение проведения собственных экспериментальных исследований, что позволит повысить точность оценки всех уровней когнитивной усталости.

Проведенное исследование показало возможность оценки когнитивной усталости человека

на основе анализа характеристик его речи. Перспективность предложенного подхода связана с относительной простотой регистрации речевого сигнала без какого-либо стеснения деятельности человека.

### Библиографический список

1. PPG Heart Beat for Cognitive Fatigue Prediction | Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/canaria/5-gamers> (дата обращения: 27.04.2020).
2. Chaudhuri A., Behan P. Fatigue and basal ganglia // J. Neurol. Sci. 2000. Vol. 179. NS 1–2. P. 34–42.
3. Chaudhuri A., Behan P. Fatigue in neurological disorders // Lancet. 2004. Vol. 363. N 9413. P. 978–988.
4. Fatigue as a window to the brain. Cambridge, MA, US: MIT Press, 2005. P. xx, 336xx, 336 p.
5. Bryant D., Chiaravalloti N., DeLuca J. Objective Measurement of Cognitive Fatigue in Multiple Sclerosis // Rehabilitation Psychology. US: Educational Publishing Foundation, 2004. Vol. 49. N 2. P. 114–122.
6. Roelcke U. Reduced glucose metabolism in the frontal cortex and basal ganglia of multiple sclerosis patients with fatigue: a 18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography study // Neurology. 1997. Vol. 48. N 6. P. 1566–1571.
7. Schwid S. Cognitive fatigue during a test requiring sustained attention: a pilot study // Mult. Scler. 2003. Vol. 9. N 5. P. 503–508.
8. Bakshi R. Fatigue in multiple sclerosis and its relationship to depression and neurologic disability // Mult. Scler. 2000. Vol. 6. N 3. P. 181–185.
9. Gold S., Irwin M. Depression and immunity: inflammation and depressive symptoms in multiple sclerosis // Neurol Clin. 2006. Vol. 24. N 3. P. 507–519.
10. Skerrett T., Moss-Morris R. Fatigue and social impairment in multiple sclerosis: the role of patients' cognitive and behavioral responses to their symptoms // J Psychosom Res. 2006. Vol. 61. N 5. P. 587–593.
11. Barak Y., Achiron A. Cognitive fatigue in multiple sclerosis: findings from a two-wave screening project // J. Neurol. Sci. 2006. Vol. 245. N 1–2. P. 73–76.
12. Pittion-Vouyovitch S. Fatigue in multiple sclerosis is related to disability, depression and quality of life // J. Neurol. Sci. 2006. Vol. 243. N 1–2. P. 39–45.
13. Rasova K. Spiroergometric and spirometric parameters in patients with multiple sclerosis: are there any links between these parameters and fatigue, depression, neurological impairment, disability, handicap and quality of life in multiple sclerosis? // Mult. Scler. 2005. Vol. 11. N 2. P. 213–221.
14. Van der Werf S. Fatigue in multiple sclerosis: interrelations between fatigue complaints, cerebral MRI abnormalities and neurological disability // J. Neurol. Sci. 1998. Vol. 160. N 2. P. 164–170.

15. *Middleton L.* The relationship between perceived and objective cognitive functioning in multiple sclerosis // *Arch Clin Neuropsychol.* 2006. Vol. 21. N 5. P. 487–494.
16. *Li G., Chung W.-Y.* Detection of Driver Drowsiness Using Wavelet Analysis of Heart Rate Variability and a Support Vector Machine Classifier // *Sensors (Basel, Switzerland).* 2013. Vol. 13. P. 16494–16511.
17. *Golz M.* Evaluation of fatigue monitoring technologies // *Somnologie – Schlafforschung und Schlafmedizin.* 2010. Vol. 14. P. 187–199.
18. *Яковлев А. В., Матыцин В. О.* Комплексная диагностика голосовой утомляемости у операторов на основе применения методик машинного обучения и компьютерного зрения // *Профилактическая медицина-2018.* 2018. Т. 3. С. 238–242.
19. *Яковлев А. В., Найденова К. А.* Концепция использования технологии больших данных в современной медицине // *Известия Российской Военно-медицинской академии.* 2018. 1. Т. 37. № 1. P. 17–23.
20. *Кипяткова И. С., Ронжин А. Л., Карпов А. А.* Автоматическая обработка разговорной русской речи: монография. СПб.: ГУАП., 2013. 314 с.
21. *Eyben F.* Recent Developments in openSMILE, the Munich Open-source Multimedia Feature Extractor // *Proceedings of the 21st ACM International Conference on Multimedia.* New York, NY, USA: ACM, 2013. P. 835–838.
22. *Freitag M.* auDeep: Unsupervised Learning of Representations from Audio with Deep Recurrent Neural Networks // *Journal of Machine Learning Research.* 2017. Vol. 18.
23. *Amiriparian S.* Sequence to Sequence Autoencoders for Unsupervised Representation Learning from Audio // *Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2017 Workshop.* 2017. P. 17–21.
24. *Матыцин В. О., Яковлев А. В.* Обобщенный дизайн исследования аудиовизуальных и психофизиологических паттернов, характеризующих голосовое утомление операторов // *Материалы научно-практической конференции, посвященной 60-летию кафедры авиационной и космической медицины Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова / Под ред. Б. Н. Котива.* СПб., 2018. С. 191–195.
25. *Яковлев А. В.* Автоматизированная система сбора и обработки данных для машинного обучения при оценке функционального состояния специалистов // *Машинное обучение в исследованиях медико-биологических и социально-экономических данных: Сб. научных трудов / Под ред. К. А. Найденовой, К. В. Швецова, А. В. Яковлева, В. А. Пархоменко.* СПб., 2020. С. 204–235.

УДК 004.93

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-54-56

**А. В. Яковлев\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ ТЕСТОВЫМИ ОБРАЗАМИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА

*Состояние организма человека может быть описано значительным числом параметров. Специалист исследует как непосредственно значения этих параметров, так и их профиль. Профиль или тестовый образ – это строго определенное расположение значений этих параметров. Такой тестовый образ обладает собственной диагностической ценностью. В статье предложены алгоритмы для оценки расстояния между двумя тестовыми образами. Оба алгоритма преобразуют тестовый образ в метрическое представление.*

**Ключевые слова:** состояние организма человека, тестовый образ, алгоритм, метрическое представление

**A. V. Yakovlev\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## APPLICATION OF ALGORITHMS FOR ESTIMATING DISTANCES BETWEEN TEST PATTERNS IN SOLVING PROBLEMS OF RECOGNIZING A PERSON'S STATE

*The state of the human body can be described by a significant number of parameters. The specialist examines both the direct values of these parameters and their profile. A profile or test pattern is a well-defined location for the values of these parameters. This test pattern has its own diagnostic value. The article proposes algorithms for estimating the distance between two test patterns. Both algorithms convert the test pattern to metric representation.*

**Keywords:** state of the human body, test pattern, transformation, algorithm, metric representation.

При решении задач распознавания объектов, имеющих сложную структуру, часто возникает ситуация, когда часть признаков, описывающих распознаваемый объект, представлена в виде тестовых образов. Под тестовым образом понимается квантифицированное представление структуры признака объекта, в котором важно положение примитивов относительно друг друга.

Особенно актуальна эта проблема при распознавании состояния организма человека, когда существенное значение имеют не только значения анализируемых признаков, но и их взаимное расположение, так называемый профиль. Примерами таких профилей могут быть психологические профили психодиагностических тестов [1], результаты физиологических исследований, описания речевых сообщений и т. д.

Для использования тестовых образов (профилей) в качестве исходных данных для большинства алгоритмов классификации необходимо осуществить их перевод в метрическое пред-

ставление [2]. С этой целью предлагается использовать два алгоритма преобразований  $D_c^1$  и  $D_c^2$ .

Алгоритм преобразования  $D_c^1$  состоит из выполнения следующих шагов:

**Шаг 1.** Получение исходных данных: тестовых образов  $\langle X \rangle$  и  $\langle Y \rangle$ .

**Шаг 2.** Определение минимального числа элементов  $n = \min\{T, F\}$ .

**Шаг 3.** Вычисление промежуточных сумм для элементов исходных тестовых образов  $\langle X \rangle$  и  $\langle Y \rangle$ :

$$S_i = \sum_{j=i+1}^5 (\Delta_{i-1, j-1}^X \cdot \Delta_{i-1, j-1}^Y), \quad i = \overline{1, (n-1)} \quad (1)$$

**Шаг 4.** Вычисление итоговой суммы для элементов исходных тестовых образов  $\langle X \rangle$  и  $\langle Y \rangle$ :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} S_i; \quad (2)$$

Шаг 5. Вычисление ненормированного расстояния  $R1$ :

$$R1 = 1 - \frac{2}{n(n-1)} S; \quad (3)$$

Шаг 6. Вычисление нормированного расстояния  $R$ :

$$R = D_c^1(X, Y) = \frac{R1}{2}. \quad (4)$$

На рис. 1 приведен пример применения преобразования  $D_c^1$  для тестовых образов  $\langle X' \rangle$ ,  $\langle Y' \rangle$ . В данном случае тестовыми образами  $\langle X' \rangle$ ,  $\langle Y' \rangle$  являются данные психофизиологического исследования испытуемого, находящегося в состоянии покоя и в состоянии утомле-

ния. Всего 101 связанный показатель, который был получен при использовании специализированного стенда [3]. Произведено предварительное нормирование значений этих показателей в диапазоне от 0 до 5. Значения показателей представлены в табл. 1.

Как показано на рис. 1, расстояние между тестовыми образами  $\langle X' \rangle$ ,  $\langle Y' \rangle$ , полученное при использовании преобразования  $D_c^1$ , равно  $R = D_c^1(\langle X' \rangle, \langle Y' \rangle) = 0.33$ . На врезке показано использование преобразования  $D_c^1$  для фрагмента тестовых образов  $\langle X' \rangle$ ,  $\langle Y' \rangle$ , характеризующих показатели с № 51 по № 55. В этом случае расстояние  $R = D_c^1(\langle X' \rangle, \langle Y' \rangle) = 0.69$ .

В связи с тем, что при использовании преобразования  $D_c^1$  учитывается только последовательность элементов показателей, но не учитывается собственно расстояние между элементами тестовых

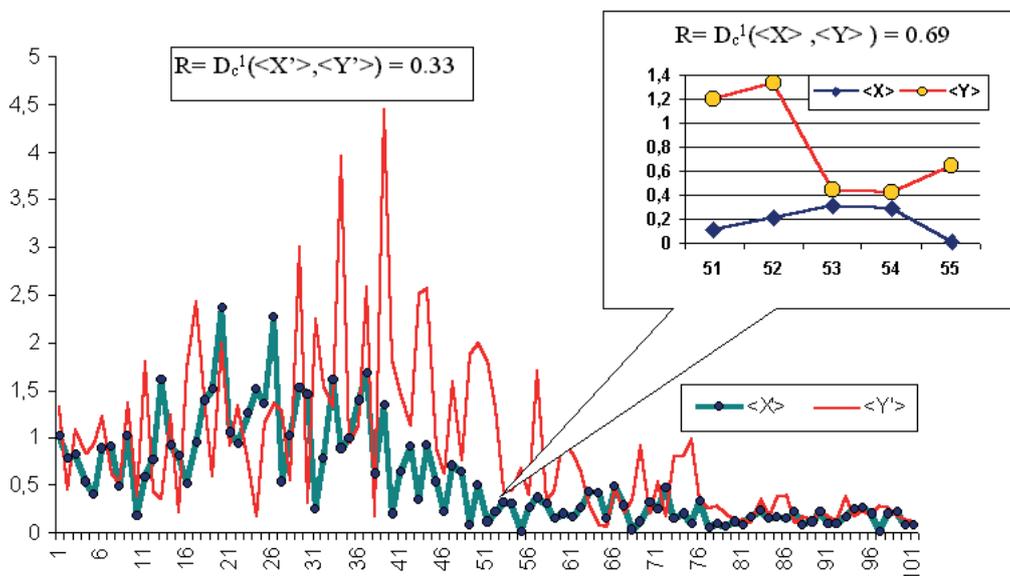


Рис. 1. Применение преобразования  $D^1$  для тестовых образов  $\langle X' \rangle$ ,  $\langle Y' \rangle$

Таблица 1

Исходные данные, представленные в виде тестовых образов

№ исследования	Набор значений показателей, описывающих испытуемого																			
4 ( $\langle X' \rangle$ )	1,02	0,79	0,82	0,54	0,40	0,89	0,91	0,48	1,03	0,18	0,58	0,78	1,60	0,93	0,81	0,53	0,95	1,39	1,52	
	2,36	1,05	0,94	1,25	1,52	1,37	2,27	0,54	1,03	1,52	1,46	0,26	0,78	1,61	0,89	0,99	1,40	1,67	0,62	
	1,34	0,21	0,64	0,90	0,35	0,92	0,54	0,22	0,71	0,63	0,08	0,50	<b>0,12</b>	<b>0,22</b>	<b>0,32</b>	<b>0,29</b>	<b>0,01</b>	0,26	0,37	
	0,30	0,15	0,20	0,17	0,27	0,44	0,41	0,15	0,49	0,29	0,04	0,11	0,32	0,25	0,47	0,15	0,21	0,10	0,34	
	0,06	0,10	0,07	0,12	0,08	0,16	0,23	0,15	0,17	0,14	0,21	0,08	0,11	0,22	0,11	0,11	0,17	0,25	0,27	
	0,20	0,02	0,20	0,21	0,08	0,09														
6 ( $\langle Y' \rangle$ )	1,32	0,46	1,09	0,84	0,94	1,23	0,63	0,52	1,36	0,39	1,80	0,44	0,35	1,25	0,22	1,74	2,44	1,44	0,58	
	1,99	0,92	1,34	0,72	0,18	1,18	1,36	1,28	0,56	3,00	0,32	2,25	1,54	1,33	3,97	0,93	1,13	2,58	0,17	
	4,45	1,81	1,48	1,13	2,51	2,57	0,89	0,62	1,59	0,75	1,88	1,99	<b>1,82</b>	<b>1,33</b>	<b>0,45</b>	<b>0,43</b>	<b>0,66</b>	0,40	1,69	
	0,34	0,46	0,98	0,83	0,64	0,28	0,08	0,07	0,48	0,21	0,36	0,92	0,21	0,54	0,17	0,80	0,81	0,99	0,35	
	0,25	0,29	0,22	0,13	0,15	0,10	0,34	0,17	0,38	0,40	0,11	0,17	0,14	0,24	0,17	0,13	0,39	0,16	0,23	
	0,18	0,29	0,27	0,19	0,15	0,12														

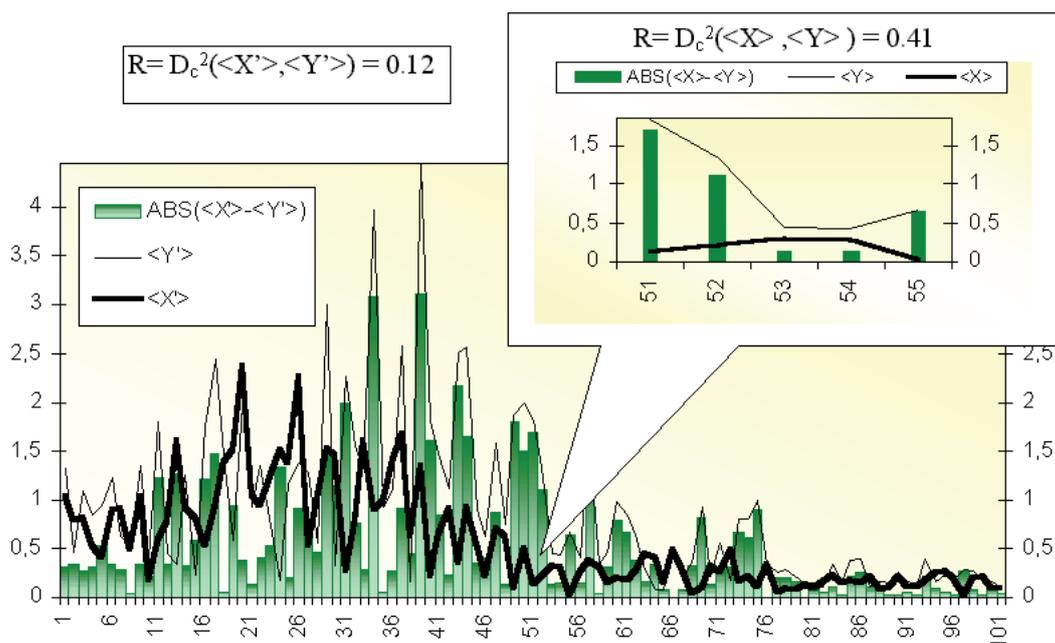


Рис. 2. Применение преобразования  $D^2$  для тестовых образов  $\langle X \rangle$ ,  $\langle Y \rangle$

вых образов  $\langle X \rangle$  и  $\langle Y \rangle$ , ниже приведена модификация преобразования  $D_c^1$  – преобразование  $D_c^2$ , в большей степени учитывающее разницу в абсолютных значениях двух тестовых образов.

Алгоритм преобразования  $D_c^2$  состоит из следующих шагов:

**Шаг 1.** Получение исходных данных: тестовых образов  $\langle X \rangle$  и  $\langle Y \rangle$ .

**Шаг 2.** Определение минимального числа элементов  $n = \min\{T, F\}$ .

**Шаг 3.** Определение значения максимального элемента в тестовых образах  $\langle X \rangle$ ,  $\langle Y \rangle$ ;

$$V_{\max} = \max\{\langle X_i \rangle, \langle Y_i \rangle\}, i = \overline{0, (n-1)}; \quad (5)$$

**Шаг 4.** Вычисление суммы модулей разности для элементов исходных тестовых образов  $\langle X \rangle$  и  $\langle Y \rangle$ :

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} |X_i - Y_i|; \quad (6)$$

**Шаг 5.** Вычисление нормированного расстояния  $R1$ :

$$R = D_c^2(X, Y) = \frac{S}{n \cdot V_{\max}}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведен пример применения преобразования  $D_c^2$  для тестовых образов  $\langle X' \rangle$ ,  $\langle Y' \rangle$  и  $\langle X \rangle$ ,  $\langle Y \rangle$ .

Таким образом, использование разработанных алгоритмов позволяет производить перевод признаков, представленных тестовыми образами, в метрическое представление. Это позволяет учитывать при решении ряда задач распознавания специфику исходных данных, представленных в виде набора последовательных и взаимосвязанных значений.

Оба алгоритма программно реализованы в виде OLE-объектов и могут использоваться в качестве составных частей приложений машинного обучения.

### Библиографический список

1. Червинская К. Р., Щелкова О. Ю. Медицинская психодиагностика и инженерия знаний. СПб.: Ювента, 2002. 624 с.
2. Искусственный интеллект: в 3 кн. Кн. 2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. 304 с.
3. Яковлев А. В. Автоматизированная система сбора и обработки данных для машинного обучения при оценке функционального состояния специалистов // Машинное обучение в исследованиях медико-биологических и социально-экономических данных: Сб. науч. трудов / Под ред. К. А. Найденовой, К. В. Швецова, А. В. Яковлева, В. А. Пархоменко. СПб., 2020. С. 204–235.

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

УДК 004.912

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-57-60

**Е. М. Глушкова\***

студентка

**М. Д. Поляк\***

старший преподаватель

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТНОСТИ СЛОВ И ЛАТЕНТНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ДИРИХЛЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕРЫ СХОЖЕСТИ ТЕКСТОВ**

Сравниваются два подхода к решению задачи определения меры схожести текстов на английском языке. Первый подход основан на использовании частотной меры TF-IDF. Второй – на применении модели латентного размещения Дирихле.

**Ключевые слова:** TF-IDF, LDA.

**E. M. Glushkova\***

Student

**M.D. Polyak\***

Senior Lecturer

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

**MEASURING TEXT SIMILARITY WITH TERM FREQUENCY AND LATENT DIRICHLET ALLOCATION**

Two methods of estimating similarity between English texts are explored in this article. First one is a TF-IDF measure, while the second one is based on latent Dirichlet allocation.

**Keywords:** TF-IDF, LDA.

**Введение**

Среди методов, используемых для реализации алгоритмов сравнения текстов, можно выделить несколько основных групп: методы, определяющие сходство текста путем анализа отдельных строк, с использованием обширных коллекций текстов и на основе семантических сетей.

Методы, основанные на анализе строк, также можно разделить на две подгруппы: оперирующие композицией символов (*character-based*) или расстоянием (сходством или несходством) между двумя текстовыми строками (*term-based*). Методы на основе семантических сетей также делятся на подгруппы, где семантическое сходство – это отношение понятий, связанных на основании их подобия, а семантическая связанность – более общее явление, не связанное конкретно с формой понятий [1].

В данной работе будут рассмотрены два метода: статистический, на основе меры TF-IDF, один

из самых распространенных представителей группы строковых методов (далее – метод TF-IDF), и метод латентного размещения Дирихле, который, по сути, является частным случаем латентного семантического анализа [1], [2] и относящийся в свою очередь к методам, использующим обширные коллекции текстов (далее – метод LDA) [3], [4].

**Статистический метод**

Метод TF-IDF основан на одноименной мере, в рамках которой вычисляется оценка значимости каждого слова, содержащегося в тексте [5]. Значение меры вычисляется как произведение двух множителей: частоты, с которой слово встречается в анализируемом документе (т. н. *term frequency*, TF) и обратной частоты документа в коллекции (т. н. *inverse document frequency*, IDF). С помощью второго множителя занижается вес распространенных слов (вво-

Таблица 3

Результаты сравнения текстов с использованием меры TF-IDF, уточненные с помощью библиотек «стоп-слов» и нормализации

	Текст 1	Текст 2	Текст 3
Текст 1	1	0.585	0.035
Текст 2	0.585	1	0.026
Текст 3	0.035	0.026	1

дных слов, предлогов, местоимений и т. д.), которые на тематическое сходство и различие текстов, очевидно, не влияют. Например, вес слова, встречающегося во всех документах коллекции, будет нулевым.

Важно учитывать объем коллекции текстов, используемой при расчете значения меры, поскольку чем он больше, тем меньше вероятность того, что на расчет повлияют случайные совпадения. Таким образом, наибольший вес получают слова, часто используемые в пределах конкретного документа и редко употребляемые в других документах из коллекции.

Для исследования алгоритма определения меры схожести текстов, основанного на мере TF-IDF, использовались три текста, два из которых являются статьями на одну тему из разных новостных источников («Israeli election: Netanyahu and Gantz both claim victory» [6] и «Benjamin Netanyahu's re-election plans in limbo as Israeli election too close to call» [7]), а третий – статьей на другую тему («Coca-Cola reveals how much plastic it uses» [8]). В табл. 1 приведены значения коэффициента схожести текстов при их попарном сравнении.

Единичные коэффициенты в таблице указывают на тождество документа самому себе, остальные результаты симметричны относительно главной диагонали, поскольку определение степени сходства между парой текстов с помощью меры TF-IDF является коммутативной операцией.

Для повышения точности алгоритма были использованы библиотеки так называемые стоп-слов, к которым относятся слова, не несущие

Таблица 1

Результаты сравнения текстов с использованием меры TF-IDF

	Текст 1	Текст 2	Текст 3
Текст 1	1	0.806	0.369
Текст 2	0.806	1	0.334
Текст 3	0.369	0.334	1

Таблица 2

Результаты сравнения текстов с использованием меры TF-IDF, уточненные с помощью библиотек «стоп-слов»

	Текст 1	Текст 2	Текст 3
Текст 1	1	0.554	0.020
Текст 2	0.554	1	0.022
Текст 3	0.020	0.022	1

смысловой и тематической нагрузки. Примеры таких слов в английском языке: ‘somewhere’, ‘and’, ‘mine’, ‘too’, ‘also’ и подобные. Результаты расчета меры схожести предобработанных текстов, из которых были удалены «стоп-слова», приведены в табл. 2.

Следует обратить внимание, что после удаления «стоп-слов» информативность вычисленного коэффициента схожести текстов существенно повысилась. Его значения для схожих и различающихся текстов теперь отличаются на порядок.

Для дальнейшего повышения точности результатов было осуществлено приведение слов в нормальную форму с применением стемминга. Такая обработка текстов позволяет определять однокоренные, то есть близкие по смыслу слова как сходные – при том, что в написании они могут существенно различаться. Для этого использовался распространенный стеммер Портера [9], который не использует готовых баз нормальных форм слов, а лишь отсекает окончания и суффиксы, применяя ряд правил, основанных на особенностях языка. Такой подход повышает скорость обработки текста за счет незначительного снижения точности стемминга. В табл. 3 приведены значения меры схожести предобработанных текстов с учетом нормализации слов.

По сравнению с данными в табл. 2 все значения незначительно выросли – за счет того, что слова, отличающиеся друг от друга лишь окончаниями и суффиксами, были приведены к одной основе и посчитаны как одинаковые.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод: используя меру TF-IDF, можно однозначно сказать, являются ли представленные тексты сходными или же имеют разную тематическую направленность.

### Латентное размещение Дирихле

Для применения метода LDA [9] к коллекции текстов необходимо преобразовать ее в терм-документную матрицу (*term-document matrix*),

имеющую размеры  $N \times W$ , где  $N$  – количество документов в коллекции;  $W$  – количество уникальных слов, содержащихся в текстах. Для данной матрицы и заданного числа тем  $T$  создается два распределения:  $N \times T$  – распределение тем по текстам;  $T \times W$  – распределение слов по темам. В этом случае под «темой» понимается некоторая абстрактная сущность, которая редко совпадает с встречающимися в коллекции темами текстов.

Результаты метода LDA зависят как от коллекции текстов, так и от числа тем, поэтому имея коллекцию из обозначенных ранее текстов, остается определиться с количеством тем. Для выбора оптимального числа тем была использована коллекция, состоящая из двух текстов на схожую тему, что позволило изучить влияние параметра метода LDA (количества тем) на коэффициент схожести текстов.

Для исследования была использована подборка из количества тем от 10 до 100. Для каждого значения количества тем было создано такое количество моделей LDA, чтобы можно было примерно определить среднее значение коэффициента схожести двух текстов. Полученные данные, учитывая случайное распределение тем при создании модели LDA, показаны на рис. 1.

Для изучения влияния числа тем были использованы две коллекции (выборки), состоящие из нескольких текстов каждая. Первая коллекция включала в себя тексты со схожей тематикой, а вторая – с разной. Такой подход позволяет оценить возможность построения решающего правила на основе величины меры схожести текстов, посчитанной с помощью метода LDA, для попарной классификации тек-

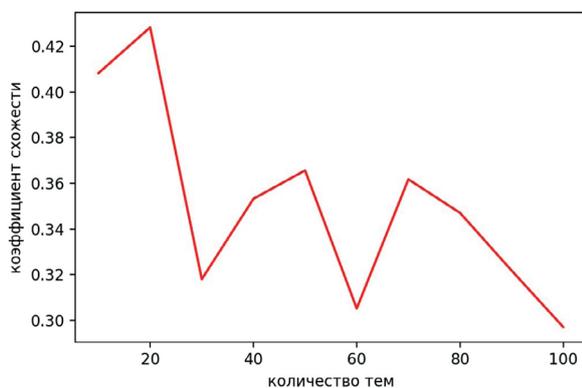


Рис. 1. Изменение коэффициента схожести текстов, посчитанного по методу LDA, при различных значениях параметра алгоритма латентного размещения Дирихле «количество тем»

стов как имеющих общую или же разную тематическую направленность. Для каждого количества тем было найдено среднее квадратическое отклонение коэффициента схожести. На рис. 2 показано среднее значение коэффициента схожести текстов и его доверительный интервал в зависимости от значения параметра метода LDA «количество тем» для схожих текстов (вверху рисунка) и для различающихся пар текстов (внизу).

Нетрудно заметить, что 95 % – доверительные интервалы для математического ожидания значений коэффициентов схожести одинаковых текстов и различающихся по тематике текстов не пересекаются, что позволяет однозначно определить отношения между текстами. Из полученных результатов следует, что изменение параметра метода LDA (число «тем») оказывает незначительное влияние на коэффициент схожести текстов. Также стоит учитывать, что увеличение числа «тем» в методе LDA увеличивает и вычислительную сложность алгоритма.

В табл. 4 приведены результаты расчета значения меры схожести текстов для той же выборки, что использовалась при работе с методом TF-IDF. Для корректного сопоставления результатов работы двух методов перед применением метода LDA была осуществлена предобработка текстов, идентичная той, что проводилась и для метода TF-IDF.

Таким образом, используя метод LDA можно однозначно отличить схожие тексты от различающихся. Судя по всему, метод LDA позволяет более точно определить схожесть текстов, так как абсолютное значение коэффициента в табл. 4 для схожих текстов оказалось ближе к 1,

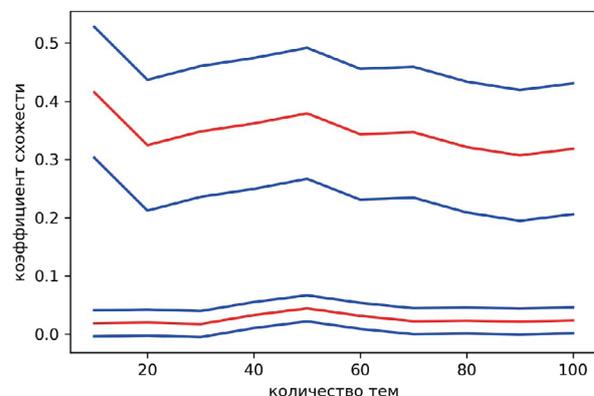


Рис. 2. Результаты вычислений коэффициента схожести с использованием метода LDA для пар текстов на одну и ту же (вверху) и разную (внизу) тематику. Красным цветом показано среднее значение, синим – 95 % доверительный интервал

Таблица 4

**Результаты сравнения текстов с использованием метода LDA, уточненные с помощью библиотек «стоп-слов» и нормализации**

	Текст 1	Текст 2	Текст 3
Текст 1	1	0.701	0.021
Текст 2	0.701	1	0
Текст 3	0.021	0	1

чем аналогичные значения, полученные методом TF-IDF в табл. 3. Однако данное утверждение требует дополнительной проверки на выборке большего объема. К недостаткам метода LDA следует отнести его существенно большую вычислительную сложность по сравнению с расчетом простой меры TF-IDF.

**Библиографический список**

1. *Gomaa W., Fahmy A.* A Survey of Text Similarity Approaches // *International Journal of Computer Applications* (0975–8887). 2013. Vol. 68 N 13.  
 2. *Пархоменко П. А., Григорьев А. А, Астраханцев Н. А.* Обзор и экспериментальное сравнение методов кластеризации текстов // *Труды ИСП РАН*. Т. 29. Вып. 2. 2017. С. 161–200.

3. *Breitinger C., Gipp B., Langer S.* Research-paper recommender systems: a literature survey // *International Journal on Digital Libraries*. 2015. N 17 (4). P. 305–338.

4. *Rus V., Niraula N., Banjade R.* Similarity measures based on latent dirichlet allocation. // *International Conference on Intelligent Text Processing and Computational Linguistics*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. P. 459–470.

5. *Jones K.* A Statistical Interpretation of Term Specificity and Its Application in Retrieval // *Journal of Documentation*. 1972. N 28. P. 11–21.

6. BBC News. Israeli election: Netanyahu and Gantz both claim victory. URL: <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-47874948> (дата обращения: 27.07.2020).

7. CNN World. Benjamin Netanyahu’s re-election plans in limbo as Israeli election too close to call. URL: <https://edition.cnn.com/2019/04/09/middleeast/benjamin-netanyahu-israel-election-exit-poll-intl/index.html> (дата обращения: 27.07.2020).

8. BBC News. Coca-Cola reveals how much plastic it uses. URL: <https://www.bbc.com/news/newsbeat-47569233> (дата обращения: 27.07.2020).

9. *Porter M.* An algorithm for suffix stripping // *Program*. 1980. N 14 (3). P. 130–137.

10. *Blei D., Jordan A.* Latent Dirichlet allocation // *Journal of Machine Learning Research*. 2003. N 3. P. 993–1022.

УДК 004.2

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-61-66

**А. А. Попов\***

кандидат технических наук

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ БАЗОВОГО ЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ПЛИС КРУПНОЗЕРНИСТОЙ АРХИТЕКТУРЫ

На основе методики многоуровневого имитационного моделирования МКМД-бит-поточковых субпроцессорных трактов [1] оценивается вероятность сохранения работоспособности базового логического элемента ПЛИС крупнозернистой архитектуры при наличии в нем отказов.

**Ключевые слова:** ПЛИС, карта отказов, логический элемент.

**А. А. Попов\***

PhD Sc. Tech.

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## EVALUATION OF THE SURVIVABILITY OF A TYPICAL LOGICAL CELL OF A COARSE-GRAINED ARCHITECTURE FPGA

On the basis of the technique of multilevel simulation of MIMD-bit-stream subprocessor paths [1], the probability of survival of a logical element of a FPGA of a coarse-grained architecture is estimated in the presence of refusals.

**Keywords:** FPGA, fault list, logic cell.

### Введение

Под живучестью понимается способность некоторого объекта или системы сохранять заданные правила функционирования при наличии отказов в составляющих объект или систему частях. В отличие от надежности объекта или системы, которая оценивает вероятность появления отказа, живучесть априори предполагает наличие отказа, то есть при оценке надежности рассмотрение объекта или системы заканчивается после появления отказа, в то время как с позиций живучести отказ является только началом анализа поведения объекта или системы.

Методика многоуровневого имитационного моделирования отказоустойчивых МКМД-бит-поточковых субпроцессорных трактов [1], [2], [3] основана на том, что на каждом уровне иерархии определяется влияние отказов на работоспособность модулей этого уровня, исходя из оценки последствий отказов, полученных на предыдущем уровне анализа. Методика базируется на косвенных методах анализа схем [4], к которым относятся различные виды моделирования, позволяющие воспроизводить поведение схемы или отдельных ее элементов при подаче на схему набора входных воздействий. Моделируя работу схемы, содержащей элементы с отказами, на наборах, составляющих контролирую-

щий тест, можно оценить полноту этого теста с одной стороны или при полном контролирующем тесте – устойчивость этой схемы к возможным отказам – с другой.

Элементарным логическим вентиляем с отказами считается схема, реализующая элементарную конъюнкцию или дизъюнкцию, имеющая несколько входов и только один результирующий выход, а отказом этого вентиля считается ошибка на выходе: «константный ноль», «константная единица», «инверсия выхода», «однотактное хранение единицы» (рис. 1).

Основываясь на такой логической модели проявления физических отказов, созданы программные инструментальные средства [1], что позволяют синтезировать произвольные схемы и логические блоки процессоров и анализировать их поведение при разных картах отказов.

Целью работы является использование программных инструментальных средств цифрового логического моделирования на основе вентилях с отказами (рис. 1) воссоздать логическую схему типового базового логического элемента (БЛЭ) ПЛИС крупнозернистой архитектуры, промоделировать его работу с учетом отказов вентилях и оценить вероятность сохранения работоспособности функций БЛЭ.

Базовые логические элементы (Logic Cell) входят в состав конфигурируемых логических

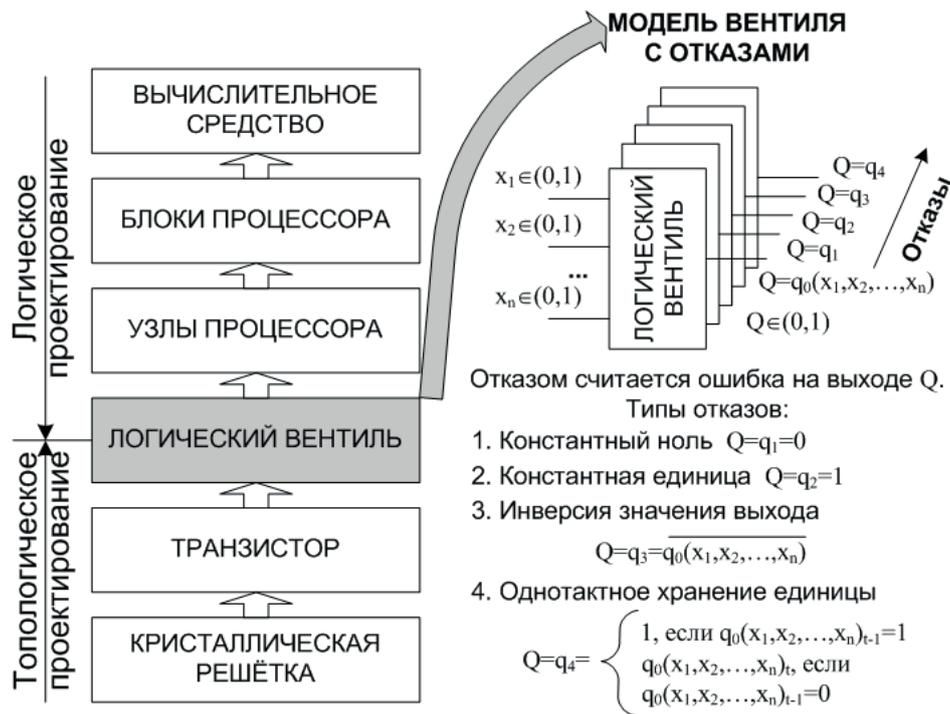


Рис. 1. Уровни моделирования неисправностей

блоков (КЛБ, Logic Array Block(Altera), Configurable Logic Block(Xilinx)) ПЛИС. Сложность структуры БЛЭ определяется производителем и, как правило, включает [5]:

- генератор функций (ГФ), выполненный в виде таблицы перекодировок (LUT-таблица);
- логику цепей ускоренного переноса и каскадирования (carry chain и cascade chain);
- триггер (DFF) с логикой выбора управляющих сигналов.

Для настройки режима работы БЛЭ и матриц межсоединений используются конфигурационные ячейки (КЯ) на основе статической памяти (SRAM). Эти элементы образуют конфигурационную память ПЛИС и могут быть организованы либо в виде параллельного, либо последовательного сдвигового регистра.

В качестве рассматриваемого элемента возьмем БЛЭ Altera cyclone II (рис. 2), поскольку он достаточно прост и фактически без изменений воспроизводится в архитектурах cyclone III / IV и во многих деталях повторяет БЛЭ Xilinx [6], а в старших поколениях его усложняют дополнительными схемами LUT-таблиц, полных сумматоров, триггеров.

Для работы БЛЭ в составе КЛБ ПЛИС используются коммутаторы к системам локальных и глобальных матриц межсоединений сигналов: асинхронного сброса (!ACLR), синхронного сброса (SCLR), тактирования (CLK), входа

разрешения (ENA), входных/выходных сигналов данных (DATA A, B, C, D, CIN / REGOUT, COMBOUT, COUT). Но в схеме на рис. 2 коммутационные элементы не рассмотрены, поскольку анализ полной схемы матрицы межсоединений имеет смысл при анализе КЛБ. Соответственно, также не рассматривается конфигурационная память, настраивающая работу коммутаторов к системам межсоединений и подсистемам подключения питания блоков ПЛИС.

Конфигурационные ячейки как элементы памяти (рис. 3, а) составляют массив памяти SRAM, в схеме которого имеются блоки: дешифратор адреса, мультиплексоры, линии записи/чтения данных. Для моделирования конфигурационной памяти БЛЭ ограничимся представлением конфигурационных ячеек в виде синхронных D-триггеров (рис. 3, б), собранных в параллельный регистр RGlе (рис. 2). Запись программы в такой регистр осуществляется за один цикл удержания высокого уровня на входе ENA. Вариант представления конфигурационной памяти в виде последовательного сдвигового регистра не рассматривается из-за низкой устойчивости к отказам, поскольку любой отказ D-триггера в сдвиговой цепочке приводит к искажению битового потока после него, что полностью исключает возможность настроить БЛЭ в ставшей программно-недоступной после отказа части.

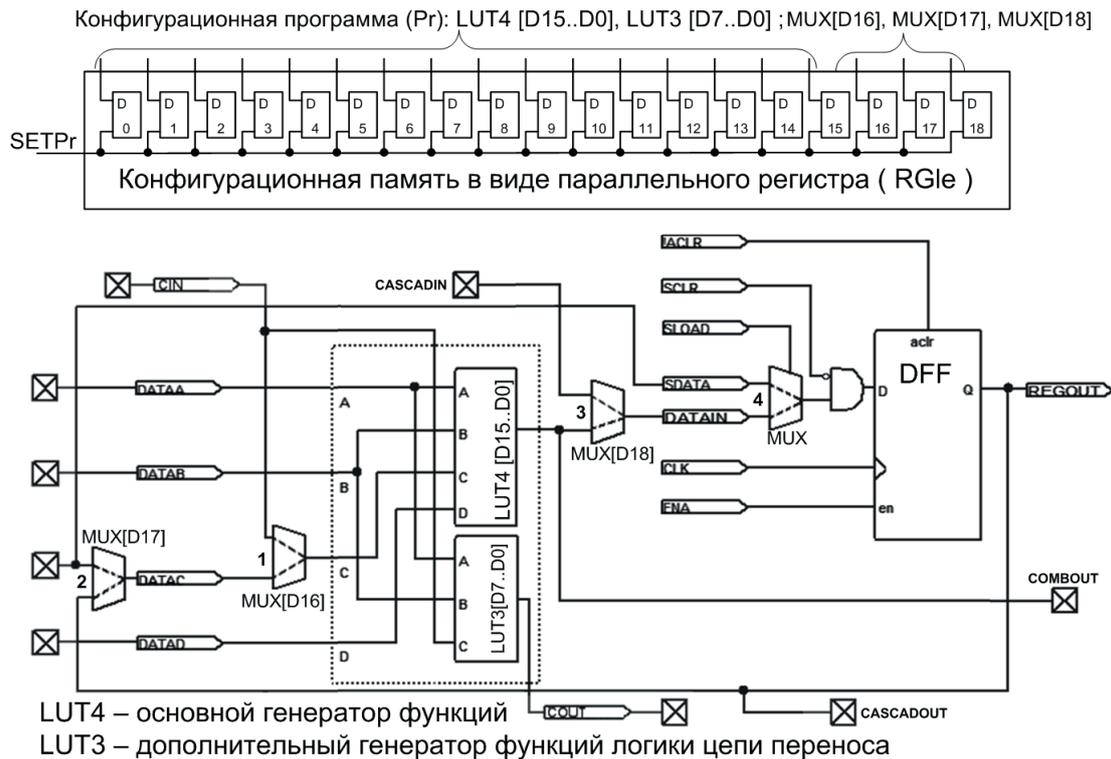


Рис. 2. Типовой БЛЭ

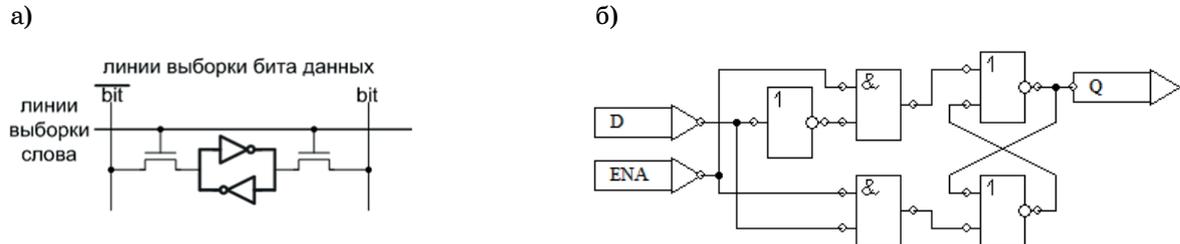


Рис. 3. Конфигурационная ячейка памяти ПЛИС и ее модель: а) КЯ – как элемент памяти SRAM; б) – схема замещения КЯ синхронным D-триггером, собранным из логических вентилей с отказами

Моделирование работы схемы синхронного D-триггера (рис. 3, б) с отказами показывает: в 50 % случаев залипание в ноль, 26 % залипание в единицу и 24 % различных реакций, не соответствующих работе исправного триггера, что частично согласуется с исследованием [7]. Последствия отказов ячеек конфигурационной памяти критичны по отношению к настраиваемым блокам, поэтому проблема повышения надежности и диагноstopригодности конфигурационной памяти [8] является сравнимой по важности с надежностью подсистем тактирования при построении систем на кристалле.

Структурная схема замещения генератора функций БЛЭ для моделирования с отказами представлена на рис. 4, где:

1. LUT4 основной генератор функций, выполненный на мультиплексорах в котором:
  - информационные входы: DATAA, DATAB, DATAD, DATAC или CIN в зависимости от значения управляющего бита D[16] мультиплексора MUX1;
  - 16 конфигурационных битов: управляемых D[15..0];
  - выход COMBOUT.
2. LUT3 генератор функций цепи переноса, выполненный на мультиплексорах в котором:
  - информационные входы: DATAA, DATAB и CIN;
  - 8 конфигурационных битов: управляемых D[7..0];
  - выход COUT.

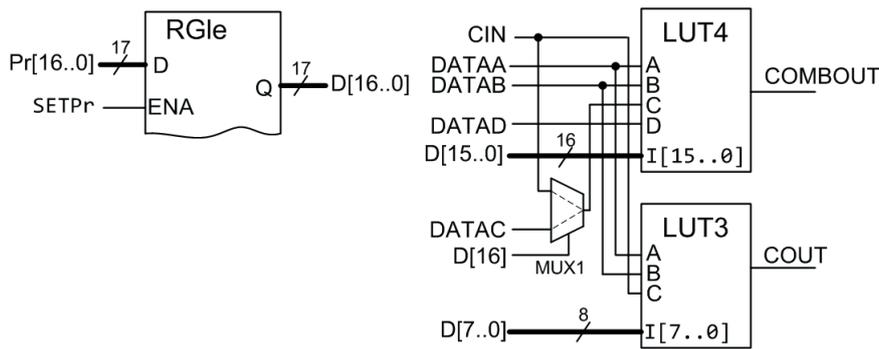


Рис. 4. Структурная схема ГФ БЛЭ

3. RGle часть регистра (17 бит) конфигурационной памяти блоков LUT4, LUT3 и MUX1.

Из данных табл. 1 видно, что по затратам логических вентилях конфигурационная память (RGle) сравнима с затратами LUT-табл. 3 и 4 входов. А значит, при равномерном распределении отказов по вентилям схемы (рис. 4) высока вероятность индифферентных отказов по отношению к исполняемой программе, поскольку в параллельном регистре RGle вероятность константной неисправности D-триггера (рис. 3, б) равна 50 % (конст. 0) и 26 % (конст. 1). Что и подтверждается результатами моделирования (табл. 2), где загружаемая функция представлена выражением включающим:

- контролируемые входы a, b, c, d, cin; обозначения соответствуют DATAA/B/C/D, CIN;
- в фигурных скобках контролируемые выходы cout (COUT), comb(COMBOUT);
- восклицательный знак(!) обозначает инверсию, d(0) нули на входе d, d(1) единицы на входе d, c(Z) неопределенное состояние (шумы) на входе c;
- шестнадцатеричный код конфигурационной программы (Pr[15..0]) LUT-таблиц, а в скобках значение бита мультиплексора MUX1 – Pr[16].

Из табл. 2 (строки 11÷17) видно, что при наличии отказов схема ГФ (рис. 4) чувствительна к состоянию незадействованных в операции входов, случайный шум на которых влияет на спо-

собность правильно реализовать заданную функцию. Этот фактор делает диагностику подобных блоков не удобной, так как необходимо задействовать все входы и выходы при контроле, а доступ к логике цепей ускоренного переноса возможен только косвенно, через вход/выход CIN/COUТ любых соседних БЛЭ. Также наблюдается резкое падение вероятности сохранения работоспособности ГФ при перепрограммировании и реализации нескольких операций (табл. 2, строки 3, 7, 9, 10). То есть во время выполнения закрепленной инструкции ГФ с высокой вероятностью может накапливать индифферентные отказы, как, например, для функции «И» (табл. 2, строка № 5), два отказа только в половине случаев проявляют себя.

Полная схема типового БЛЭ (рис. 2) получена присоединением к основному ГФ двухступенчатого D-триггера с логикой управляющих сигналов, при этом (табл. 3) соотношение затрат логических вентилях на конфигурационную память и остальных блоков сохранилось. Работа схемы двухступенчатого D-триггера с отказами отличается от синхронного снижением вероятностей константных неисправностей:

- при одном отказе, залипание в ноль 28 % случаев, в единицу – 13 %;
- при одновременно двух отказах, залипание в ноль – 37 %, в единицу – 23 %.

Результаты моделирования схемы БЛЭ (рис. 2) с отказами показаны в табл. 4, где к обозначениям принятым в табл. 2 добавлены: cscd(CASCADIN), aclr(ACLRL), sclr(SCLR), sld(SLOAD), clk(CLK), en(ENA), rgout(REGOUT), конфигурационная программа Pr[15..0] дополнена тремя битами в скобках MUX1 – Pr[16], MUX2 – Pr[17], MUX3 – Pr[18]. Выход CASCADOUT не обозначен, поскольку он равен rgout и не указанные в таблице входы по умолчанию подключены к нулю.

Таблица 1

Распределение затрат в ГФ БЛЭ

Наименование блоков	RGle (17 бит)	LUT4	LUT3	MUX1	Всего
Количество вентилях	85	60	28	4	177
Относительно всего ГФ	48 %	34 %	16 %	2 %	100 %

Таблица 2

**Вероятность сохранения работоспособности функций в ГФ БЛЭ**

№ п/п	Загружаемая функция	Количество отказавших вентиляей	
		1	2
1	$c(Z), d(1), a+b+!cin \Rightarrow \{comb; cout\}$ 0x698E(0)	0,532	0,286
2	$c(Z), d(1), a+b+cin \Rightarrow \{comb; !cout\}$ 0x9617(0)	0,508	0,26
3	Поочередная реализация функций: №1, №2	0,335	0,112
4	$a(Z), c(Z), b+d+!cin \Rightarrow \{comb\}$ 0x3CC3(0)	0,603	0,368
5	$cin(Z), a \wedge b \wedge c \wedge d \Rightarrow \{comb\}$ 0x8000(1)	0,7	0,49
6	$cin(Z), a \vee b \vee c \vee d \Rightarrow \{comb\}$ 0xFFFE(1)	0,53	0,292
7	Поочередная реализация функций: №5, №6 при контроле {comb}	0,395	0,158
8	$cin(Z), a \oplus b \oplus c \oplus d \Rightarrow \{comb\}$ 0x6996(1)	0,493	0,244
9	Поочередная реализация функций: №5, №6, №8 при контроле {comb}	0,299	0,09
10	Поочередная реализация функций: №5, №6, №8 при контроле {comb; cout}	0,157	0,025
11	$b(Z), c(Z), cin(Z), a \oplus d \Rightarrow \{comb\}$ 0x55AA(0)	0,542	0,302
12	$0 \Rightarrow \{comb; cout\}$ при $a, b, c, d, cin = 0$ 0x0000(0)	0,934	0,873
13	$0 \Rightarrow \{comb; cout\}$ при $a, b, c, d, cin = 1$ 0x0000(0)	0,877	0,77
14	$0 \Rightarrow \{comb; cout\}$ при $a, b, c, d, cin = Z$ 0x0000(0)	0,7	0,498
15	$a \Rightarrow \{comb\}$ при $b, c, d, cin = 0$ 0xAAAA(0)	0,912	0,833
16	$d \Rightarrow \{comb\}$ при $a, b, c, cin = 0$ 0xFF00(0)	0,912	0,835
17	$d \Rightarrow \{comb\}$ при $a, b, c, cin = Z$ 0xFF00(0)	0,667	0,458

Таблица 3

**Распределение затрат в БЛЭ**

Наименование блоков	RGlе (19 бит)	LUT4	LUT3	4xMUX	DFP	Всего
Количество вентиляей	95	60	28	16	12	211
Относительно всего генератора функций	45 %	28 %	13 %	8 %	6 %	100 %

Таблица 4

**Вероятность сохранения работоспособности функций в БЛЭ**

№ п/п	Загружаемая функция	Количество отказавших вентиляей	
		1	2
1	Триггер JKFF: $J \rightarrow a, K \rightarrow d, aclr, sclr, en, clk \Rightarrow \{rgout\}$ 0x0AFA (1,1,1)	0,679	0,463
2	Триггер TFF: $T \rightarrow d, aclr, sclr, en, clk \Rightarrow \{rgout\}$ 0x0FF0 (1,1,1)	0,712	0,509
3	Триггер RS (по реализации идентичен JKFF): $S \rightarrow b, R \rightarrow d, aclr, sclr, en, clk \Rightarrow \{rgout\}$ 0x0CFC (1,1,1)	0,654	0,43
4	Запоминание единицей St1: $x1 \rightarrow a, x2 \rightarrow d, aclr(1), en(1), clk \Rightarrow \{rgout\}$ 0xAAF0 (1,1,1) / при зашумлении $cscd, cin, b, c = Z$	0,655 / 0,54	0,431 / 0,296
5	Сложение с сохранением результата в регистре: $d(1), aclr(1), en(1), clk, a+b+cin \Rightarrow \{rgout; comb; !cout\}$ 0x9617(0,0,1)	0,5	0,251
6	«И» с сохранением результата в регистре: $aclr(1), en(1), clk, a \wedge b \wedge c \wedge d \Rightarrow \{rgout\}$ 0x8000(1,0,1)	0,65	0,427
7	«ИЛИ» с сохранением результата в регистре: $aclr(1), en(1), clk, a \vee b \vee c \vee d \Rightarrow \{rgout\}$ 0xFFFE(1,0,1)	0,5	0,26
8	«искл.ИЛИ» с сохранением результата в регистре: $aclr(1), en(1), clk, a \oplus b \oplus c \oplus d \Rightarrow \{rgout\}$ 0x6996(1,0,1)	0,481	0,233
9	Поочередная реализация функций: №7, №8 при контроле {rgout}	0,383	0,147
10	Поочередная реализация функций: №6, №7, №8 при контроле {rgout}	0,291	0,085
11	$clk, 0 \Rightarrow \{rgout; comb; cout\}$ 0x0000(0,0,0)	0,937	0,879
12	Транзит DATAC с сохранением в регистре: $aclr(1), en(1), clk, c \Rightarrow \{rgout\}$ через ГФ 0xF0F0(1,0,1) / в обход ГФ 0x0000(0,0,1), $sld(1)$	0,793 / 0,938	0,63 / 0,88
13	Транзит cscd с сохранением в регистре: $aclr(1), en(1), clk, cscd \Rightarrow \{rgout\}$ 0x0000(0,0,0)	0,916	0,839

Значения вероятностей сохранения работоспособности функций в БЛЭ (табл. 4) частично согласуются со значениями ГФ (табл. 2), поскольку при равномерном распределении отказов вероятность попадания отказа в вентили, принадлежащие регистру конфигурационной памяти, находится на уровне 0,45 (табл. 3), несмотря на то, что вероятности попадания отказов в вентили схем LUT4 и LUT3 снизились. Как видно важный вклад в повышении живучести БЛЭ вносит живучесть конфигурационной памяти.

### Выводы

Отказ одного вентиля во время исполнения закрепленной за БЛЭ инструкции, в которой максимально возможно задействован ресурс этого элемента, только в половине случаев проявляет себя.

При выполнении операции, частично использующей ресурс БЛЭ, высока вероятность индифферентных отказов, которые никак не будут проявлять себя до момента перепрограммирования БЛЭ на другую операцию.

### Библиографический список

1. Алакоз Г. М., Котов А. В., Курак М. В. Вычислительные наноструктуры: в 2 ч. Ч. 2. Программно-аппаратные платформы. М.: Интуит-бином, 2010. 399 с.

2. Алакоз Г. М., Попов А. А. MIMD-бит-поточные технологии для отказоустойчивых сверхпараллельных субпроцессорных трактов бортовых вычислительных систем // *Авиакосмическое приборостроение*. 2007. № 10. С. 19–30.

3. Попов А. А. Специфика построения моделей сверхпараллельных программируемых бит-матричных структур при наличии отказов // *Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского*. М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2003. С. 21–23.

4. Майоров С. А., Новиков Г. И., Немолочнов О. Ф. Проектирование цифровых вычислительных машин. / Под ред. С. А. Майорова. М.: Высшая школа, 1972. 344 с.

5. Цыбин С. А. Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри // *Компоненты и технологии*. 2010. № 11. С. 56–62.

6. Logic block. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Logic\\_block](https://en.wikipedia.org/wiki/Logic_block) (дата обращения: 04.11.2020).

7. Dekker R. A Realistic Fault Model and Test Algorithms for Static Random Access Memories. *IEEE Trans. on Computers* 9(6), 567–572 (1990).

8. Pavlov M. Weak cell detection in deep-submicron SRAMs: A programmable detection technique. *IEEE Journal of Solid State Circuits (JSSC)*, 41:2334–2343, October 2006.

УДК 004.932

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-67-72

**С. А. Рогачев\***

старший преподаватель

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ГЕНЕРАЦИЯ ШУМОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Рассмотрены области возможного применения алгоритмов генерации шумов на изображении, некоторые виды шумов на цифровых изображениях. Приведены алгоритмы генерации шумов, результаты моделирования генерации различных шумов на тестовом изображении.

**Ключевые слова:** шум, цифровой шум, аддитивный шум, импульсный шум.

**S. A. Rogachev\***

Senior Lecturer

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## GENERATING NOISE IN THE IMAGE

The areas of possible application of algorithms for generating noise in the image are considered. Some types of noise in digital images are considered. Noise generation algorithms are presented. The results of modeling the generation of various noises on the test image are presented.

**Keywords:** noise, digital noise, additive noise, impulse noise.

Шум на изображениях – это случайное изменение яркости или цветовой информации изображений, как правило, аспект электронного шума [1].

Первоначальным значением термина «шум» было «нежелательный сигнал». Например, в комнате, где находятся несколько десятков человек, сложнее услышать собеседника, чем в комнате, где находятся только два человека.

Шум на изображении может варьироваться от практически незаметных пятен до почти полного покрытия изображения. На зашумленном изображении сложнее увидеть рисунок, чем на изображении без шумов. Аудиошум – это случайные числа, выстроенные в линию. Графический шум – это случайные числа, расположенные в сетке. При желании можно создавать шум в 3D, 4D, и так далее.

На практике, в большинстве случаев стоит задача избавления от шума. Как следствие, существует большое количество подходов к избавлению данных от шумов. Логично предположить, что «тренировать» алгоритмы фильтрации лучше всего на данных, в которые искусственным образом был добавлен шум, так как при таком подходе в наличии имеются «чистые» данные (без добавленного шума), с которыми легко можно сопоставить результат фильтрации.

Еще одним применением алгоритмов генерации шумов может быть создание какого-либо объекта, который должен быть похожий на есте-

ственный. Многие естественные системы выглядят зашумленными, поэтому при его создании потребуется добавить шум [2].

Область, где часто требуется генерация шумов, – это индустрия компьютерных игр. Часто при создании процедурной текстуры используются алгоритмы генерации шумов (например, шум Перлина). Часто генерация шумов используется для создания эффектов тумана, дыма и т. д. [3].

В последнее время большое распространение получили искусственные нейронные сети. Для обучения и использования нейронных сетей нужны большие объемы данных, которые будут делиться на обучающую и тестовую выборки. В условиях, когда объем данных небольшой, его можно искусственно увеличить путем добавления в обучающую выборку зашумленных данных (которые созданы на основе уже имеющихся) [4], [5].

Существует большое количество алгоритмов и методов генерации шумов. В данной работе будут рассмотрены следующие виды шумов:

- 1) белый гауссовский шум;
- 2) белый шум с равномерным распределением;
- 3) простой аддитивный шум;
- 4) импульсный шум;
- 5) цифровой шум.

На рис. 1 приведено исходное тестовое изображение размером 339×339 пикселей.

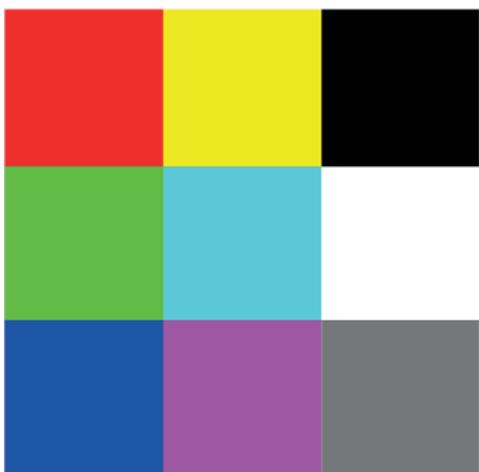


Рис. 1. Исходное тестовое изображение

### Белый гауссовский шум

Гауссовский шум – это статистический шум, имеющий функцию плотности вероятности равную функции распределения по Гауссу (нормального распределения). Иными словами, значения, которые может принимать данный шум, имеют гауссовское распределение:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $x$  – интенсивность цвета пикселя;  $m$  – среднее значение (математическое ожидание) вели-

чины  $x$ ;  $\sigma$  – стандартное (среднеквадратическое) отклонение [5].

Белый гауссовский шум – это частный случай гауссовского шума. Значения такого шума являются независимыми и одинаково распределенными случайными величинами.

В работе был использован алгоритм наложения аддитивного белого гауссовского шума на изображение. Под аддитивностью стоит понимать, что шум суммируется с полезным сигналом и статистически не зависит от самого сигнала.

К случайно выбранным пикселям изображения будет прибавлен коэффициент  $k$ , выбранный по нормально распределенной случайной величине с математическим ожиданием  $m = 0$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ , заданным пользователем.

Так как случайная величина имеет нормальное распределение, для нее справедливо правило трех сигм: вероятность того, что случайная величина отклонится от своего математического ожидания более чем на  $3\sigma$ , практически равна нулю (рис. 2) [6].

Вероятность попадания случайной величины в интервал  $[-\sigma; +\sigma]$  больше, чем в интервалы  $[-3\sigma; -2\sigma]$  и  $[+2\sigma; +3\sigma]$ , поэтому, если среднеквадратическое отклонение будет равно 85 (значение получено делением диапазона допустимых значений 255 на 3), то на изображении могут наблюдаться резкие выделяющиеся темные и светлые пятна, в то время как цвет большей части пикселей подвергнется изменению на меньшее значение.

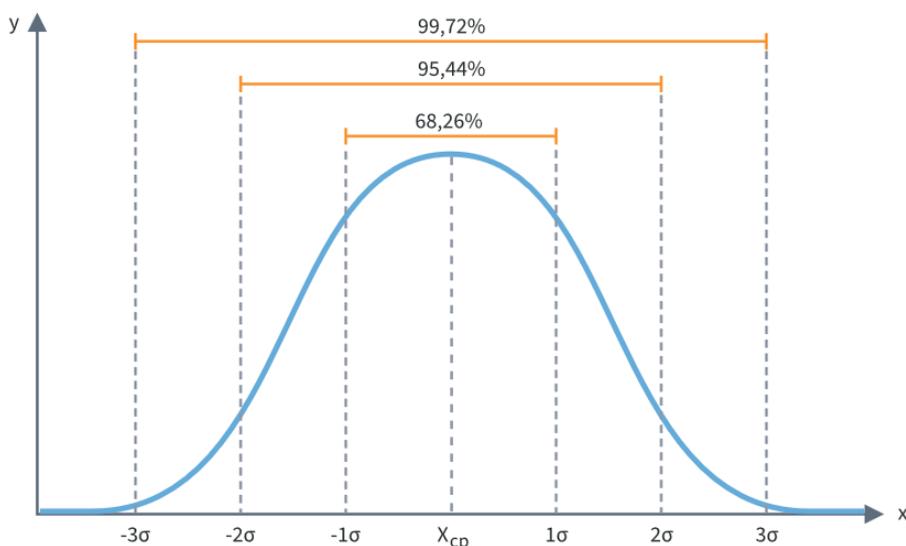


Рис. 2. График плотности вероятности нормального распределения

Генерация случайных нормально распределенных чисел с заданной дисперсией и математическим ожиданием равным нулю будет осуществляться с помощью метода полярных координат [7].

Полученное в результате выполнения алгоритма значение прибавляется к каждому компоненту цвета текущего пикселя. В результате пиксель меняет свой цвет. На рис. 3 приведен результат генерации аддитивного гауссовского белого шума с параметрами среднеквадратичного отклонения равного 85 и процентом задействованных пикселей равным 50 %.

### Белый шум с равномерным распределением

Белый шум – стационарный шум, спектральные составляющие которого распределены по всему диапазону задействованных частот [8]. В данной работе был использован алгоритм наложения аддитивного белого шума на изображение.

Алгоритм генерации данного шума работает следующим образом. К случайно выбранным пикселям изображения будет прибавлен коэффициент  $k$ , выбранный по равномерно распределенной случайной величине  $k \in R(a, b)$ , где  $a$  и

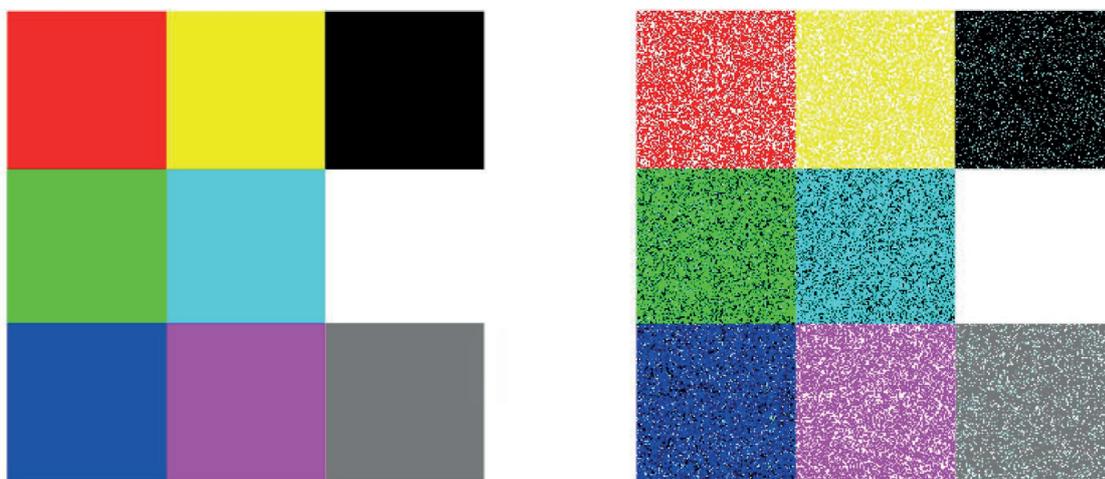


Рис. 3. Исходное изображение (слева) и результат с добавлением белого гауссовского шума (справа)

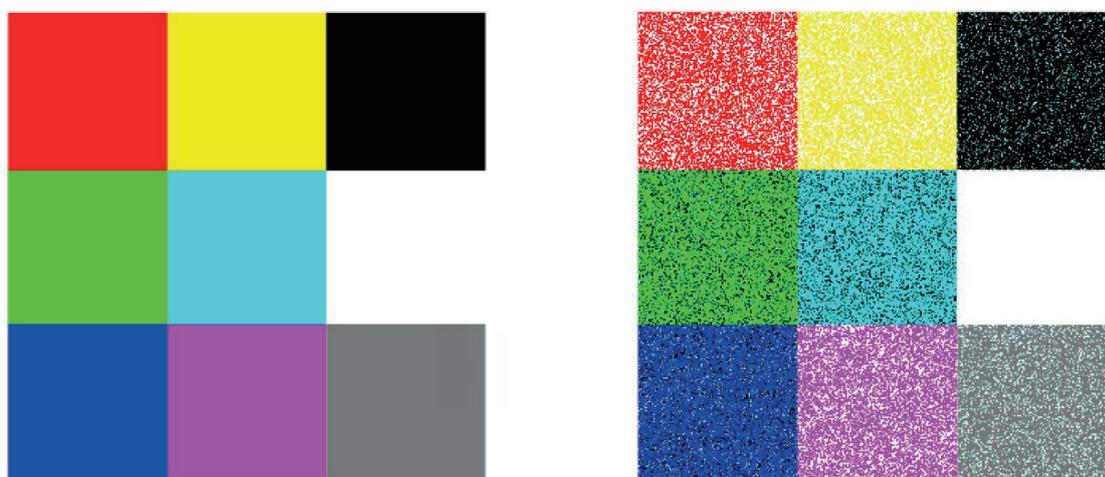


Рис. 4. Исходное изображение (слева) и результат с добавлением аддитивного равномерного белого шума (справа)

$b$  – левая и правая граница интервала выбора случайного значения соответственно.

Нас рис. 4 приведен результат генерации аддитивного равномерного белого шума с границами случайной выбора случайной величины от  $-85$  до  $85$ , процент задействованных пикселей –  $50\%$ .

### Простой аддитивный шум

Как уже упоминалось выше, аддитивный шум складывается с полезным сигналом и статистически не зависит от значения сигнала. Поэтому алгоритм наложения простого аддитив-

ного шума заключается в увеличении интенсивности цвета пикселя на заданную фиксированную величину [1]. В данной работе для большей наглядности заданная величина с одинаковой вероятностью может складываться или вычитаться со значением пикселя. На рис. 5 приведен результат добавления простого аддитивного шума с параметрами величина шума равна  $85$ , процент задействованных пикселей –  $50\%$ .

### Импульсный шум

Для добавления импульсного шума на изображение необходимо изначально значение яр-

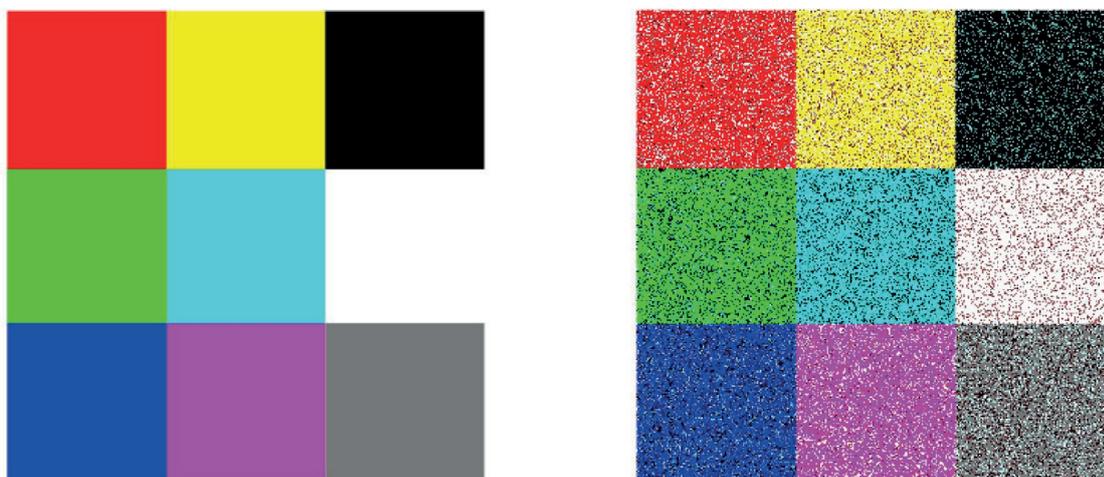


Рис. 5. Исходное изображение (слева) и результат с добавлением простого аддитивного шума (справа)

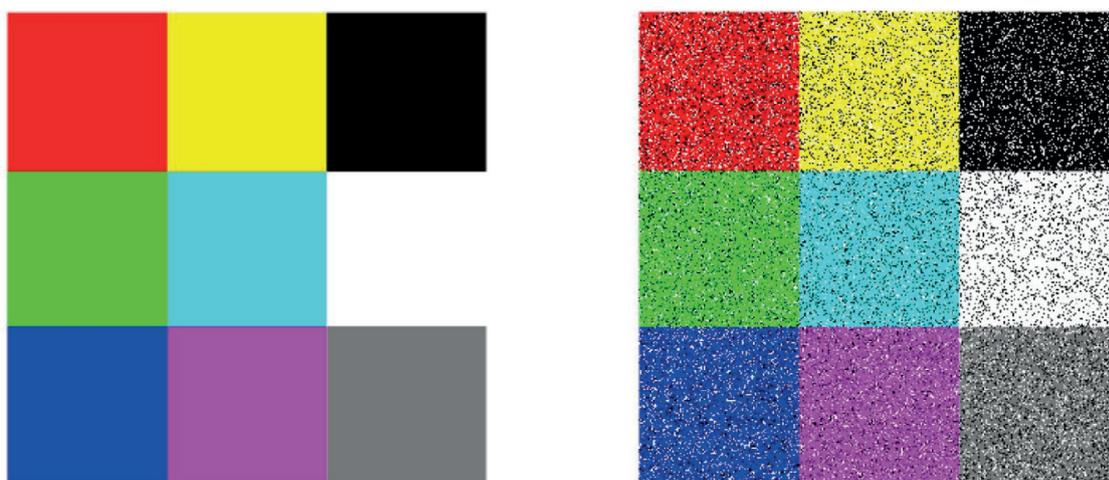


Рис. 6. Исходное изображение (слева) и результат с добавлением импульсного шума (справа)

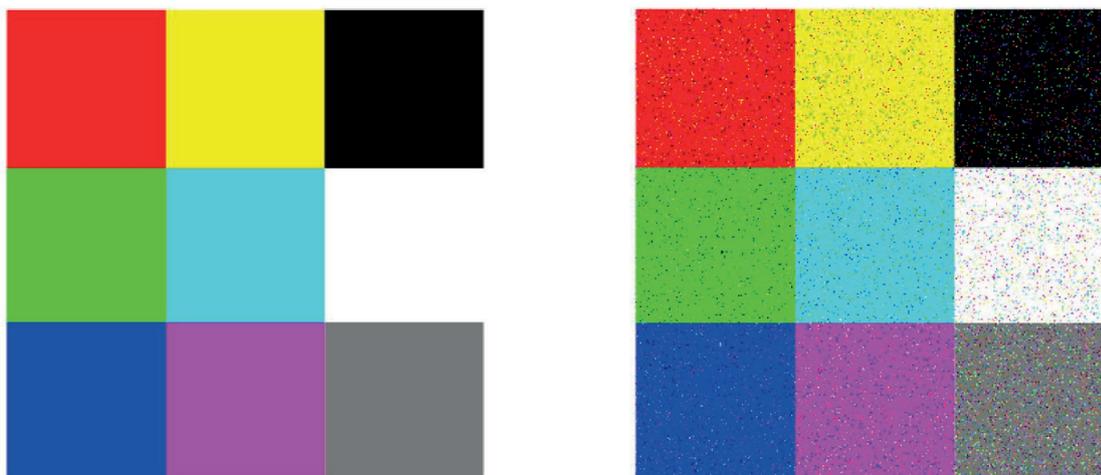


Рис. 7. Исходное изображение (слева) и результат с цифрового шума (справа)

кости каждой точки изображения заменяется на значение шума с определенной вероятностью [1]. Яркость пикселя определяется двумя положительными числами: с вероятностью  $P_a$  заменяется на значение  $a$ , с вероятностью  $P_b$  – на значение  $b$ , с вероятностью  $1-(P_a+P_b)$  остается неизменной. Как правило, одно из значений соответствует черному цвету, а другое белому.

Если одно из значений  $P_a$  или  $P_b$  равно нулю, то импульсный шум является униполярным; если оба значения отличны от нуля, то шум биполярный. В этом случае шум становится похож на крупинцы соли и перца. Поэтому биполярный шум часто называют «соль и перец».

На рис. 6 приведен результат генерации биполярного импульсного шума с параметрами значения шума 255, процент задействованных пикселей – 50 %, и вероятности  $P_a = P_b = 33,3$  %.

### Цифровой шум

Цифровой шум – дефект изображения, вносимый фотосенсорами и электроникой устройств, которые их используют вследствие несовершенства технологий и фотонной природы света [9].

Цифровой шум заметен на изображениях в виде наложенной маски из пикселей случайного цвета или яркости. Шум может иметь разную интенсивность для разных каналов изображения. Это визуально окрашивает его.

Принцип заключается в следующем: с равной вероятностью, может быть изменен пиксель одного из каналов изображения (или не изменен вовсе). Изменение происходит путем добавле-

ния к значению пикселя значение шума, которое определяется как равномерная случайная величина.

На рис. 7 приведен результат генерации цифрового шума с параметрами значения шума может изменяться от  $-255$  до  $255$ , процент задействованных пикселей – 50 %, и вероятность изменения значения каждого канала – 25 %.

Добавление аддитивного белого гауссовского шума позволяет изменять интенсивность цвета пикселей изображения на значение с нормальным законом распределения, тем самым создавать на изображении редкие по сравнению с белым шумом с равномерным распределением, черные и белые точки при определенном значении среднеквадратического отклонения.

Добавление простого аддитивного шума дает возможность изменять цветовые компоненты пикселей изображения на определенное, заданное пользователем значение.

Добавление импульсного шума с равными вероятностями позволяет заменить цвет пикселя изображения на черный или белый, или оставить нетронутым в зависимости от настроек, выбранных пользователем.

Добавление цифрового шума дает возможность изменить значение случайного компонента цвета на коэффициент, значение которого является равномерно распределенной величиной, на интервале, указанном пользователем.

### Библиографический список

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. 3-е изд. Техносфера, 2012. 1104 с.

2. *Gonzalez V., Lowe D.* The Book of Shaders. URL: <https://thebookofshaders.com/> (дата обращения: 10.12.2020).

3. *Волошин Д.* Реализация процедурных текстур методом шума Перлина. URL: <http://www.gamedev.ru/articles/?id=30126> (дата обращения: 10.12.2020).

4. *Holmstrom L., Koistinen P.* Using additive noise in back-propagation training // *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1992. Vol. 3. N 1. P. 24–38.

5. *Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.* Deep Learning. The MIT Press, November 18, 2016. 775 p.

6. *Cattin P.* Image Restoration: Introduction to Signal and Image Processing. MIAC, University of Basel URL: <https://miac.unibas.ch/SIP/06-Restoration.html> (дата обращения: 09.12.2020).

7. *Королюк В. С., Портенко Н. И., Скороход А. В.* Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.

8. *Звягин П. Н., Звягин К. Н.* Компьютерное моделирование нормально распределенных случайных величин // ИММОД-2005, 23–24 октября 2005 года, Санкт-Петербург. С. 196–200.

9. Определение шума. URL: <http://www.psciences.net/main/sciences/physics/articles/article-23.html> (дата обращения: 11.12.2020).

10. Цифровой шум изображения. URL: [http://machinepedia.org/index.php?title=Цифровой\\_шум\\_изображения](http://machinepedia.org/index.php?title=Цифровой_шум_изображения) (дата обращения: 11.12.2020).

УДК 681.5

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-73-77

**Е. Л. Семенихин\***

студент

**С. И. Колесникова\***

доктор технических наук, профессор

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ

Получена новая система управления для модели электрогидравлической дисковой тормозной системы (SEHB, Self-energising-Electro-Hydraulic-Brake) на базе синергетической теории управления и ее основного метода – аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Представлены результаты численного моделирования.

**Ключевые слова:** принцип минимального действия, метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов, макропеременная, нелинейная система дифференциальных уравнений, электрогидравлическая дисковая тормозная система.

**E. L. Semenikhin\***

Student

**S. I. Kolesnikova\***

Dr. Sc. Tech., Professor

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## ALGORITHM FOR ANALYTICAL SYNTHESIS OF A ROBUST REGULATOR BY ELECTROHYDRAULIC DISC BRAKE

A new control system for a model of an electro-hydraulic disc brake system (SEHB, Self-energizing Electro-Hydraulic Brake) is obtained on the basis of synergetic control theory and its main method of analytical design of aggregated controllers (ADAR). The results of numerical simulation are presented.

**Keywords:** principle of minimum action, method of analytical design of aggregated regulators, macro-variable, non-linear object, electro-hydraulic disc brake.

### Введение

К алгоритмам системного синтеза на основе физической теории управления и методам, ее реализующим, проявляется повышенная заинтересованность не только в силу их «близости» к естественным свойствам объектов, но и по причине наиболее «осторожного» и энергетически экономного вмешательства в их поведение для достижения целевых и желаемых свойств [1]–[3].

Цель настоящего исследования – конструирование асимптотически устойчивого и робастного синергетического [1] управления электрогидравлическим дисковым тормозом для колесной пары железнодорожной тележки, исходная модель которого имела 10-й порядок, далее была редуцирована до 4-го порядка (для синтеза управления этого достаточно в силу синергетической взаимосвязанности координат объекта), была предложена в институте гидропривода и управления Аахенского технического универ-

ситета (IFAS RWTH Aachen University, Germany) под англоязычным названием «self-energising electro-hydraulic brake» (SEHB) (рис. 1) [4].

Несмотря на солидный «возраст» задачи, на данный момент не существует управления с удовлетворительными свойствами при резком увеличении или уменьшении тормозной силы (в разомкнутом состоянии при  $u = 0$  объект неустойчив).

Имеющимися аналогами методов управления данным объектом являются ПИД-регулятор [4], к недостаткам которого относится колебательный характер торможения, что приводит к износу механической части тормоза; регулятор, полученный на основе линеаризации обратной связью [5], имеющий затраты на управление в 4–11 раз меньше по сравнению с затратами на управление в системе с ПИД-регулятором, но демонстрирующий те же неудовлетворительные свойства при критических значениях коэффициента (параметра) торможения.

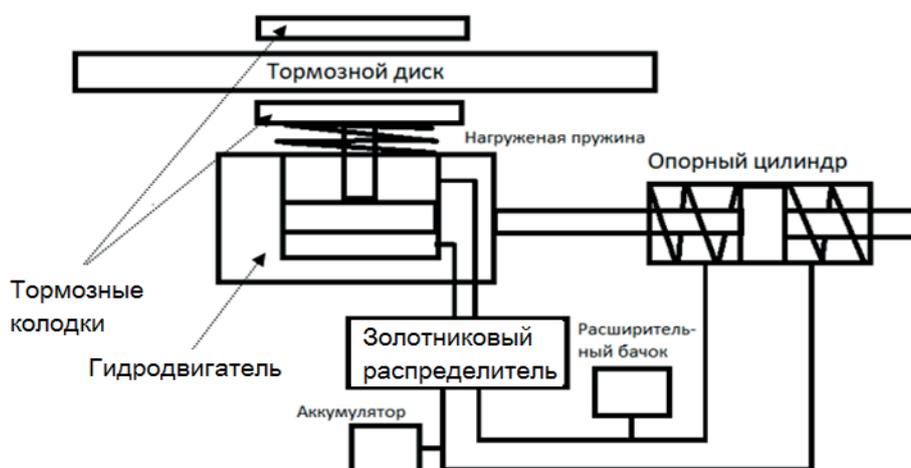


Рис. 1. Схема SEHB

Рассматриваемый объект [4], [5] (рис. 1) есть фрикционный тормоз, использующий тормозную силу в качестве источника энергии для генерирования нового тормозного усилия посредством передачи электрогидравлической энергии. Гидравлический цилиндр двойного действия, который будем называть опорным цилиндром, связывает суппорт тормоза с конструкцией тележки, фиксируя поршень гидроцилиндра между двумя столбцами жидкости. В случае торможения сила трения действует на поршень опорного цилиндра, вызывая изменение давления жидкости в его полостях. Давление жидкости в верхней гидролинии практически не меняется из-за установленного расширительного бачка, объем которого много больше, чем совокупный объем линии и полости опорного цилиндра. Золотниковый распределитель связывает гидролинии с полостями гидродвигателя. Если активно прямое соединение гидролиний (случай при увеличении тормозной силы), то происходит нагнетание жидкости в поршневую полость гидродвигателя, тогда как штоковая его полость соединяется с линией слива. При этом выбранное отношение между полной и кольцевой площадями поршня дифференциального цилиндра приводит к самовозбуждающему процессу увеличения тормозной силы. Если действует обратное соединение гидролиний (случай при уменьшении тормозной силы), то поршневая полость гидродвигателя соединяется с линией слива, а в штоковую полость поступает жидкость из опорной линии.

Рассмотрим для указанного объекта модель увеличения тормозной силы [4], [5] (система уравнений для уменьшения тормозной силы имеет симметричный вид):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_1 x_4 \sqrt{x_2 - x_1 - \alpha p}, \\ \dot{x}_2 &= a_2 x_4 \sqrt{x_2 - x_1 - \alpha p}, \\ \dot{x}_3 &= -a_3 x_3 - a_4 x_4 + g u_1, \\ \dot{x}_4 &= x_3. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь переменные и параметры объекта управления имеют описание: параметры  $a_1, a_2, a_3, a_4, \alpha, p, g$  – заданные коэффициенты (для нагрузки гидродвигателя, поршня опорного цилиндра, демпфирования золотникового плунжера, квадрата собственной частоты колебаний золотникового плунжера, передачи золотникового распределителя, соответственно);  $x_1$  – давление нагрузки гидродвигателя;  $x_2$  – давление в опорной линии;  $x_3$  – скорость штока плунжера;  $x_4$  – величина перемещения штока в плунжере;  $u$  – искомое управление, реализующее достижение цели:  $\psi^* = x_2 - x_2^* = 0, t \rightarrow \infty$ , где  $x_2^*$  – заданное значение (задача стабилизации). Требуется:

1) сконструировать алгоритм синтеза системы управления для модели нелинейного объекта 4-го порядка (электрогидравлический дисковый тормоз (SEHB)); при этом функционал качества искомого управления содержит требования и к целевой системе и к динамике переходного процесса:  $\Phi(\psi^*) = \int_0^\infty (\psi^{*2} + T^2 \dot{\psi}^{*2}) dt \rightarrow \min;$

2) проверить непротиворечивость полученной системы управления на модельных данных, представленных в работах [4], [5];

3) исследовать свойства робастности регулятора в расчетных условиях.

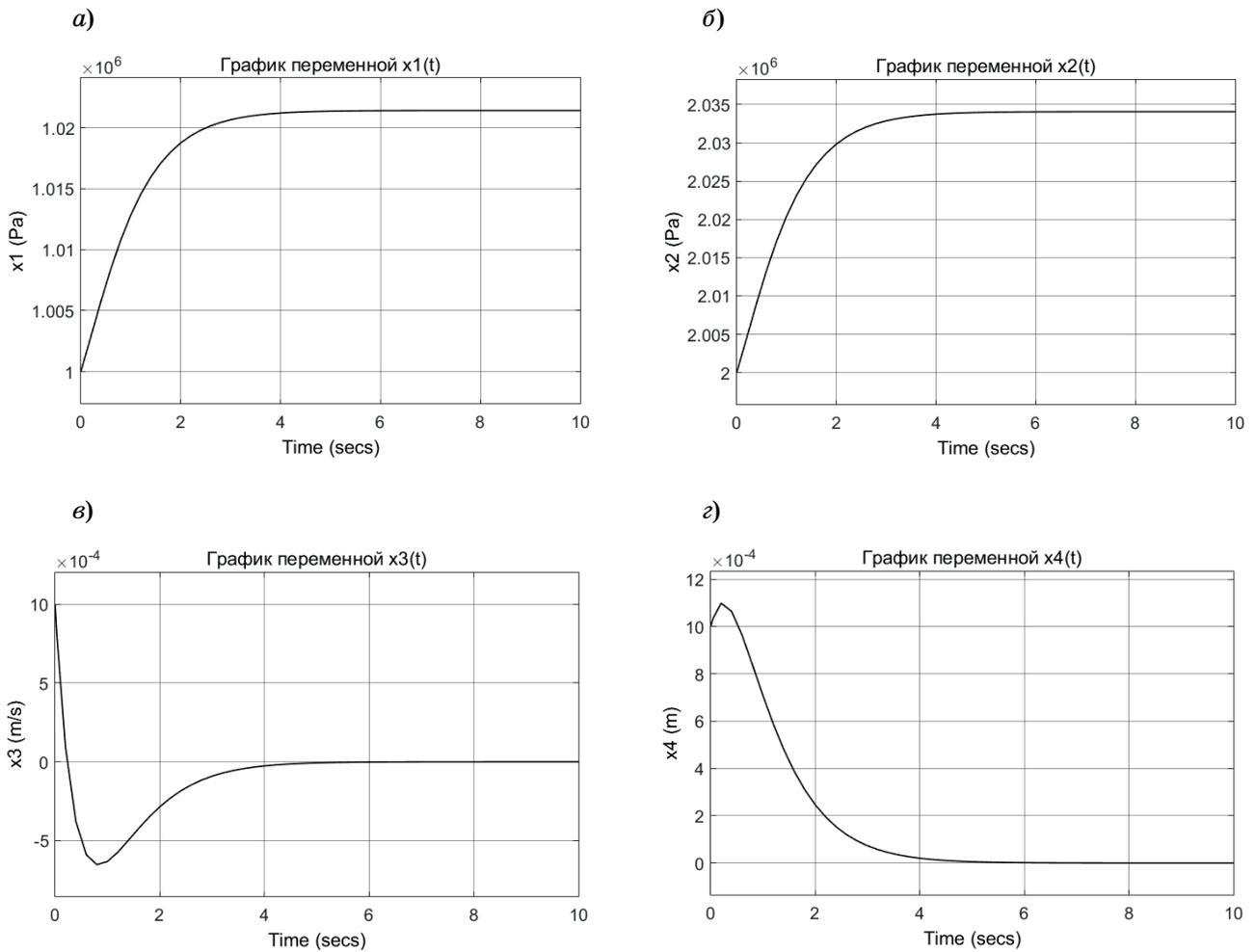


Рис. 2. Поведение координат объекта (1) а)-г) под управлением (6)

Применяемый ниже метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) учитывает физические особенности управляемого объекта (А. А. Красовский) через специальные инварианты, описание которых есть математическое многообразие с аттрактивным свойством; синтезируемый регулятор является робастным и удовлетворяет принципу минимального действия.

**Алгоритм конструирования управления для стабилизации давления в опорной линии посредством управления скоростью штока плунжера**

Этап 1. Определяем структуру внешнего управления  $\psi$  в соответствии с заданным целевым инвариантом

$$\psi_1(t) = \psi_1(x_1(t), x_2(t), x_4(t)) = 0, t \rightarrow \infty,$$

где макропеременная  $\psi_1 = x_3 - \varphi(x_1, x_2, x_4)$ . Уравнение Эйлера-Лагранжа для функционала качества управления

$$\Phi_1(\psi_1) = \int_0^{\infty} (\psi_1^2 + T_1^2 \dot{\psi}_1^2) dt \xrightarrow{\psi_1} \min$$

примет удобный линейный вид

$$T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1(t) = 0,$$

из которого с учетом уравнений (1), находим выражение для внешнего управления:

$$u = g^{-1} \left[ -T_1^{-1} \psi_1 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + x_4 \sqrt{x_2 - x_1 - \alpha \rho} \times \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} a_1 + \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} a_2 \right) + \frac{\partial \varphi}{\partial x_4} x_3 \right]. \quad (2)$$

Функция  $\varphi(x_1, x_2, x_4)$  интерпретируется в АКАР как внутреннее управление, подлежащее нахождению на этапе 2.

*Этап 2.* На втором этапе конструирования управления для объекта (1) формируется система после декомпозиции на достигнутом множестве состояний  $\psi_1 = x_3 - \varphi(x_1, x_2, x_4) = 0$  или  $x_3 = \varphi(x_1, x_2, x_4)$ :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_1 x_4 \sqrt{x_2 - x_1 - \alpha \rho}, \\ \dot{x}_2 &= a_2 x_4 \sqrt{x_2 - x_1 - \alpha \rho}, \\ \dot{x}_4 &= \varphi(x_1, x_2, x_4). \end{aligned} \quad (3)$$

Поиск внутреннего управления  $\varphi(x_1, x_2, x_4)$  осуществляется уже в соответствии с заданным целевым инвариантом  $\psi_2 = \psi^* = x_2 - x_2^* = 0, t \rightarrow \infty$  и выше введенным функционалом качества внутреннего управления  $\Phi(\psi^*)$ . Из уравнения  $T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2(t) = 0$  Эйлера-Лагранжа для функционала  $\Phi_2(\psi_2) = \Phi(\psi^*)$  с учетом уравнений (3), находим выражение для переменной  $x_4$ :

$$x_4 = -T_2^{-1} (x_2 - x_2^*) a_2^{-1} (x_2 - x_1 - \alpha \rho)^{-1/2}. \quad (4)$$

Из (3) следует, что полная производная  $\dot{x}_4 = \varphi(x_1, x_2, x_4)$  с учетом (4):

$$\begin{aligned} \varphi(x_1, x_2, x_4) &= \dot{x}_4 = \\ &= -T_2^{-1} x_4 \left[ 1 - (1/2) k_a a_2^{-1} (x_2 - x_2^*) (x_2 - x_1 - \alpha \rho)^{-1} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$k_a = a_2 - a_1.$$

Определив частные производные  $\frac{\partial \varphi}{\partial x_1}, \frac{\partial \varphi}{\partial x_2}, \frac{\partial \varphi}{\partial x_4}$  из (5), собирая вместе уравнения (1), (2), (5), получаем итоговую систему управления с регулятором:

$$\begin{aligned} u &= g^{-1} \left[ -T_1^{-1} \psi_1 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + \right. \\ &+ x_4 \sqrt{x_2 - x_1 - \alpha \rho} \times \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} a_1 + \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} a_2 \right) + \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x_4} x_3 \right], \\ \psi_1 &= \psi_1 = x_3 - \varphi(x_1, x_2, x_4), k_a = a_2 - a_1, \\ \varphi(x_1, x_2, x_4) &= -T_2^{-1} x_4 \left[ 1 - (1/2) k_a a_2^{-1} (x_2 - x_2^*) \times \right. \\ &\times \left. (x_2 - x_1 - \alpha \rho)^{-1} \right], \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} &= T_2^{-1} x_4 (1/2) k_a a_2^{-1} (x_2 - x_2^*) \times \\ &\times (x_2 - x_1 - \alpha \rho)^{-2}, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} &= T_2^{-1} x_4 (1/2) k_a a_2^{-1} (x_2 - x_1 - \alpha \rho)^{-2} \times \\ &\times (x_2^* - x_1 - \alpha \rho), \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x_4} &= -T_2^{-1} \left[ 1 - (1/2) k_a a_2^{-1} (x_2 - x_2^*) \times \right. \\ &\times \left. (x_2 - x_1 - \alpha \rho)^{-1} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

## Результаты численного моделирования

Численное моделирование сконструированной системы управления реализовано в среде разработки Matlab/Simulink со значениями параметров:

$$\begin{aligned} a_1 &= 15820; a_2 = 25175; a_3 = 1257; a_4 = 394760; \\ \alpha &= 0,609; \rho = 500000; \\ T_1 &= 1,25; T_2 = 0,75; g = 394760. \end{aligned}$$

На рис. 2 представлены графики изменения переменных системы управления (1), (6), из которых следует, что: а) управление работоспособно; б) цель управления достигается; в) переходной процесс имеет приемлемое качество.

## Заключение

В статье впервые получены соотношения для управления объекта СЕНВ в детерминированных условиях на основе синергетической теории управления (СТУ), которая, как известно, опирается на принцип целесообразной самоорганизации, обусловленной в свою очередь применяемым для синтеза управления принципом минимального действия [4], объясняющего оптимальные формы поведения объектов под воздействием совокупности сил, на них действующих. Важность представленного результата заключается и в том, что регуляторы, сконструированные на основе СТУ, обладают свойством энергосбережения (в модельных условиях 810 % в зависимости от настроек регулятора).

Планируются дальнейшие исследования относительно реализации построения алгоритма нелинейного регулятора для объекта с возмущениями как систематического характера (неслучайного [6]), так и случайного [7], которые впервые будут применены для объекта СЕНВ, неустойчивого в разомкнутом состоянии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-08-00747).

## Библиографический список

1. Прангшвили И. В., Пащенко Ф. Ф., Бусыгин Б. П. Системные законы и закономерности в электродинамике, природе и обществе. М.: Наука, 2001. 335 с.

2. *Колесников А. А.* Синергетика и проблемы теории управления. М.: Физматлит, 2004. 504 с.

3. *Красовский А. А.* Избранные труды: Самые ранние. Самые новые. М.: Наука, 2003. 614 с.

4. *Liermann M.* Self-energizing Electro-Hydraulic Brake // Diss. RWTH Aachen University. Aachen: ShakerVerlag, 2008. 175 p.

5. *Старых А. А.* Синтез нелинейного управления самовозбуждающимся электрогидравлическим тормозом // Известия вузов. Электромеханика. 2008. № 6. С. 54–59.

6. *Колесников А. А.* Метод интегральной адаптации нелинейных систем на инвариантных многообразиях // Труды 3-й мультиконф. по проблемам управления. СПб., 2010. С. 29–34.

7. *Kolesnikova S.* Stochastic Discrete Nonlinear Control System for Minimum Dispersion of the Output Variable // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 986. P. 325–331.

УДК 378.1

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-78-81

**А. В. Туманова\***

кандидат технических наук, доцент

**Н. В. Путилова\***

старший преподаватель

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ

*Рассматриваются принципы автоматизации проектирования образовательных программ высшего образования с учетом индивидуальных образовательных траекторий, предложена модель компетенций выпускника, обучающегося по индивидуальной образовательной программе, а также обобщенная модель индивидуального учебного плана.*

**Ключевые слова:** разработка образовательных программ, ФГОС 3++, индикаторы достижения компетенций, индивидуальные учебные планы, индивидуальные образовательные траектории высшего образования.

**A. V. Tumanova\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**N. V. Putilova\***

Senior Lecturer

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## CURRICULA DESIGN AUTOMATION TAKING INTO ACCOUNT STUDENT INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORIES

*The article discusses the principles of higher education curricula design automation, taking into account individual educational trajectories, also competencies model of a graduate with individual education pathway, as well as a generalized model of an individual curriculum are proposed.*

**Keywords:** Curriculum design, FSES 3++, indicators of competencies achievement, individual curricula, higher education pathways, individual educational trajectories.

В настоящее время достаточно много внимания уделяется персонализации образования, индивидуальным образовательным траекториям (ИОТ) высшего образования. Проблема имеет много аспектов: когда мы рассматриваем ИОТ, необходимо принимать во внимание особенности довузовской подготовки, ограничения обучающегося по здоровью, академическую мобильность и личные предпочтения обучающихся при выборе элективных модулей образовательной программы (ОП).

Разработка и управление образовательными программами по индивидуальным траекториям – достаточно сложное и трудоемкое занятие. В первую очередь это связано с тем, что количество таких индивидуальных образовательных программ (ИОП) на порядок больше, чем обычных. Не меньшую сложность представляет унификация ИОП для организации образовательного процесса. Также достаточно непросто обеспе-

чить и проверить, чтобы выпускник получил все необходимые для работы по выбранной специальности компетенции при выборе различных траекторий. До недавнего времени индивидуальные учебные планы и ИОП разрабатывались вручную или с минимальным применением автоматизированных средств, но сейчас, принимая во внимание тенденцию к индивидуализации образования, без полноценной автоматизированной системы, предназначенной именно для работы с индивидуальными траекториями, обойтись невозможно.

Система для автоматизированной работы с образовательными программами с учетом ИОТ должна удовлетворять ряду требований:

- поддержка компетентностной модели выпускника;
- унификация максимально возможной части индивидуальной образовательной программы для оптимизации образовательного процесса;

- поддержка логической целостности образовательной программы;
- поддержка максимальной степени свободы ИОП в элективной части;
- возможность учета различных уровней предварительной подготовки обучающегося;
- обеспечение полноты освоения компетенций образовательной программы независимо от выбранной образовательной траектории;
- оценка возможности академической мобильности в рамках вуза;
- контроль ИОП на соответствие нормативным документам.

Для создания системы, отвечающей этим требованиям, необходимо решение следующих задач:

- проанализировать уже существующие методы работы с ИОТ;
- проанализировать отличие компетентностной модели выпускника при обучении по ОП от модели при обучении по индивидуальной траектории;
- разработать способы проверки логической целостности ОП с ИОТ;
- определить место ИОП среди других образовательных программ, отвечающее критериям унификации общей части и свободы выборной.

Реализация ИОТ рассматривается в различных исследованиях с разных точек зрения. В работах, где рассматривается автоматизация академической мобильности в форме сетевых образовательных программ [1], больше внимания уделяется организации взаимодействия вузов и не проработан вопрос результатов обучения выпускника. В ряде работ, посвященных автоматизации работы с образовательными траекториями, рассматриваются общие подходы [2]. Математические модели компетенций выпускника наиболее полно представлены в диссертации А. С. Пирской [3]. Однако приведенная компетентностная модель выпускника относится к образовательным программам высшего профессионального образования на основе образовательных стандартов предыдущего поколения.

Компетентностная модель выпускника в работе Пирской [3] рассматривается как граф формирования компетенций, а результат обучения выпускника описан как пространство множеств знаний и умений. Такая модель удобна при работе с компетенциями, изначально заданными образовательными стандартами высшего профессионального образования. Однако при переходе к стандартам третьего поколения, в особенности поколения 3++, требующих формулировки собственных компетенций и выбора целевых профессиональных стандартов, становится оче-

видным, что строго нисходящий подход от компетенций к знаниям, умениям и навыкам недостаточен и ограничивает возможности создания индивидуальных траекторий обучающихся.

Главной целью построения модели компетентностной модели выпускника является совмещение возможности построения индивидуальных образовательных программ, отражающих предметные области и цели выпускников, но при этом имеющих общую основу необходимую для обеспечения возможности академической мобильности и организации образовательного процесса. Модель должна, с одной стороны, отражать компетенции выпускника на каждом этапе получения образования, для того чтобы была возможна академическая мобильность, а с другой – демонстрировать сферы и типы задач профессиональной деятельности, относящиеся к данному обучающемуся его индивидуальной программе.

С точки зрения компетентностной модели выпускника есть два пути диверсификации образовательных программ по областям деятельности: экстенсивный, когда на каждую сферу деятельности или профессиональный стандарт выделяются свои профессиональные компетенции, и интенсивный, когда берутся обобщенные профессиональные компетенции по нескольким сферам деятельности или профессиональным стандартам, при этом углубляются и реализуются в разных областях деятельности. При интенсивном подходе у компетенции выделяется базовый уровень и углубленный, относящийся к какой-либо области или сфере деятельности. Таким образом, выпускник должен освоить все компетенции образовательной программы на базовом уровне, а на углубленном профессиональные компетенции с уклоном в заданную сферу. Экстенсивный путь проще при формулировке компетенций, однако сложнее при оценке достижений этих компетенций во время государственной итоговой аттестации и может затруднить переход студента на другую образовательную программу. Интенсивный путь более требователен к формулировке профессиональных компетенций и анализу на этапе формирования компетенций и индикаторов их достижения, но упрощает проверку на государственной итоговой аттестации и оформление академической мобильности. Соответственно, для нашей цели будет более удобен интенсивный путь. Наглядное представление результата обучения выпускника можно увидеть на рис. 1.

Таким образом, компетентностную модель результатов обучения выпускника, которая будет содержать множество компетенций, полу-

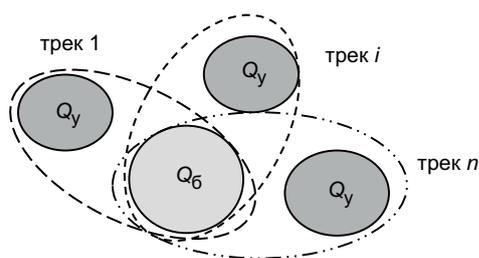


Рис. 1. Компетентностная модель результатов обучения выпускника при создании ОП с индивидуальными образовательными траекториями

ченных на базовом уровне, и множество компетенций, полученных с углубленным уровнем в сфере профессиональной деятельности, можно представить в виде формулы:

$$Q = Q_b \cap \bigcup_i Q_{yi}$$

При таком подходе в традиционной модели образования на базовом уровне будут получены универсальные общепрофессиональные компетенции, а на углубленном – профессиональные. А в модели Liberal Arts [4], [5] на базовом уровне будут изучаться общепрофессиональные компетенции, а на углубленном – универсальные и профессиональные.

Для определения сформированности компетенций на базовом или углубленном уровнях необходимо разделить индикаторы достижения компетенции на базовые и углубленные соответственно. Дисциплины, модули или практики, после изучения которых будут сформированы базовые индикаторы, обязательны для обучающегося вне зависимости от образовательного трека. Дисциплины и практики, формирующие углубленный уровень компетенции, будут составлять элективную часть образовательной программы и зависеть от индивидуальной траектории. Однако возникает проблема определения возможности изучения студентом выбранной дисциплины или модуля с точки зрения

подготовленности. Необходимо обозначить порог вхождения обучающегося в соответствующую дисциплину. В компетентностной модели удобнее всего ставить в качестве порога вхождения не прохождение других курсов, а формирования у обучающегося атомарных индикаторов достижения компетенций. В данном случае под атомарными индикаторами подразумеваются индикаторы, которые невозможно разбить на отдельные смысловые составляющие, результат декомпозиции в случае индикатора, содержащего несколько различных знаний, умений или навыков. Таким образом, образовательную траекторию можно описать графом  $G(D, I)$ , где  $D$  – множество дисциплин, модулей и практик образовательной программы;  $I$  – множество атомарных индикаторов достижения компетенций данной образовательной траектории. Примерный вид графа образовательной траектории представлен на рис. 2.

Для учета академической мобильности в граф необходимо добавить дисциплины и индикаторы компетенций, полученные на всех этапах обучения. Также для учета степени подготовленности абитуриента возможно добавление в модель знаний, умений и навыков, необходимых для освоения дисциплин первого семестра и полученных в школе. В таком случае потребуется входное тестирование в начале обучения по дисциплинам, подготовленность по которым может отличаться.

Граф дисциплин и индикаторов также позволит отслеживать логику построения образовательной программы, если в графе использовать в качестве вершин не дисциплины, а части дисциплин, изучаемые в семестрах. Наличие циклов для дисциплин, читаемых не в одном семестре, означает ошибку в логике построения ОП. Также ошибкой будет формирование не всех индикаторов достижения компетенции на базовом уровне или отсутствие в траектории элективной дисциплины, углубляющей компетенцию выбранного трека.

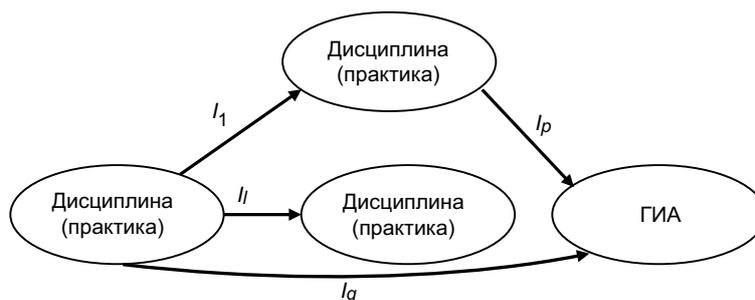


Рис. 2. Граф образовательной траектории

ИОП является частным и специфическим случаем образовательной программы. Документационное обеспечение, проверка на соответствие нормативным документам будет у ОП и ИОП одинаковой, поэтому представляется целесообразным создание отдельного модуля в рамках автоматизированной системы разработки ОП «АИС УМО» в ГУАП.

Основная сложность при организации образовательного процесса по ИОТ – это унификация общей для различных ОП частей. При отсутствии унификации задача построения расписания становится нерешаемой. В некоторых вузах выделяют отдельные периоды времени для изучения дисциплин элективной части, что позволяет решить проблемы со временем и помещениями при построении расписания, но создает проблему при построении графиков работы преподавателей. Для унификации и вариабельности ИОП можно предложить следующую модель: в основе ИОП лежит базовая образовательная программа по направлению подготовки, включающая в себя все необходимые образовательные треки, отдельные ИОП хранят ссылки на базовую ОП и информацию об отличиях данной индивидуальной программы от базовой. При таком подходе вся унифицированная часть либо остается неизменной для всех ИОП, либо изменяется для всех, а индивидуальные особенности образовательной траектории легко контролируются и поддаются учету.

Введение модуля для работы с ИОТ позволяет, сохраняя традиционную схему работы с ОП, персонализировать образование в необходимой для конкурентоспособности вуза степени. В качестве следующего этапа развития системы можно предложить работу с сетевыми образовательными программами, а также информационную и документационную поддержку академической мобильности со стандартизацией данных об образовательной траектории обучающегося.

## Библиографический список

1. *Чугунов А. П.* Модели и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении сетевыми образовательными программами вузов с учетом индивидуальных предпочтений студентов: автореф. дис. ... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук 05.13.10. Челябинск, 2018. 23 с.

2. *Заславский А. А.* Проектирование системы автоматизации построения персональных траекторий развития обучающихся // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. М., 2019. Т. 16. № 2. С. 149–162.

3. *Пирская А. С.* Автоматизация управления образовательными траекториями студентов на основе результатов освоения компетенций ФГОС ВПО: автореф. дис. ... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук 05.13.06. СПб., 2012. 18 с.

4. *Авдонина Н. С.* Образовательная модель Liberal Arts: содержание и методы // Ценности и смыслы. 2017. № 4. С. 98–105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrazovatel'naya-model-liberal-arts-soderzhanie-i-metody> (дата обращения: 12.12.2020).

5. *Кряклина Т. Ф.* Liberal arts (свободное образование) и возможности его введения в российских вузах // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2015. № 2 (40). С. 113–119.

УДК 621.398(075.8)

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-82-85

**А. А. Фоменкова\***

старший преподаватель

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ВЫБОР МИНИМАЛЬНОГО НАБОРА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БИОМАССЫ В СИСТЕМЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

*Анализируется техническое состояние анаэробной системы биологической очистки с точки зрения активности и жизнеспособности биомассы. Ставится задача выбора минимального набора признаков, оптимальных с точки зрения стоимости проверок, позволяющего принять решение об уровне активности и жизнеспособности биомассы в биореакторе.*

**Ключевые слова:** анализ технического состояния, диагностические признаки, работоспособность, система биологической очистки сточных вод, анаэробная биомасса.

**A. A. Fomenkova\***

Senior Lecturer

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## SELECTION OF THE MINIMUM SET OF DIAGNOSTIC FEATURES IN THE ANALYSIS OF THE TECHNICAL STATE OF BIOMASS IN THE BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT SYSTEM

*The paper analyzes the technical state of the anaerobic biological treatment system from the point of view of the activity and viability of biomass. The task is to select the minimum set of signs that are optimal from the point of view of the cost of checks, which makes it possible to decide on the level of activity and viability of biomass in the bioreactor.*

**Keywords:** analysis of technical state, diagnostic signs, performance, biological wastewater treatment system, anaerobic biomass.

Системы биологической очистки сточных вод представляют собой сложный, многокомпонентный и многосвязный объект, основной рабочей единицей которого выступает биомасса. Биомасса – это совокупность различных групп микроорганизмов, живущих в симбиозе и поглощающих загрязнения сточной воды. В качестве побочного продукта жизнедеятельности анаэробной биомассы выделяется биогаз, используемый для обеспечения энергетических нужд системы благодаря содержащемуся в нем метану. Мониторинг активности биомассы с целью анализа ее технического состояния (ТС) позволяет сохранять работоспособность системы, поддерживать наилучшие условия для развития и жизнедеятельности биомассы, предупредить возникновение аварийных и неработоспособных состояний системы, связанных с угнетением жизнедеятельности микроорганизмов в биореакторе.

При анализе технического состояния (ТС) сложных объектов, к классу которых относятся и система биологической очистки сточных вод,

возникает необходимость выделения контролируемых параметров, несущих информацию, необходимую для распознавания состояния с заданной достоверностью. Состав этих признаков для одной и той же системы может различаться в зависимости от цели проводимого анализа, а также от используемого метода анализа [1], [2]. Анализ состояния системы биологической очистки может выполняться с различными целями, например, контроль правильности функционирования, соответствие заданному режиму работы, анализ работоспособности, выявление отказов с различной степенью глубины. Так, в работе анализ технического состояния системы анаэробной биологической очистки сточных вод проводится с целью принятия решения касательно уровня активности и жизнеспособности биомассы в биореакторе. В качестве уровней состояний биомассы приняты следующие:

- полностью работоспособное состояние,
- незначительное угнетение активности биомассы,

- значительное угнетение активности биомассы,
- критическое угнетение активности биомассы,
- отказ, требующий незамедлительной реакции.

Активность биомассы определяет способность системы биологической очистки выполнять свою основную функцию – снижение концентрации загрязнений сточных вод до установленного нормативами или техническим регламентом уровня и является основным параметром, характеризующим работоспособность всей системы в целом. Особенностью анализа технического состояния биомассы является высокая степень инертности биологических процессов. Большинство отказов системы приводит к потере работоспособности не сразу с момента возникновения, а спустя какое-то, иногда весьма продолжительное, время. Некоторые отказы, такие как угнетение метаногенной микрофлоры накопленными летучими жирными кислотами (ЛЖК), можно предупредить на основе данных системы мониторинга, а при возникновении отказа – вернуть систему в работоспособное состояние. Для других отказов, как, например, действие токсических веществ, зачастую потеря работоспособности требует перезапуска системы, что требует продолжительных переходных периодов и приводит к снижению качества очистки.

Существуют лабораторные методы, позволяющие оценить активность и жизнеспособность биомассы, однако в производственных условиях в процессе запуска или эксплуатации системы эти методы неприменимы. Поэтому предлагается анализ технического состояния анаэробной биомассы проводить по косвенным параметрам, отражающим те или иные свойства жизнедеятельности микроорганизмов. На основе данных об эксплуатации систем анаэробной биологической очистки [3], [4] были выделены 10 таких параметров, поддающихся измерению в процессе эксплуатации системы, и оценена стоимость соответствующих проверок (в условных единицах):

$\pi_1$  – концентрация загрязнений сточной воды на выходе из биореактора, являющаяся основным показателем качества работы системы очистки сточных вод. Измеряется масс-спектрометром и принятая стоимость проверки  $c(\pi_1) = 4$ ;

$\pi_2$  – объем биогаза, вырабатываемый с 1 т сточных вод в час. При нормальной работе анаэробной системы очистки значение этого показателя находится в границах, зависящих от состава исходного сырья – загрязненных сточных вод. Параметр измеряется расходомерами и принятая стоимость проверки  $c(\pi_2) = 1$ ;

$\pi_3$  – содержание метана в выработанном биогазе. Соотношение метана и углекислого газа в биогазе позволяет судить об активности метаногенов. Параметр измеряется газовыми анализаторами и принятая стоимость проверки  $c(\pi_3) = 3$ ;

$\pi_4$  – концентрация летучих жирных кислот (ЛЖК). ЛЖК, являясь продуктом стадии кислотогенеза, могут накапливаться в биореакторе, угнетая активность метаногенов. Увеличение концентрации ЛЖК, однако, не приводит к моментальному выходу системы из работоспособного состояния. При этом длительное воздействие высоких концентраций ЛЖК значительно снижает количество биомассы, и восстановление стабильного работоспособного состояния в таком случае занимает продолжительное время, сопоставимое в некоторых случаях с перезапуском системы. Параметр измеряется масс-спектрометром и принятая стоимость проверки  $c(\pi_4) = 4$ ;

$\pi_5$  – кислотность (рН) косвенно свидетельствует об уровне ЛЖК, но несмотря на меньшую информативность проверки, ее стоимость значительно ниже, чем проверки  $\pi_4$ . Измеряется рН-метром и принятая стоимость проверки  $c(\pi_5) = 1$ ;

$\pi_6$  – проверка токсичности входного потока жидкости. Различные токсические вещества, изначально присутствовавшие в сточной воде или попавшие в нее на предшествующих биологической очистке стадиях обработки, приводят к угнетению биомассы вплоть до ее гибели. Наличие токсических веществ в сточной воде требует незамедлительных действий по предотвращению аварийной ситуации. Измеряется анализаторами токсичности и принятая стоимость проверки  $c(\pi_6) = 3$ ;

$\pi_7$  – соотношение C:N (углеродного питания к азотсодержащему) в исходном субстрате. Выход за пределы нормы этого соотношения не приводит к критическому отказу, но способен значительно уменьшить активность биомассы. Измеряется анализаторами общего азота и общего органического углерода, принятая стоимость проверки  $c(\pi_7) = 3$ ;

$\pi_8$  – скорость изменения температуры. Анаэробная микрофлора чувствительна к перепадам температуры и не терпит резких ее скачков. При этом изменение температуры в рамках заданного температурного режима является управляющим параметром системы автоматизированного управления. Параметр измеряется термодатчиками, принятая стоимость проверки  $c(\pi_8) = 2$ ;

$\pi_9$  – вынос биомассы из биореактора с потоком очищаемой воды. В современных анаэробных системах очистки используют различные способы удержания биомассы, в частности, за-

Таблица 1

Матрица состояний активности биомассы в анаэробном биореакторе

	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_6$	$\pi_7$	$\pi_8$	$\pi_9$	Уровни состояния	Вероятная причина отказа
S0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	полностью работоспособное состояние	накопление ЛЖК
S1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	незначительное угнетение активности биомассы	накопление ЛЖК
S2	1	1	0	0	0	1	1	1	1	незначительное угнетение активности биомассы	накопление ЛЖК
S3	0	1	0	0	0	1	1	1	1	значительное угнетение активности биомассы	накопление ЛЖК
S4	0	0	0	0	0	1	1	1	0	критическое угнетение активности биомассы	отказ за счет быстрой смены температуры
S5	1	1	1	0	0	1	1	0	1	незначительное угнетение активности биомассы	отказ за счет быстрой смены температуры
S6	0	0	1	0	0	1	1	0	1	незначительное угнетение активности биомассы	отказ за счет быстрой смены температуры
S7	0	0	0	0	0	1	1	0	1	значительное угнетение активности биомассы	токсичный сток
S8	0	1	1	1	1	0	1	1	1	отказ, требующий незамедлительной реакции	токсичный сток
S9	0	0	1	1	1	0	1	1	0	критическое угнетение активности биомассы	отказ за счет несоблюдения соотношения C:N
S10	0	1	0	1	1	1	0	1	1	незначительное угнетение активности биомассы	отказ за счет несоблюдения соотношения C:N
S11	0	0	0	1	1	1	0	1	0	значительное угнетение активности биомассы	
$c(\pi_i)$	4	1	3	4	1	3	3	2	3		

крепление ее на носителях. Наличие микрофлоры в очищенной воде в количестве большем, чем предусмотрено используемой технологией, свидетельствует о нарушении процессов сцепления с поверхностью носителя. Подобный отказ может происходить в результате многих отрицательных воздействий, в том числе и гибели биомассы под воздействием токсических веществ. Параметр измеряется путем отбора проб, принятая стоимость проверки  $c(\pi_9) = 3$ .

На основе выделенных параметров  $\pi_1 - \pi_9$  с помощью имитационной модели, основанной на обобщенной математической модели анаэробного реактора, подробно рассмотренной в [4], была составлена матрица возможных неработоспособных состояний биомассы в системе биологической очистки (табл. 1).

Так как в литературе отсутствуют данные о вероятности возникновения выделенных технических состояний, для дальнейшего выбора минимального набора диагностических признаков использовался логический метод – сокращенный метод Яблонского [2], оптимальный по стоимости проверок. Суть метода заключается в определении тупиковых покрытий матрицы различимости в соответствии с правилами, выведенными из элементарных свойств алгебры

логики. Матрица различимости представляет собой бинарную таблицу, каждая строка которой составлена для двух различных строк матрицы состояний (табл. 1). Каждый элемент строки матрицы различимости приравнивается 0 в случае, если два состояния неразличимы по соответствующей проверке, 1 – в противном случае. В соответствии с сокращенным алгоритмом выбора минимального набора диагностических признаков в матрице различимости выбирается строка с наименьшим количеством единиц. Из тех столбцов, которые в выбранной строке содержат единицу, выбирается столбец с максимальным количеством единиц. Проверка, соответствующая ему, заносится в искомое покрытие, а из матрицы различимости удаляются все строки, имеющие единицу на пересечении с этим столбцом, и сам столбец. Если несколько столбцов содержат максимальное (равное) количество единиц, из них выбирается один, стоимость соответствующей проверки которого минимальна. Алгоритм повторяется до тех пор, пока в матрице различимости не будут удалены все строки.

Для решения задачи выбора минимального набора диагностических признаков для анализа состояния биомассы в системе анаэробной био-

Таблица 2

## Итоговая матрица состояний активности биомассы в анаэробном биореакторе

	p1	p2	p3	p4	p8
S0	1	1	1	1	1
S1	1	1	0	1	1
S2	1	1	0	0	1
S3	0	1	0	0	1
S4	0	0	0	0	1
S5	1	1	1	0	0
S6	0	0	1	0	0
S7	0	0	0	0	0
S8	0	1	1	1	1
S9	0	0	1	1	1
S10	0	1	0	1	1
S11	0	0	0	1	1
c(pi)	4	1	3	4	2

логической очистки сточных вод приведенный алгоритм был реализован в системе MATLAB. В результате на основании матрицы состояний (табл. 1) было получено тупиковое покрытие, оптимальное по стоимости проверок:

$$\Pi_T = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_8\}.$$

В минимальный набор диагностических признаков из 9 выбранных измеряемых параметров вошли 5, за счет чего итоговая матрица состояний (табл. 2) значительно упрощена, что без потери достоверности позволяет намного упростить и удешевить процесс мониторинга.

На основе матрицы состояний (табл. 2) упрощается построение гибкой программы анализа

технического состояния биомассы, позволяющей в процессе мониторинга системы анаэробной биологической очистки с минимальными затратами установить активность и жизнеспособность биомассы в биореакторе, а при наличии отказа – определить степень его влияния на работоспособность системы и выявить предполагаемую причину отказа. На основе этих данных системой поддержки принятия решения формируется соответствующее сообщение диспетчеру. Вовремя принятые меры по устранению отказа позволяют вернуть систему в работоспособное состояние, избежать аварийных ситуаций, обеспечить стабильную работу системы биологической очистки.

## Библиографический список

1. *Дмитриев А. К., Юсупов Р. М.* Идентификация и техническая диагностика / Министерство обороны СССР, 1987. 521 с.
2. *Копкин Е. В., Кравцов А. Н., Мышко В. В.* Анализ технического состояния космических средств. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. 190 с.
3. *Eder B., Schulz H* Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. Oeko-buch Vlg. + Versand, 2007. 238 p.
4. *Ключарев А. А., Фоменкова А. А.* Проектирование секционного анаэробного биореактора // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. № 34 (60). С. 95–100.

УДК 51-76:517.9

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-86-91

**А. А. Щеголева\***

студентка

**М. Д. Поляк\***

старший преподаватель

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## МОДЕЛЬ «ХИЩНИК-ЖЕРТВА С ПИТАНИЕМ»

Описана модель «хищник-жертва с питанием», основанная на системе уравнений Лотки-Вольтерра, с синтезом управления по методу АКАР. С помощью управления гарантируется достижение целевого значения по численности жертв. В статье рассмотрены основные особенности модели и приведены результаты компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** система уравнений Лотки-Вольтерра, метод АКАР, теория управления.

**A. A. Shchegoleva\***

Student

**M. D. Polyak\***

Senior Lecturer

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## PREDATOR-PREY MODEL WITH NUTRITION

In this article we review a predator-prey model with nutrition, based on the Lotka-Volterra equations with addition of adaptive control based on the ADAR method. Adaptive control guarantees that the target value for prey is achieved by the system. Behavior of the proposed model is studied and simulation results are provided.

**Keywords:** Lotka-Volterra equations, analytical design of aggregate regulators, control theory.

### Введение

Предложенная в начале XX века модель Лотки-Вольтерра [1], [2] описывает изменение популяции двух видов: хищников и жертв. Она представляет собой систему из двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \alpha_1 x_1 - \beta_1 x_1 x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -\alpha_2 x_2 + \beta_2 x_1 x_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – численность популяции жертв и хищников соответственно;  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  – положительные коэффициенты, влияющие на изменение популяций.

Система (1) является нелинейной и не может быть решена аналитически [3]. В связи с этим в данной работе для решения системы дифференциальных уравнений используется численный метод Эйлера. Обоснование выбора численного метода приведено в работе [4].

### Система Лотки-Вольтерра с питанием и управлением

Классическая модель «хищник-жертва» позволяет описать колебания численности жертв и хищников с течением времени. Однако такая модель не учитывает множества факторов, влияющих на эти колебания. В частности, в классической модели «хищник-жертва» предполагается, что для жертв всегда доступен неограниченный запас питания. В реальных биологических системах экспоненциальный рост численности вида возможен лишь на небольшом временном интервале и довольно быстро прекращается из-за достижения ограничения по объему доступного данному виду питания. Под питанием в этом случае понимается один или несколько ресурсов, необходимых биологическому виду для поддержания жизнедеятельности и размножения.

Существенный интерес при исследовании поведения динамических систем представляют переходные процессы, возникающие при изменении состояния системы и ее переходе из одно-

го устойчивого состояния в другое. Выделяют начальное состояние системы, в котором она находится в данный момент, и целевое состояние, в которое система должна перейти. Применение теории управления позволяет выяснить, какими должны быть условия для того, чтобы этот переход стал возможным, сколько времени он займет, будет ли новое состояние являться устойчивыми и т. д.

Для того чтобы системе (1) можно было задавать цель по численности жертв, необходимо заменить коэффициент  $\alpha_1$  на функцию питания  $\alpha_1(t)$ , которая будет регулировать питание жертв в зависимости от поставленной цели. Помимо достижения цели, управление должно удерживать заданное значение численности длительное время, то есть стремиться удержать систему в целевом состоянии. Для решения поставленной задачи добавим в систему (1) еще одно уравнение, которое будет описывать изменение объема питания, доступного для жертв:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \alpha_1(t)x_1 - \beta_1x_1x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -\alpha_2x_2 + \beta_2x_1x_2 \\ \frac{d\alpha_1(t)}{dt} = U(t) \end{cases}$$

где  $U(t)$  – некоторая функция, задающая управляющее воздействие.

### Синтез управления в системе

Для вывода функции управления  $U(t)$  применим метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления, автором которого является профессор А. А. Колесников [5], [6]. Введем новую макропеременную  $\psi(t)$  [7], отражающую разность между популяцией жертв  $x_1(t)$  и целевым значением  $x_1^*$ :

$$\psi(t) = x_1(t) - x_1^* \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0.$$

Введем промежуточную макропеременную для передачи управления:

$$\psi^{(I)}(t) = \alpha_1(t) - \varphi(x_1(t), x_2(t)).$$

Тогда

$$U(t) = -\frac{\psi^{(I)}}{T_1} - f_3 + \frac{d\varphi}{dt} \Big|_{f_3=0}, \quad \varphi(x_1, x_2) = \beta_1x_2 - \frac{1}{T_2} + \frac{x_1^*}{T_2x_1}$$

$$\frac{d\varphi(x_1, x_2)}{dt} = -\frac{x_1^*}{T_2x_1^2}f_1 + \beta_1f_2.$$

В общем виде система (1) с питанием примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = f_1 = \alpha_1(t)x_1 - \beta_1x_1x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = f_2 = -\alpha_2x_2 + \beta_2x_1x_2 \\ \frac{d\alpha_1}{dt} = f_3 + U(t) \\ f_3 = 0 \\ U(t) = -\frac{\psi^{(I)}}{T_1} - f_3 + \frac{d\varphi}{dt} \\ \psi^{(I)}(t) = \alpha_1(t) - \varphi(x_1(t), x_2(t)) \\ \varphi(x_1, x_2) = \beta_1x_2 - \frac{1}{T_2} + \frac{x_1^*}{T_2x_1} \\ \frac{d\varphi(x_1, x_2)}{dt} = -\frac{x_1^*}{T_2x_1^2}f_1 + \beta_1f_2 \end{cases} \quad (2)$$

Детальный вывод управления для данной системы рассмотрен в работе [4].

### Решение системы с управлением

Для решения системы (2) применим метод Эйлера. Введем некоторые ограничения, при которых система будет считаться стабильной:  $\varepsilon_1 = 10^3$  (критерий устойчивости системы),  $\varepsilon_2 = 0.95 * x_1^*$  (критерий достижения цели), минимальное количество отсчетов при котором сохраняется целевое значение для численности жертв  $n_{\min} = 5$ . Начальное значение питания  $\alpha_1(0) = 0$ . Величину шага в методе Эйлера примем равной  $h = 0.1$ .

На рис. 1 показана идеально сбалансированная система. Достигается и сохраняется целевое значение численности жертв, количество хищников незначительно уменьшается, питание постоянно. Фазовый портрет этой системы представлен на рис. 2. На рис. 3 показано изменение макропеременной  $\psi(t)$ , которая стремится к нулю, что подтверждает корректную работу управления и успешное достижение целевого значения. Стоит заметить, что на рис. 1–3 видно, как в самом начале численность жертв становится меньше, что приводит к уменьшению количества хищников, после чего начинается рост численности жертв. Это объясняется тем, что хищники съедают жертв и сами начинают вымирать от голода, поскольку численность жертв для та-

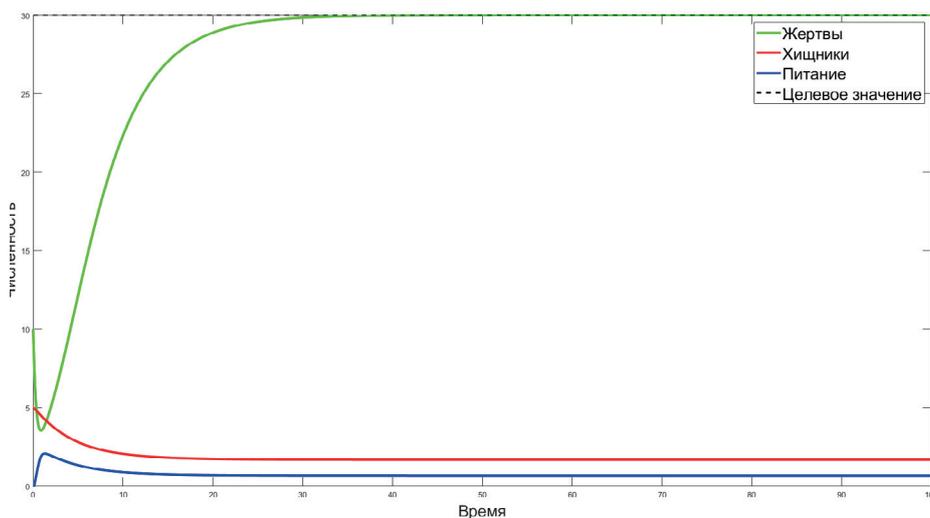


Рис. 1. Сбалансированная система:

$$x_1(0) = 10, x_2(0) = 5, \alpha_2 = 0.15, \beta_1 = 0.4, \beta_2 = 0.005, T_1 = 1.5, T_2 = 5, x^* = 30$$

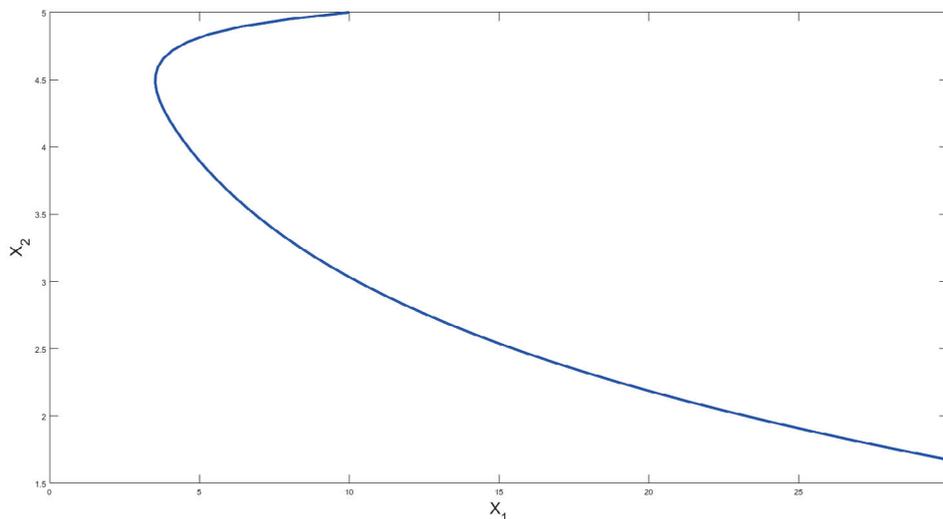


Рис. 2. Фазовый портрет решения системы уравнений «хищник-жертва с питанием»

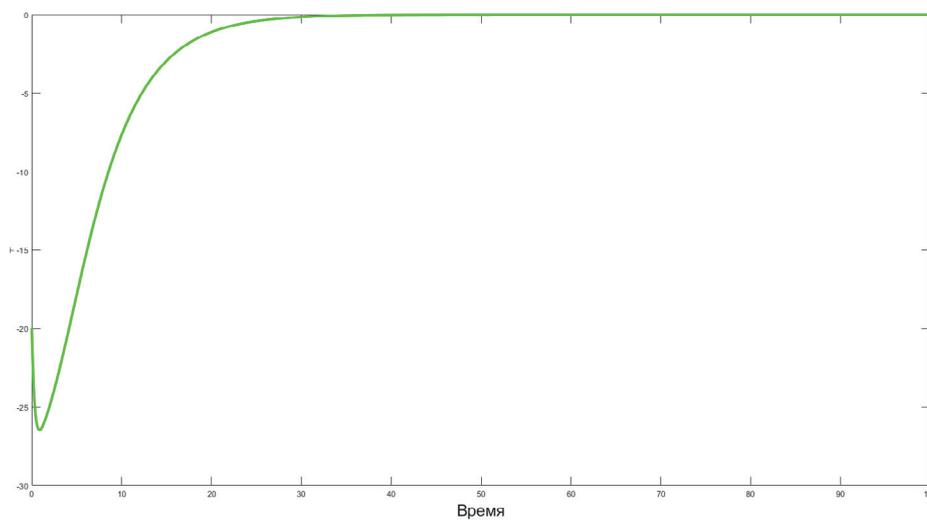


Рис. 3. Вид функции  $\alpha_2 = 0.15, \beta_1 = 0.4, \beta_2 = 0.005, T_1 = 1.5, T_2 = 5, x^* = 30$

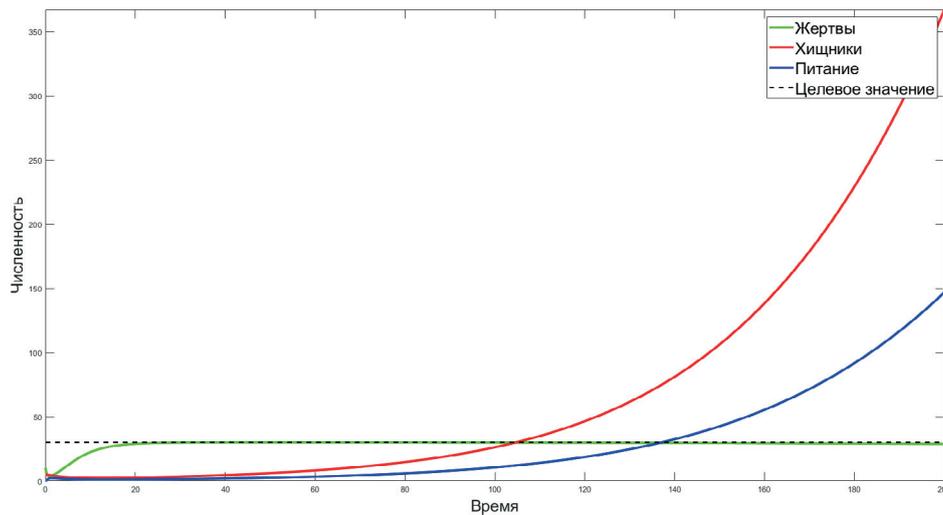


Рис. 4. Экспоненциальный рост численности хищников:  
 $x_1(0) = 10, x_2(0) = 5, \alpha_2 = 0.15, \beta_1 = 0.4, \beta_2 = 0.006, T_1 = 1.5, T_2 = 5, x^* = 30$

кого количества хищников слишком мала. Управление питанием увеличивает численность жертв до целевого значения, одновременно с этим уменьшение численности хищников останавливается, система оказывается в равновесии.

При изменении в этой модели одного параметра (например, увеличение коэффициента рождаемости хищников на 0.001) система переходит в менее устойчивое состояние (рис. 4), так как начинается экспоненциальный рост численности хищников. С биологической точки зрения такое поведение объяснимо. Хищники при постоянном питании, не имея других конкурентов, начинают активно размножаться, быстро увеличивая свою численность. Питание также растет, удерживая значение численности жертв в заданном целевом значении, то есть управление постоянно корректируется для перевода макропеременной  $\psi$  к нулю ( $\psi = 0$ ).

Ситуацию, когда популяция хищников экспоненциально растет, можно отнести к недостаткам системы, поскольку увеличение коэффициента рождаемости хищников делает систему менее устойчивой в соответствии с заданными ранее критериями.

### Исследование зависимости между параметрами

Значения коэффициентов  $T_1$  и  $T_2$  влияют на продолжительность переходного процесса [5]. Увеличение значений этих коэффициентов приводит к увеличению длительности переходного

процесса, как показано на рис. 5 (при соблюдении критериев устойчивости). При  $x_1^* = 2$ , на представленных на рис. 5 графиках хорошо видно, что заданная цель достигается, однако численность хищников к определенному моменту времени (в зависимости от значений  $T_1, T_2$ ) становится близкой к нулю, что неестественно в природе. При крайне малых значениях численности хищников и количества питания популяция жертв не изменяется, поскольку нет прироста жертв за счет питания и их убывания за счет съедания хищниками. Поскольку естественную смертность жертв данная система не учитывает, численность жертв остается равной целевому значению.

Для определения возможной зависимости значений коэффициентов  $T_1, T_2$  от шага  $h$  были исследованы системы с различными коэффициентами  $a_1, \beta_1, \beta_2$  и целевыми значениями  $x^*$ . Для каждой из них были найдены массивы значений по следующему принципу: для каждого шага  $h$  находились значения  $T_2$  (от минимального до 1), для каждого найденного значения  $T_2$  находилось минимальное  $T_1$ , при которых система была стабильна согласно критериям устойчивости.

На рис. 6 представлена явная зависимость между значениями параметров  $T_1, T_2$  и  $h$ , при которых система находится в устойчивом состоянии. Следует отметить, что такие результаты были получены не для всех исследованных систем. При некоторых комбинациях значений параметров  $a_1, \beta_1, \beta_2$ , целевого значения  $x^*$  и начальных условий в данных появляется заметное число выбросов, то есть незначительное изменение одного из параметров  $T_1, T_2$  или  $h$  при-

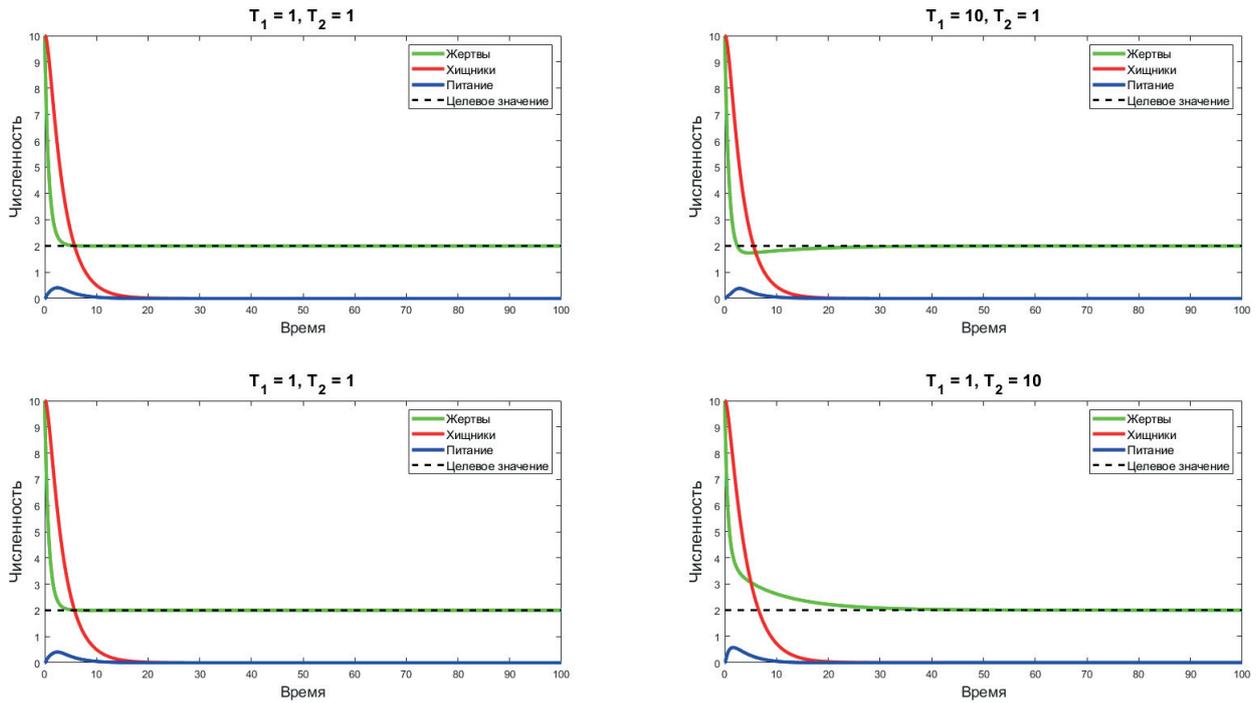


Рис. 5. Поведение системы при различных значениях параметров  $T_1$  и  $T_2$ :

$$x_1(0) = 10, x_2(0) = 10, \alpha_2 = 0.4, \beta_1 = 0.1, \beta_2 = 0.04, x^* = 2$$

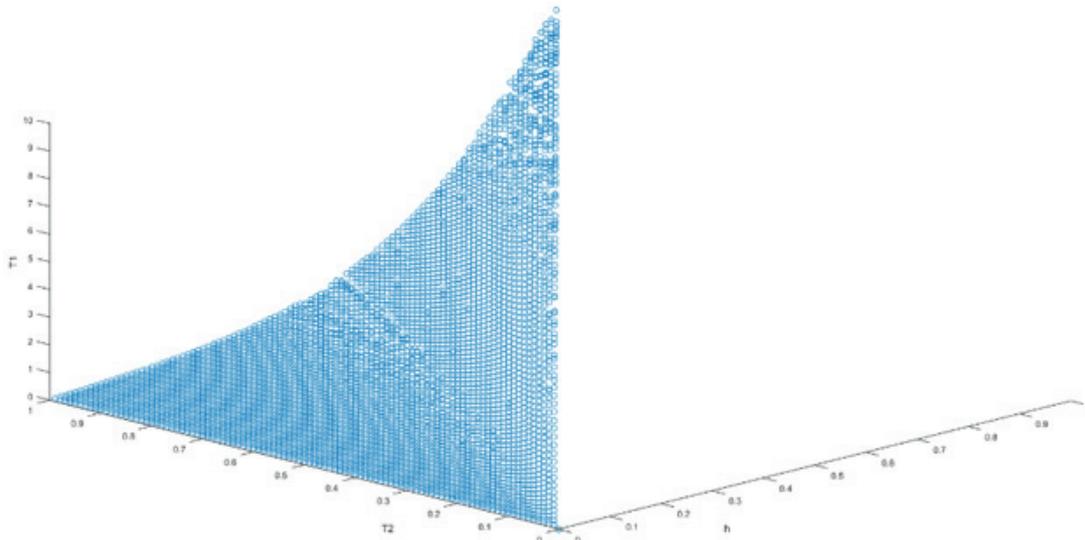


Рис. 6. Зависимость между параметрами  $T_1, T_2$  и шагом  $h$

водит к существенным изменениям остальных. Этот факт, вероятнее всего, вызван погрешностями при решении системы дифференциальных уравнений методом Эйлера.

Исходя из полученных данных можно сделать следующий вывод:  $T_2 > h, T_1 > h$ . Это усло-

вие выполняется для всех исследованных систем. Также можно сказать, что для значений  $h \in [0.01; 0.1]$  минимальные значения  $T_1, T_2$  близки к значениям  $h$ . Полученные данные могут помочь при построении моделей на основе системы «хищник-жертва с питанием».

## Заключение

Применение теории синергетического управления позволяет решать задачи прогнозирования возникновения желательных и не желательных ситуаций в сложных био- и экосистемах, например, при построении систем поддержки принятия решений в экологии, оценке воздействия на окружающую среду и др. Рассмотренная модель «хищник-жертва с питанием» может быть применена для решения практических задач, поскольку является в меру устойчивой при различных целевых значениях и начальных условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 20-08-00747

## Библиографический список

1. *Lotka A.* Contribution to the Theory of Periodic Reaction // *The Journal of Physical Chemistry A.* 1910. N 3. P. 271–274.
2. *Volterra V.* Variations and Fluctuations of the Number of Individuals in Animal Species living together // *ICES Journal of Marine Science.* N 3. 1928. P. 3–51.
3. *Поляк М. Д.* Влияние случайных возмущений на решение системы уравнений Лотки-Вольтерра // *Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в 3 ч. Ч. II. Технические науки.* СПб.: ГУАП, 2013. С. 140–144.
4. *Shchegoleva A.* The mathematical model of the biological system “predator-prey with food” // *Bulletin of the UNESCO department “Distance education in engineering” of the SUAI: Collection of the papers.* 2020. N 5. P. 112–117.
5. *Колесников А. А.* Синергетика и проблемы теории управления. М.: Физматлит, 2004. 504 с.
6. *Колесников А. А., Колесников Ал. А., Кузьменко А. А.* Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2016. № 10. С. 657–669.
7. *Колесникова С. И.* Синтез управления нелинейным объектом второго порядка с неполным описанием // *Автоматика и телемеханика.* 2018. № 9. С. 18–30.

УДК 519.61:511-33

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-92-96

Ю. Н. Балонин\*

инженер

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ПОИСК СИММЕТРИЧНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ МАТРИЦ АДАМАРА С ТРЕМЯ БЛОКАМИ (ПРОПУСОВ) ДО 188 ПОРЯДКА ВКЛЮЧИТЕЛЬНО

Рассмотрена задача изучения матриц Адамара в четырехблочной конструкции с парой равных блоков конструкции Пропус (трехцикл). Предложен алгоритм, основанный на поиске пар последовательностей с заранее известной хэш-функцией в массиве, имеющем древовидную организацию. Созданный на основе алгоритма программный комплекс позволил найти редкие Пропусы порядка 188.

**Ключевые слова:** ортогональные матрицы, квазиортогональные матрицы, матрицы Адамара, массивы Балони-на-Себерри, циклические матрицы, симметричные матрицы, блочные матрицы.

Y. N. Balonin\*

Engineer

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## SEARCH FOR SYMMETRIC ORTHOGONAL HADAMARD MATRICES WITH THREE BLOCKS (PROPUSES) UP TO ORDER 188 INCLUSIVE

The problem of studying Hadamard matrices in a four-block construction with a pair of equal blocks of the Propus (three-cycle) construction is considered. An algorithm based on searching for pairs of sequences with a known hash function in a tree-like array is proposed. The software package created on the basis of the algorithm made it possible to find rare Propuses up to order 188 inclusive.

**Keywords:** orthogonal matrices, quasi-orthogonal matrices, Hadamard matrices, Balonin-Seberry arrays, cyclic matrices, symmetric matrices, block matrices.

### Введение

Практический интерес к ортогональным и квазиортогональным матрицам обусловлен их применением во многих приложениях вычислительной математики, теории кодирования, цифровой обработки сигналов.

Эти и другие применения стимулировали интерес к обобщенным теориям ортогональных базисов и новым системам функций.

Для многих приложений цифровой обработки сигналов важным требованием является простота, то есть конечность множества значений функций ортонормированных систем [1], [2].

В данной статье рассматриваются методы поиска матриц Адамара с тремя блоками (Пропусов).

Матрица Адамара  $H$  – квадратная матрица порядка  $n$  с элементами  $\{1, -1\}$  и ортогональными столбцами  $H^T H = H H^T = nI$ , где  $I$  – единичная матрица. Ввиду жестких ограничений на значения элементов, порядок матриц Адамара может

быть равен только 1, 2 или  $4t$ ,  $t=1, 2, 3, \dots$  (целое число) [3]. Кроме того, известно, что определитель этих матриц максимален по своей абсолютной величине на классе матриц с элементами, не большими 1 по своему абсолютному значению.

У циклических матриц Адамара (моноциклов) все строки образованы сдвигом верхней строки вправо, с подстановкой вытесняемых элементов слева.

Моноциклы слишком просты, чтобы охватить большие порядки. Заметно лучшие результаты дает парная конструкция с циклическими блоками  $A, B$ :

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B^T & -A^T \end{bmatrix}$$

Бицикл Адамара состоит из двух моноциклов, иными словами, – блоки  $A, B$  состоят из циклически смещаемых первых строк  $a$  и  $b$  каждого блока (орнамент «косой дождик») (рис. 1).

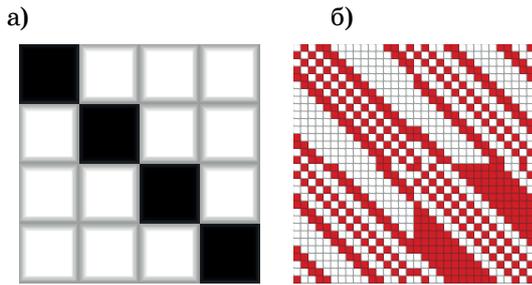


Рис. 1. Моноциклическая (а) и бициклическая (б) матрицы Адамара



Рис. 2. Трехциклическая матрица Адамара (Пропус)

Четырехблочная структура обобщает двухблочную, являясь, по сути, комбинацией двух бициклов с блоками **A**, **B** и **C**, **D** (рис. 2). Хитрость заключается в том, что мы «экономим» на одной матрице, приняв положение, что **B=C**. Такая конструкция называется Пропус («близнецы» **B=C**). По аналогии с матрицами Вильямсона **A**, **B**, **C**, **D** Пропусами предложено называть блоки **A**, **B=C**, **D**, а массив в целом – массивом Балонина-Себерри (Balonin-Seberry array) [4]. Пропусы возникли при наблюдении близких к матрицам Адамара **H** критических матриц [5]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}=\mathbf{C} & \mathbf{C}=\mathbf{B} & \mathbf{D} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} & -\mathbf{A} & -\mathbf{B} \\ \mathbf{B} & -\mathbf{A} & -\mathbf{D} & \mathbf{C} \\ \mathbf{D} & -\mathbf{C} & \mathbf{B} & -\mathbf{A} \end{bmatrix}$$

Число элементов  $-1$  в блоках определяется как полуразность между значением размера блока  $v=n/4$  и корнями целочисленного квадратного уравнения Лагранжа:

$$x^2+2y^2+z^2-n=0, k_1=(v-x)/2, k_2=(v-y)/2, k_3=(v-z)/2.$$

### Алгоритм поиска Пропусов

Условие ортогональности  $\mathbf{H}^T\mathbf{H}=\mathbf{H}\mathbf{H}^T=n\mathbf{I}$  сводится к уравнению для блоков  $\mathbf{A}\mathbf{A}^T+\mathbf{B}\mathbf{B}^T=n\mathbf{I}$ , его можно упростить до  $\mathbf{A}\mathbf{a}+\mathbf{B}\mathbf{b}=\mathbf{e}$ ,  $\mathbf{e}=(1, 0, 0, \dots, 0)^T$ , где правые множители  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  – транспонированные вектор-строки размера  $v=n/2$ . В силу симметрии матриц слагаемых достаточно фиксировать равенство  $[\mathbf{A}\mathbf{a}]=-[ \mathbf{B}\mathbf{b}]$ , где скобками выделена половина  $z$  элементов последовательности без учета самого первого элемента [6].

Компьютерный поиск бициклов сводится к составлению обширной таблицы строк  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  совместно с усеченными произведениями  $[\mathbf{A}\mathbf{a}]$  и  $[\mathbf{B}\mathbf{b}]$ . Векторы  $\mathbf{A}\mathbf{a}$  и  $\mathbf{B}\mathbf{b}$  имеют симметрию вида  $[v, 1, 2, 3, 4, 3, 2, 1]$ . Произведение циклического блока на вектор легко вычислить без явного построения блока, так как элементы каждой строки его повторяются со смещением, пропорциональным номеру строки.

Таблица в  $ms=1000$  строк допускает  $1000 \times 1000=1000000$  попарных сравнений  $[\mathbf{A}\mathbf{a}]$  и  $-[\mathbf{B}\mathbf{b}]$ , если мы намерены сравнивать значения замка и ключа на тождество элементов. Таким образом, время поиска пары подходящих друг к другу последовательностей растет в квадратичной зависимости от числа накопленных последовательностей. Поиск можно ускорить, разбив таблицу на подтаблицы (ветви).

Разбиение таблицы кросс-линков на ветви использует нечто вроде контрольной суммы  $N$  для произведения  $ma=\mathbf{A}\mathbf{a}$  (и  $\mathbf{B}\mathbf{b}$ ), которая изменяется от 0 до  $M$ . Это и есть номер ветви  $0 \leq N \leq M$ .

Пусть  $ma=\mathbf{A}\mathbf{a}=[40, -2, 3, -5, 2, 8]$ . Первая цифра неинтересна, там всегда порядок. Если мы запишем то, что меньше или равно 0, положительные значения, заменив 1, тогда строчка имеет вид  $ma=[0, 0, 1, 0, 1, 1]$ . Это двоичное число, которое мы можем перевести в десятичное, суммируя разряды с весами  $ma=[0, 0*1, 1*2, 0*4, 1*8, 1*16..]$ , имеем  $N=1*2+1*8+1*16=26$ -я ветка.  $N \leq M=2^m-1$ ,  $m$  – длина кода. Таким образом, две матрицы  $\mathbf{A}\mathbf{a}$  и  $-\mathbf{B}\mathbf{b}$  с одинаковым  $N$  будут иметь одинаковые знаки элементов.

Ветвь таблицы (подтаблица) заполняется последовательностями с одинаковой контрольной суммой, число ветвей соответствует  $M$ . При поиске подходящих друг к другу пар последовательностей перебираются только элементы внутри ветви.

Обобщение алгоритма на *трехциклы* (Пропусы) состоит в поиске не двух, а трех подходящих друг к другу последовательностей –  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{d}$ . Условие ортогональности матриц-Пропусов сводится к равенству  $[\mathbf{A}\mathbf{a}+\mathbf{D}\mathbf{d}]=-[2\mathbf{B}\mathbf{b}]$  [7]. Дополнительным условием является соответствие после-

довательностей  $[Aa]$  и  $[Dd]$  правилу соответствия по модулю 8 [8].

У последовательностей  $[Aa]$  и  $[Dd]$  отбрасываем знак и берем по модулю 8, получаются значения 1, 3, 5, 7 (нечетные). Пусть 1 и 7 означает 1; 3 и 5 означает 0. Получаем двоичный адрес последовательности  $a$  или  $d$ . Если адреса  $a$ ,  $d$  совпадают, то они становятся кандидатами на сравнение с  $b$ .

### Программный комплекс для поиска трехциклических матриц Адамара

Комплекс состоит из двух программ. Первая накапливает исходные данные для поиска. Вторая осуществляет поиск ортогональных матриц с использованием накопленных пар последовательностей.

Функциональное назначение программы «Накопление пар ортогональных последовательностей для поиска симметричных ортогональных матриц Адамара с тремя блоками (Пропусов)» заключается в создании базы последовательностей для эффективного поиска ортогональных трициклических матриц семейства Адамара.

Программа используется вместе с программой генерации симметричных ортогональных матриц Адамара с тремя блоками (Пропусов) на базе предварительного поиска части последовательностей данной программой. Две программы ищут три подходящие друг к другу последовательности  $a$ ,  $b$  и  $d$  (от которых зависит матрица с тремя блоками, называемая Пропус). Факт совместимости пары последовательностей легко констатируется размещением их на одной и той же ветви дерева поиска с адресом, формируемым по их аперриодическим автокорреляционным функциям (PAF).

Первая программа генерирует последовательности  $a$ ,  $d$  и ищет совместимые пары путем размещения их на первом дереве в памяти компьютера, а также записывает сформированные последовательности, сортируя их по новым адресам второго дерева (для поиска  $b$ ) на диск. Накопление пар ортогональных последовательностей происходит в несколько этапов:

1) генерируются последовательности  $a$  с заранее известным числом элементов со значением  $-1$ , равным  $k_1$ ;

2) отфильтрованные последовательности размещаются на дереве поиска на ветвях с адресами, вычисленными с помощью алгоритма (хэш-функции) на основе противопоставления остатков 3, 5 остаткам 1, 7 от абсолютных значений

периодической автокорреляционной функции (PAF(a)=[Aa]) по модулю 8. Данное дерево может быть записано на диск для последующего восстановления, если утеряны данные при выключении программы.

Из-за особенностей организации памяти каждая ветвь дерева имеет фиксированную емкость. По этой причине, если сгенерированная последовательность должна попасть в уже заполненную ветвь, она теряется.

На начальном этапе генерации потерь последовательностей не происходит; когда процесс генерации дерева близится к концу, часть ветвей упирается в свой предел, часть сгенерированных последовательностей начинает теряться; обычно процесс заполнения дерева обрывается (вручную) на отметке в 99–99,9 %; поскольку дополнительные 0,1 % последовательностей ускорят поиск пар  $(a, d)$  лишь на 0,1 %, а заполняться последние 0,1 % массива будут дольше, чем первые 99,9 % (из-за отбрасывания большей части последовательностей).

Каждая ячейка массива хранит саму последовательность  $a$ , полную хэш-функцию от функции PAF(a)=[Aa] – двоичное число, в котором элементы, абсолютное значение которых кратно 1 или 7 по модулю 8, обозначаются как 1, иначе 0. Номер ветви представляет собой остаток от деления этой полной хэш-функции на число ветвей (кратное степени двойки, чтобы для получения остатка можно было воспользоваться не операцией деления, а операцией «логическое и»).

Процесс формирования дерева может быть прерван по желанию пользователя, промежуточные результаты при этом сохраняются в файл, и процесс может быть возобновлен с той точки, на которой был остановлен;

3) генерируются и отфильтровываются последовательности  $d$  с числом элементов  $-1$ , равным  $k_3$ , и происходит поиск соответствия на дереве последовательностей для  $a$ : вычисляется полная хэш-функция от PAF(d); вычисляется ветвь дерева как остаток от деления полученного значения на число ветвей; соответствующая ветвь дерева прочесывается на предмет последовательности  $a$  с совпадающей хэш-функцией; если подобная пара найдена, она сохраняется, иначе генерируется новая последовательность  $d$ ;

4) найденные пары  $(a, d)$  помещаются в малый буфер в оперативной памяти, откуда периодически сбрасываются в неотсортированном виде на диск.

Буферизация данных на диске необходима, поскольку скорость алгоритма прямо пропорциональна размеру дерева; хранение найденных данных в оперативной памяти отнимет про-

странство у дерева; поэтому в памяти организован лишь небольшой буфер, для буферизации записи данных на диск.

Общее число накапливаемых пар  $(a, d)$  должно примерно в 1,5 раза превосходить вместимость итоговой (сортированной) таблицы, учитывая неизбежные потери при формировании такой таблицы;

5) из памяти удаляется первое дерево (последовательностей  $a$ ), освобождая память для второго (дерева пар последовательностей  $(a, d)$ );

6) сохраненные последовательности  $(a, d)$  считываются с диска и размещаются на ветвях второго дерева с помощью алгоритма вычисления адреса (второй хэш-функции) исходя из значений суммарной  $PAF(a, d) = PAF(a) + PAF(b)$ , записываются на диск. Эта операция позволит второй программе искать совместимые пары по правилу  $PAF(a, d) = -2PAF(b)$ .

Двойная обработка (генерация и последующая сортировка) дерева пар  $(a, d)$  необходима, поскольку формируемая таблица может находиться только в оперативной памяти, не в файле (из-за непоследовательного доступа к ячейкам таблицы). Если хранить в памяти два дерева (последовательностей  $a$ , необходимое для генерации, и формируемое дерево пар  $(a, d)$ ), – объем каждого из них окажется равным половине объема памяти; в итоге сформируется слишком малое дерево пар  $(a, d)$ ; в то время как скорость работы программы поиска пропорциональна объему дерева. Можно раздуть дерево для  $(a, d)$  за счет уменьшения дерева для  $a$ ; однако скорость генерации последовательностей  $(a, d)$  пропорциональна размеру дерева для  $a$ . Поэтому было принято решение разделить генерацию и сортировку пар  $(a, d)$ : дерево для  $(a, d)$  создается после удаления из памяти дерева для  $a$ , занимая собой фактически всю доступную память. В итоге формируется дерево максимального доступного размера.

Хэш-функция вычисляется на основе битовых операций над суммой  $PAF$ -функций  $PAF(a) + PAF(b)$ . Номер ветви, на которую помещается пара, получается остатком от деления на число ветвей (операция «логическое и», поскольку число ветвей представляет собой степень двойки). В ячейке таблицы сохраняются сами последовательности  $a$  и  $b$ , и полная хэш-функция от их  $PAF$ , но не сами  $PAF$ .

Сформированное дерево сохраняется на диске.

Второй компонент программного комплекса на основе предварительно сгенерированного дерева пар последовательностей  $(a, d)$  ищет совместимые последовательности  $b$ . Факт совместимости последовательностей легко констатирует-

ся размещением их на ветвях дерева поиска с адресами, вычисленными по периодической автокорреляционной функции ( $PAF$ ), опираясь на целевое правило  $PAF(a, d) = -2PAF(b)$ , где  $PAF(a, b) = PAF(a) + PAF(b)$ .

Алгоритм работы программы следующий:

1. Считывается подготовленное дерево удвоенных последовательностей  $(a, d)$ .

2. Программа начинает генерировать последовательности  $b$  с заранее определенным числом элементов  $-1$  равным  $k_2$ .

3. Для каждой сгенерированной последовательности вычисляется  $PAF(b)$  и хэш-функция от  $-2PAF(b)$ ; определяется ветвь дерева, на которой может содержаться соответствующая пара последовательностей  $(a, d)$ , путем получения остатка от деления хэш-функции на число ветвей.

4. Проверяется содержимое выбранной ветви с целью нахождения пары  $(a, d)$  с совпадающим значением хэш функции от  $PAF(a, d)$  (значение хэш-функции хранится в ячейке дерева).

5. Если совпадение найдено, это еще не гарантирует совпадение  $PAF$  (возможны последовательности с несовпадающими  $PAF$  и с совпадающими хэш-функциями от  $PAF$ ). Вычисляется значение  $PAF(a, d)$ , проводится проверка на соответствие целевому правилу  $PAF(a, d) = -2PAF(b)$ . Если совпадение найдено, результат выводится на экран и сохраняется на диске.

При вычислении  $PAF(a, d)$  затрачивается некоторое время, которое можно было бы не затрачивать, храня заранее вычисленное  $PAF(a, d)$  на дереве. Однако это привело бы к значительному перерасходу объема памяти, требуемой под одну ячейку (значения функции  $PAF$  не двоичные, для сохранения их элемента недостаточно бита, в отличие от двоичных последовательностей  $a$  и  $d$ ); снижение количества ячеек приведет к пропорциональному падению скорости поиска. Потери же времени на вычисление  $PAF(a, d)$  пренебрежительно малы ввиду того, что вероятность случайного совпадения хэш-функций всего  $1/2^{32}$ .

## Заключение

Разработан программный комплекс для поиска симметричных ортогональных матриц Адамара с тремя блоками (Пропусов) на основе алгоритма поиска по дереву.

Тестирование комплекса при доступных вычислительных ресурсах (1 Гб памяти и процессор Intel®Core™ тактовой частотой 2,4 ГГц) показало стабильное нахождение матрицы 188 порядка за время порядка 2 часов (из них ~1 час тратится на создание таблицы первой програм-

мой; осуществляемый второй программой поиск результатов на основе сформированной таблицы дает результат с частотой порядка 1 найденного решения в час).

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2020-0004.

### Библиографический список

1. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы локального максимума детерминанта // Информационно-управляющие системы. 2014. № 1 (68). С. 2–15.
2. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1 (80). С. 2–15.
3. Shalom E. La conjecture de Hadamard (I) – Images des Mathématiques, CNRS. 2012. URL: <http://images.math.cnrs.fr/La-conjecture-de-Hadamard-I.html> (дата обращения: 15.03.2017).
4. Balonin N., Seberry J. The Propus Construction for Symmetric Hadamard Matrices, arXiv:1512.01732 math.CO.
5. Sergeev A. Generalized Mersenne Matrices and Balonin's Conjecture // Automatic Control and Computer Sciences. 2014. Vol. 48. N 4. P. 214–220.
6. Balonin N., Balonin Y., Djokovic D. Construction of symmetric Hadamard matrices // Informatsionno-upravliaiushchie sistemy. 2017. N 5. P. 2–11.
7. Balonin N., Seberry J. Two infinite families of symmetric Hadamard matrices // Australian Journal of Combinatorics 2017. Vol. 69 (3). P. 349–357.
8. Куртяник Д. В. Алгоритмы поиска трехциклов. СПб.: ГУАП, 2020.

УДК 681.3.06: 519.68

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-97-99

**Д. В. Горелик\***

аспирант

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## MOSIX КАК СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ «ЭЛЬБРУС»

Для выполнения распределенных параллельных программ на кластерной вычислительной системе, построенной на базе процессоров «Эльбрус», предлагается использовать систему MOSIX. Это позволит получить систему с динамической миграцией процессов между узлами кластера и повысит скорость вычислений.

**Ключевые слова:** динамическое распараллеливание вычислений, операционная система «Эльбрус», параллельные вычисления, библиотека MPI, MOSIX.

**D. V. Gorelik \***

Postgraduate Student

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## MOSIX AS A SYSTEM OF DYNAMIC COMPUTATION PARALLELIZATION FOR ELBRUS

It is proposed to use the MOSIX system to execute distributed parallel programs on a cluster computing system based on Elbrus processors. This will allow you to get a system with dynamic migration of processes between cluster nodes and increase the speed of computations.

**Keywords:** dynamic parallelization of computations, Elbrus operating system, parallel computations, MPI library, MOSIX.

В современном мире мы наблюдаем рост производительности вычислительной техники. С каждым годом появляются новые более производительные процессоры, увеличивается частота работы оперативной памяти, появляются более быстрые жесткие диски. Развиваются архитектуры вычислительных систем, появляются новые алгоритмы и принципиальные подходы к организации вычислений. Взять, например, наши отечественные процессоры «Эльбрус» компании МЦСТ, разработанные на архитектуре Very Long Instruction Word, они развиваются семимильными шагами. Сейчас проводится эксперимент по запуску на 8-ядерном процессоре «Эльбрус-8С» современных игр, использующих движок Dagor 6.0. Это говорит о том, что наша вычислительная техника выходит на совершенно новый уровень и продолжает догонять современные зарубежные аналоги. Но с каждым разом решать задачу путем усовершенствования аппаратных ресурсов становится все труднее и труднее, очень активно развивается направление параллельных программ.

Большой популярностью пользуется средство для написания таких программ, как Message Passing Interface (MPI) [1]. Такой ин-

струмент помогает реализовать в кластерных системах создание и распараллеливание данных и задач между узлами – процессами параллельных программ. Сама параллельная программа являет собой множество процессов, которые выполняются на разных вычислителях в системе – это может быть как и соседний процессор на сервере, так и соседний вычислительный узел – процессор на другом сервере или рабочей станции. По сути, MPI ориентирован на передачу информации в кластерных системах, где немалое количество узлов заняты выполнением расчетов одной программы. В арсенале MPI большинство инструментов (к примеру, MPI\_Barrier) осуществляет синхронизацию узлов кластера; MPI\_Send применяется для передачи сообщений другому узлу, а MPI\_Recv – для приема. В наборе инструментов также есть функции, дающие возможность разбивать вычисления, обходя моменты ожидания доставки данных на другие узлы кластерной системы.

Из минусов у MPI можно выделить следующие позиции: в составе библиотеки отсутствуем механизм балансировки нагрузки, отказоустойчивость системы в процессе выполнения программы. Поэтому при использовании MPI необ-

ходимо учитывать принцип статического распараллеливания. Рассмотрим программу для построения высококачественных трехмерных изображений POV-Ray [2] и ее вариант, использующий MPI для организации распределенных вычислений. Применяя динамическое распараллеливание, разработчики добились того, что один из узлов получает роль управляющего кластерной системой. Управляющий берет на себя обязанности распределения задач между вычислителями. Вычислитель отправляет запрос управляющему и в ответ получает задание на вычисление участка трехмерного изображения. В результате работы управляющий узел от вычислителя получает результат, затем по требованию выдает новое задание.

MPI несовершенна, так как очень затрудняет разработку программы, в основе которой – вычислительный граф с неизвестными временными задержками. При всех плюсах и возможностях библиотеки MPI [1] она в свою очередь затрудняет разработку параллельных программ для существенно неоднородной вычислительной среды, а по сути, каждая среда индивидуальна. Отсутствие описания динамической балансировки вычислительной нагрузки говорит о том, что при написании программы необходимо продумать механизмы динамической балансировки, иначе эффект ускорения вычислений будет потерян. Альтернативным подходом к созданию параллельных программ является автоматизированное динамическое распараллеливание [3].

Основная идея динамического распараллеливания программы состоит в распределении вычислительной нагрузки, синхронизации процессов и передаче данных, протекающих автоматически. Появление инструментов, способных организовать кластерные вычисления для популярных операционных систем, не заставило себя долго ждать. Но не все так просто, есть определенный ряд недостатков: при написании программы разработчику самостоятельно нужно сформировать все параллельные фрагменты кода и обязательно следить за правильной синхронизацией выполняющихся процессов. Это становится очень неудобным; ведь когда тебе самому нужно следить за распределением памяти программы, жестко привязываться к конкретной архитектуре, теряется кроссплатформенность. Появляются большие неудобства при обновлении системы, требуется большая переработка самой программы, подгоняя ее под новое «железо». Ни для кого не секрет, что постоянно ведутся разработки новых алгоритмов и принципиальных подходов с целью достижения мобильности параллельных программ. Самым

важным является управление общими ресурсами и их распределением.

Система MOSIX – яркий представитель таких систем. После компиляции с ядром Unix-подобных операционных систем MOSIX обеспечивает миграцию по узлам кластера процессов, построенных с использованием стандартных методов их порождения. Эта система как бы позволяет расширить ядро операционной системы Linux, добавив в нее необходимые инструменты миграции. Таким образом, используя весь арсенал MOSIX, мы получаем возможность управлять процессами, распределяя их между узлами кластера, и контроль над системой в целом [4].

MOSIX – это технология для кластерных вычислений. Она несет в себе адаптивный алгоритм, который распределяет ресурсы при масштабировании в кластерных системах любого размера. Эта система позволяет узлам кластера работать совместно, как единое целое. В первую очередь алгоритм, лежащий в ее основе, нацелен на рациональное распределение ресурсов путем миграции процессов между вычислителями. Таким образом, эффективное ускорение возникает из-за глобального распределения ресурсов кластера и динамической балансировки нагрузки на вычислители. Ярким примером является описанная в статье технология MOSIX – упрощенная форма данного алгоритма, используемая в кластерных вычислительных системах при отмене пользователем запросов на ресурсы кластера [5].

Среди явных преимуществ и особенностей MOSIX можно выделить принцип отсутствия централизованного управления. Отказываясь от него, система приобретает автономность, каждый узел перестает простаивать в ожидании задачи от управляющего, и при выходе из строя управляющего не теряется время на поиск нового. Получается динамически конфигурируемый кластер с изменяемым количеством вычислительных узлов на лету без перенастройки системы и остановки вычислений. Но есть и альтернативный вариант для повышения максимальной производительности кластерной системы – это статическое управление, которое также реализовано в MOSIX. В отличие от библиотеки MPI, где распределение задач между узлами конкретизируется, MOSIX имеет механизм миграции процессов между узлами системы. Важнейшим аспектом этих двух инструментов является возможность их совместного использования, тогда производительность системы с параллельной обработкой может быть увеличена.

Существуют несколько способов запуска процессов в кластере MOSIX. Одним из них яв-

ляется создание и конфигурация адаптивного пула. В этом случае серверный пул начинает включать в кластер рабочие станции при условии, что они в течение какого-то определенного времени не активны. И соответственно, исключать при их активации, когда кто-то начинает на них работать.

Второй способ дает возможность рабочей станции подключаться к кластеру только для запуска процессов. Такая конфигурация называется полудуплексным пулом. Имеются также пакетные конфигурации, в которых доступ к серверному пулу (кластеру MOSIX) возможен при помощи специальной программы, формирующей очередь запросов в едином каталоге. Нужно учитывать, что MOSIX будет бесполезен для аппаратно-зависимых программ, которым нужен прямой доступ к устройствам ввода/вывода узла кластера. Существует несколько способов установки этого инструмента распараллеливания, но нас интересует единственный подходящий для ОС «Эльбрус» – перекомпиляция ядра. После выполнения этой процедуры ядро переносится на другие узлы кластера, на каждом из которых меняются только сетевые установки.

Подводя итоги, нетрудно заметить, что в современных условиях скорость и результативность исследований и разработок по увеличению аппаратных мощностей вычислительной техники велики. Основной минус аппаратно-программного решения в его масштабах в физическом плане и дороговизне приобретения со-

временной аппаратуры. В свете вышесказанного очень перспективным видится адаптирование MOSIX для отечественного процессора «Эльбрус», имеющего очень высокий потенциал динамического распараллеливания вычислений.

### Библиографический список

1. Message Passing Interface Forum. MPI: A Message-Passing Interface Standard. URL: <http://www.mpi-forum.org/docs/mpil-report.pdf> (дата обращения: 25.11.2020).
2. The Persistence of Vision Ray Tracer, most commonly acronymed as POV-Ray, is a cross-platform ray-tracing program that generates images from a text-based scene description. URL: <http://www.povray.org/> (дата обращения: 27.11.2020).
3. *Васенин В. А., Водомеров А. Н., Инюхин А. В.* Средства автоматизированного динамического распараллеливания программ на основе сочетания императивных и функциональных механизмов // Информационные Технологии. 2007. № 5. 32 с.
4. MOSIX is a cluster management system that provides a single-system image. URL: [http://www.mosix.org/txt\\_about.html](http://www.mosix.org/txt_about.html) (дата обращения: 30.11.2020).
5. Технология Mosix: введение. URL: [https://www.opennet.ru/docs/RUS/mosix\\_spb/11.html](https://www.opennet.ru/docs/RUS/mosix_spb/11.html) (дата обращения: 5.12.2020).

УДК 004.921

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-100-104

**А. В. Никитин\***

кандидат технических наук, доцент

**Н. Н. Решетникова\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНЫХ ИНСТРУКЦИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ 3D-ПАНОРАМ

*Рассматривается применение технологии видео 360° и сферических панорам для создания инструкций сложных технических устройств, на примере пояснения принципов работы авиасимулятора FLY-Motion.*

**Ключевые слова:** виртуальная реальность, интерактивное погружение, сферическая панорама, видео 360°, симулятор движения, авиасимулятор FLY-Motion.

**A. V. Nikitin\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**N. N. Reshetnikova\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## DEVELOPMENT OF INTERACTIVE INSTRUCTIONS FOR COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS BASED ON 3D PANORAMAS

*The report discusses the use of video 360° technology and spherical panoramas for creating instructions for complex technical devices, by the example of explaining the principles of operation the FLY-Motion flight simulator.*

**Keywords:** virtual reality, interactive immersion, spherical panorama, video 360°, motion simulator, flight simulator FLY-Motion.

Одним из перспективных и активно развиваемых в настоящее время подходов к созданию контента для систем виртуальной реальности являются технология видео 360° и панорамная фотография, которые позволяют создавать связанные между собой панорамные видеоролики с различной степенью интерактивности, где зритель по своему желанию управляет ракурсом просмотра изображения, создавая «эффект присутствия» в точке съемки. Такие интерактивные видеоролики называют виртуальными турами [1], их можно смотреть как в шлеме виртуальной реальности – например, в Oculus Rift, Samsung Gear VR, HTC Vive или др. – при этом картинка изменяется в соответствии с поворотами головы пользователя, так и с помощью специального приложения, установленного на смартфоне. Возможен также просмотр виртуальных туров на дисплее персонального компьютера, тогда пользователь управляет ракурсом с помощью мыши или клавиатуры.

Существует большое количество виртуальных туров, которые имеют такие функциональные характеристики, как: переход по меткам

между 3D-панорамами, навигацию с помощью карты, текстовое описание, аудиосопровождение, переход на видео 360° [2], [3], использование для просмотра устройств виртуальной реальности.

В докладе рассматривается применение технологии видео 360° и сферических панорам для создания инструкций симуляторов движения с учетом перечисленных выше возможностей на примере объяснения принципов работы авиасимулятора FLY-Motion [4], [5].

Авиасимулятор ведения воздушных боев FLY-Motion – это результат сотрудничества итальянской компании Virtual emotion studios и компании АО «Вымпел» [6].

FLY-Motion представляет собой кабину «пилота», установленную на неподвижном основании (рис. 1).

Кабина вращается вокруг своих осей на 360° в четырех направлениях. Такая конструкция аппарата позволяет «пилоту» FLY-Motion ощутить реальность «полета»: «набирать высоту» и «пикировать», выполнять фигуры пилотажа (например, правую и левую «бочку», «крен» или

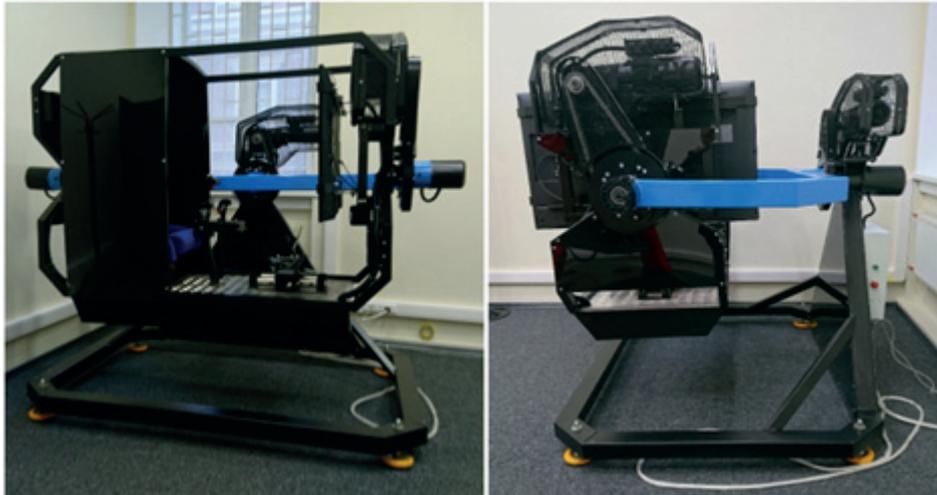


Рис. 1. Авиасимулятор Fly-Motion

«мертвую петлю»). Управление осуществляется с помощью джойстика авиационного типа.

Симулятор является электромеханическим устройством, которое приводится в действие двумя электромоторами, управляемыми встроенным компьютером с установленным на него специализированным программным обеспечением [7]. Такая конструкция позволяет пользователю ощутить динамику полета и перегрузки.

Симулятор представляет собой сборно-разборную конструкцию и состоит из следующих укрупненных узлов и модулей (рис. 2):

1 – неподвижное основание; 2 – вилка; 3 – кабина пилота; 4 – мотор-редуктор с тормозом; 5 – система управления симулятором (джойстик, рукоятка управления движением (РУД), педали); 6 – ящик с электроникой; 7 – персональный

компьютер (ПК); 8 – ящик с управляющим контроллером.

При разработке интерактивной инструкции (виртуального тура) по использованию авиасимулятора FLY-Motion потребовалось решение следующих задач:

- создание сценария последовательности действий при включении и запуске симулятора на основе инструкций по эксплуатации FLY-Motion [6];
- выбор аппаратных и программных средств, используемых при разработке виртуального тура, то есть инструкции, поясняющей принципы работы авиасимулятора;
- дополнительная проработка инструкций по эксплуатации FLY-Motion для отбора информации об элементах управления авиасимулятором;

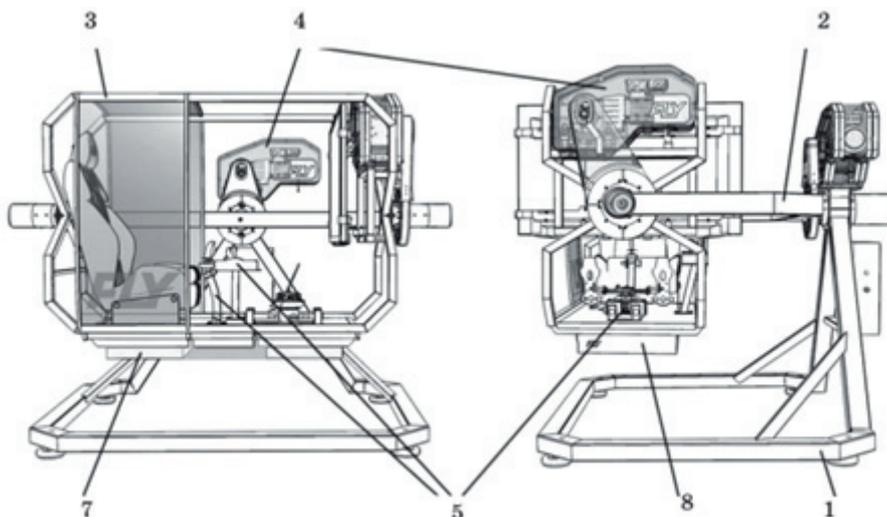


Рис. 2. Основные узлы авиасимулятора FLY-Motion

– создание текстового описания для каждого элемента управления, а также аудиосопровождения;

– съемка сферических 3D-панорам и видео 360°. Здесь необходимо уточнить, что для съемки действий внутри кабины при движении была разработана особая конструкция, чтобы закрепить неподвижно съемочную камеру, и проверена на практике надежность системы крепежа [5];

– сборка отснятых сферических 3D-панорам и видео 360° с подключением активных зон и необходимых информационных и звуковых фрагментов в программе разработки виртуальных туров. При разработке инструкции по работе с авиасимулятором FLY-Motion использовалась программа Pano2VR [8].

Также были определены функциональные характеристики разрабатываемой интерактивной инструкции для авиасимулятора, такие как:

- навигация и перемещение с помощью карты, на которой отмечены метки переходов;
- переход между сферическими панорамами с помощью прямой манипуляции через активные точки (hotspot);
- переход на видео 360°;
- демонстрация действий пользователя внутри кабины в движении,
- аудиофайлы, файлы текстового описания элементов управления;
- подсветка интерактивных элементов путем выделения активной области цветом или с помощью лого;

– осмотр панорамы на 360°, увеличение и уменьшение панорамы.

Определены требования к режимам работы инструкции [5]. Работа пользователя с инструкцией рассмотрена в двух случаях.

Первый случай, когда пользователь не получает инструкцию до того, как сел в кабину.

Этот режим работы предполагает, что находясь уже в кабине авиасимулятора, пользователь заходит через свое мобильное устройство, например, планшет с доступом в Интернет, на веб-страницу, на которой расположен виртуальный тур. Тем самым получает в режиме онлайн доступ к инструкции о принципах работы авиасимулятора, находясь непосредственно в кабине пилота.

Второй случай предполагает, что перед тем как сесть в кабину пилота пользователь предварительно получает интерактивную инструкцию и запускает ее у себя на персональном компьютере, на котором установлена программа Pano2VR [8], и уже через локальный сервер без доступа в Интернет заходит в браузер по адресу (localhost) и получает информацию по работе с авиасимулятором.

На рис. 3 показана структура взаимосвязей инструментов и форматов данных, используемых при разработке инструкции с применением 3D-панорам и видео 360°.

Примеры сферических панорам, полученных в ходе съемки на камеру RICOH Theta 360° [9], приведены на рис. 4, 5.

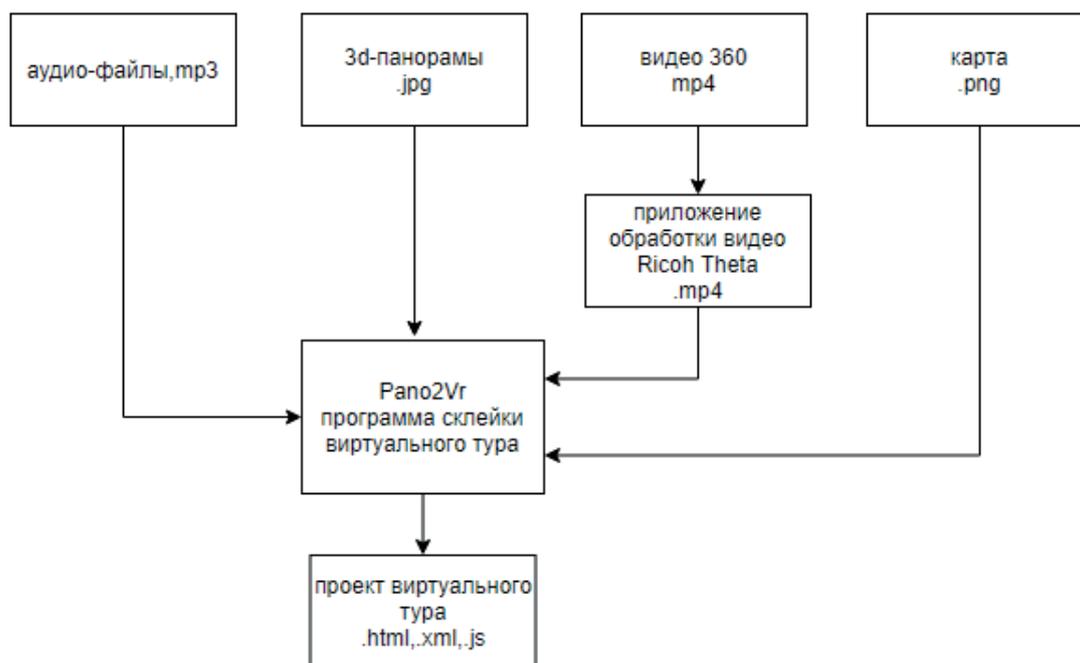


Рис. 3. Структура взаимосвязей инструментов и форматов данных

Для съемки видео 360° действий пользователя во время движения кабины необходимо было закрепить камеру уже не с помощью штатива, а сделать крепление на саму конструкцию кабины. После установки крепления можно было снимать видео в движении внутри кабины, не рискуя здоровьем пилота и техническим состоянием самой камеры.

После съемки и создания исходных материалов с учетом заявленных требований и функциональных характеристик был разработан экспериментальный прототип интерактивной инструкции (рис. 6) с возможностью подключения GearVR, который прошел экспериментальную

проверку в 2020 г. в рамках магистерской работы А. А. Успанова [5].

В заключение следует отметить, что практическое применение инструкций для симуляторов движения на основе 3D-панорам и видео 360°, наряду с непосредственным взаимодействием пользователя с устройством в процессе обучения позволяет оперативно создавать сценарии с различной детализацией элементов управления симуляторами движения, а также при изменении технических характеристик или конструкторских решений в кратчайшие сроки отснять необходимые 3D-панорамы и дополнить инструкцию новыми информационными материалами.

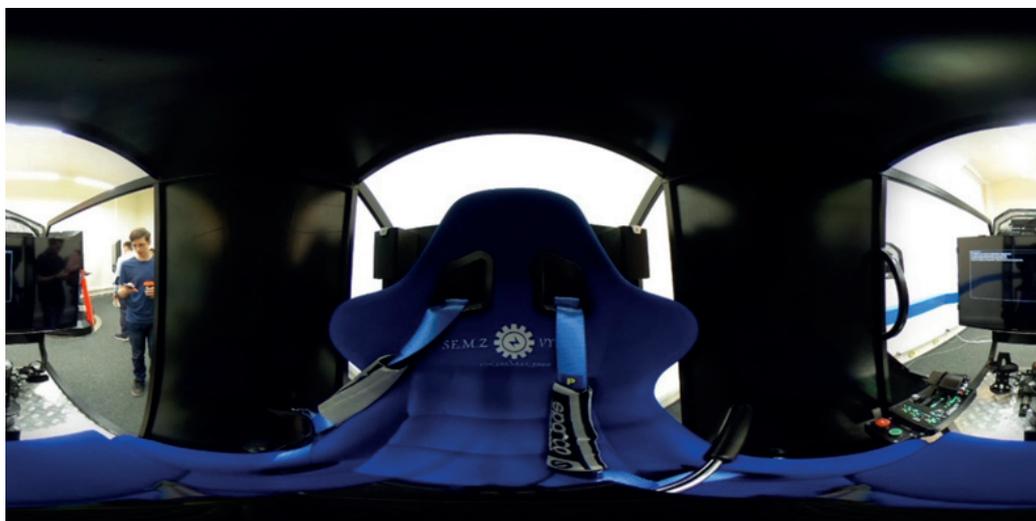


Рис. 4. Кресло пилота внутри кабины авиасимулятора FLY-Motion

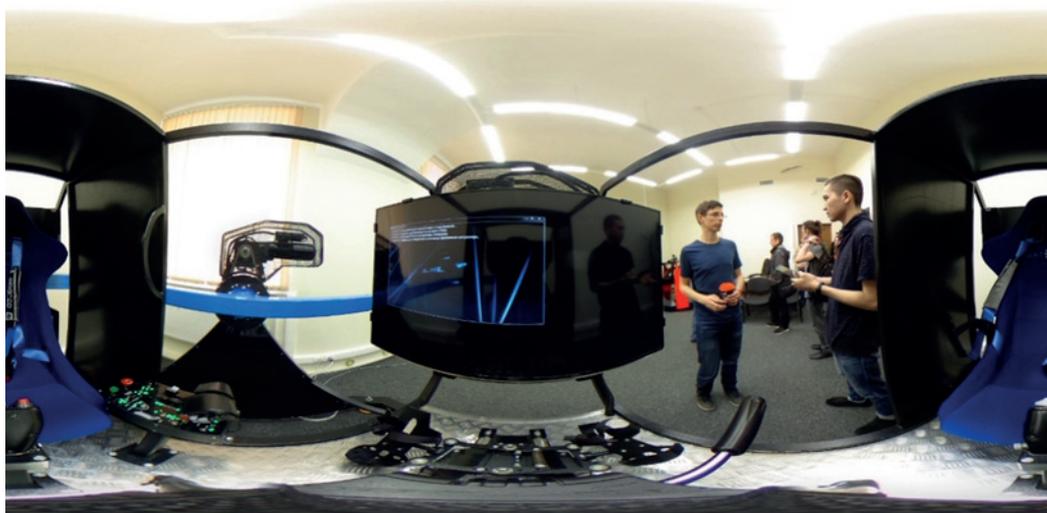


Рис. 5. Передняя часть кабины авиасимулятора FLY-Motion

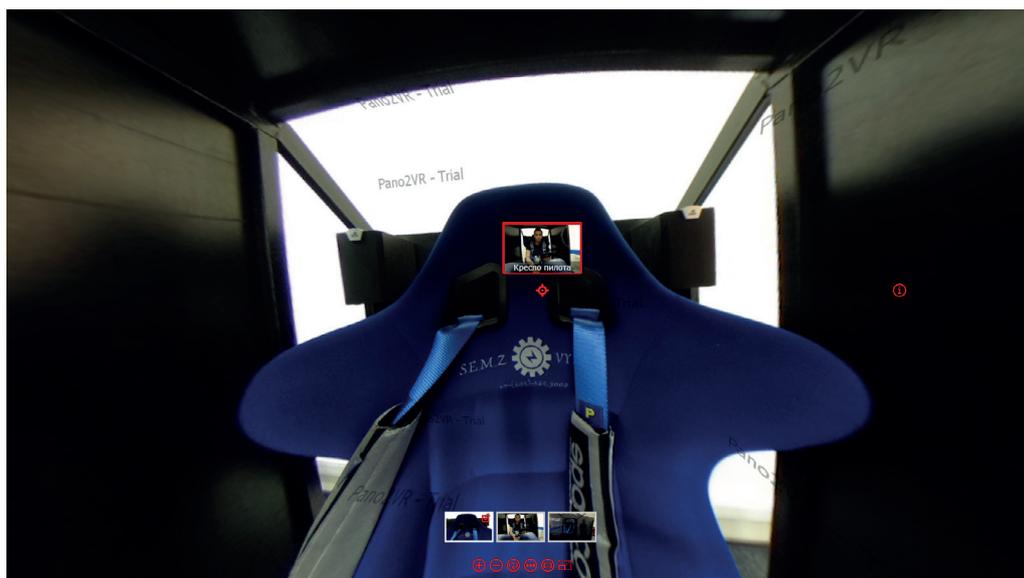


Рис. 6. Кресло пилота с активными метками переходов

### Библиографический список

1. Определение виртуального тура. URL: <https://www.techopedia.com/definition/4920/virtual-tour> (дата обращения: 13.12.2020).

2. Виртуальный тур комнаты контроля электричества. URL: <https://tripvr.ru/catalog/chapelcross-electrical-control-room/skinned> (дата обращения: 13.12.2020).

3. Виртуальный тур по космической станции. URL: [http://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/International\\_Space\\_Station/Highlights/International\\_Space\\_Station\\_panoramic\\_tour](http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station/Highlights/International_Space_Station_panoramic_tour) (дата обращения: 13.12.2020).

4. Методы и технологии интерактивного погружения: учеб. пособие / А. А. Никитин, А. В. Никитин, Н. Н. Решетникова и др.; под ред. А. В. Никитина. СПб.: ГУАП, 2015. 105 с.

5. Успанов А. А. Инструкция по эксплуатации на платформе Gear VR для авиасимулятора Fly Motion – ВКРМ. СПб.: ГУАП, 2020. 71 с.

6. Сайт компании «СЭМЗ Вымпел». URL: <http://kb-tk.ru/production/fly-motion/> (дата обращения: 13.12.2019).

7. Булгаков Д. А., Никитин А. В., Топчий А. С. Объектом исследования являются учебные тренажеры и симуляторы: лаб. практикум. СПб.: ГУАП, 2018. 102 с.

8. Pano2VR, документация и ссылка на продукт. URL: <https://ggnome.com/pano2vr> (дата обращения: 13.12.2020).

9. Ricoh Theta S, руководство пользователя. URL: <https://support.theta360.com/ru/manual> (дата обращения: 13.12.2020).

УДК 004.921

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-105-109

**А. В. Никитин\***

кандидат технических наук, доцент

**Н. Н. Решетникова\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## РАЗРАБОТКА ПРЕВИЗОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ РЕАЛЬНОСТЕЙ

Рассмотрены понятие, виды и цели разработки превизов. Дан обзор некоторых новых подходов создания, доставки и просмотра превизов на основе цифровых реальностей, включающих виртуальную и смешанную реальность (дополненная реальность и дополненная виртуальность).

**Ключевые слова:** превиз, виртуальная реальность, смешанная реальность, дополненная реальность, дополненная виртуальность, цифровые реальности.

**A. V. Nikitin\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**N. N. Reshetnikova\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## DEVELOPMENT OF PREVIS BASED ON DIGITAL REALITIES

The concept, types and goals of previs development are considered. An overview of some new trends in the creation, delivery and viewing of previs based on digital realities, including virtual and mixed reality (augmented reality and augmented virtuality), is given.

**Keywords:** previs, digital realities, virtual reality, mixed reality, augmented reality, augmented virtuality.

Одним из современных направлений при создании фильмов является разработка *превизов*, под которыми понимается «результат совместного создания предварительных версий кадров или их последовательностей, который использует 3D-инструменты анимации и виртуальное окружение. Это позволяет кинематографистам визуально исследовать творческие идеи, планировать технические решения и представлять общее видение для эффективного производства» [1], [2].

American Society of Cinematographers определяет следующие *виды превизов* [2].

– *Pitchvis* иллюстрирует потенциал проекта до его полного финансирования или запуска в производство. Как часть разработки, последовательности кадров являются концептуальными и могут уточняться или заменяться в ходе предварительного производства.

– *Technical Previs* (технический превиз) включает и генерирует точные параметры и расположение камеры, освещения, информацию о сцене с целью помочь определить производственные требования. Основная задача – определить, как могут быть выполнены определенные кадры, используя термины и измерения реального мира.

– *On-Set Previs* (начальный превиз) создает в реальном времени визуализацию на месте с целью помочь режиссеру, кинематографисту, разработчику визуальных эффектов и команде быстро оценить полученное изображение. Используются техники, позволяющие синхронизировать и комбинировать живую фотографию с 2D или 3D виртуальными элементами для немедленной визуальной обратной связи.

– *Postvis* (поствиз) комбинирует цифровые элементы и фотографию, чтобы проверить выбор отснятого материала, обеспечить исполнителю кадры для редактирования и усовершенствовать эффекты. Короткие фильмы, состоящие из поствиз-последовательностей, часто используются как для тестирования обратной связи с аудиторией, так и для продюсеров и поставщиков визуальных эффектов для планирования и составления бюджета.

Таким образом, в общем случае превиз предназначен для *решения следующих основных задач* [1]–[4]:

1) помощь режиссеру в объяснении продюсеру, инвестору и др. своего видения будущего фильма;

2) исследование возможности реализации идеи при заданных технических, финансовых и др. ограничениях;

3) предварительная оценка (планирование) сцен фильма – общая композиция, крупность планов, освещение, ракурсы, внутрикадровая динамика, хронометраж и ритм монтажа, движение героев и др.;

4) оценка слаженности членов команды;

5) определение требований к производственному процессу – расстановка съемочного оборудования и его виды, движение камеры, угол съемки, включая предполагаемую для съемки оптику, и др.;

6) планирование сроков (графика) съемок и бюджета.

С технологической точки зрения создание превизов различного вида от слайдшоу, аниматики, 3D до насыщенного спецэффектами видеоролика – это разработка приложения, учитывающего как специфику съемочной площадки и оборудования (камер, в т. ч. их движения и оптики, освещения и т. п.), так и определенные требования к его качеству и визуализации (желательно в реальном времени или близком к нему).

Например, для получившего в настоящее время широкое распространение на практике 3D превиза основные задачи разработки включают [1]–[4]:

1) исходные данные: сценарий или 2D-раскадровка, хронометраж;

2) формирование 3D-сцены и обстановки (экстерьер или интерьер);

3) формирование 3D-персонажей;

4) задание поведения персонажей и объектов сцены, а также их взаимоотношений между собой;

5) формирование и расстановка съемочного оборудования – освещения и камер, включая предполагаемую для съемки оптику;

6) виртуальная съемка и запись кадров;

7) экспорт последовательности кадров в заданный формат и/или распечатка.

Для создания превизов используются как специализированные инструменты (например, FrameForge, который комплектуется наборами декораций, персонажей, камер и т. п. и позволяет сравнительно просто и в короткие сроки создавать 3D-превизы), так и универсальные профессиональные инструменты (например, Maya, 3ds Max, MotionBuilder и др.).

Рассмотрим некоторые *новые технологии*, используемые для улучшения создания, доставки и просмотра превиза и интеграции его в производственный процесс, а также уменьшения сроков и стоимости разработки.

В последнее время нарастает использование для создания превизов *игровых движков* [5]–[7], преимущество которых связано с работой в реальном времени – это в первую очередь возможность изменения превиза «на лету», по мере воспроизведения, а также смена камер в процессе просмотра. В [8] отмечается, что такая технология позволит создавать и редактировать «живые сцены» и может полностью изменить работу съемочной группы. Все компоненты 3D-сцены – текстуры, свет, различные эффекты и др. – будут формироваться в режиме реального времени прямо на съемочной площадке, то есть съемка кино станет полностью интерактивным процессом.

Примером инновационного подхода к созданию фильмов, телепередач и компьютерных игр является проект «ANSWER: Artistic-Notation-based Software Engineering for Film, Animation and Computer Games» [9]. Музыканты и хореографы уже долгое время используют символичные структуры для выражения своих намерений (музыкальная и танцевальная нотации). Однако в кино- и игровой индустрии режиссеры используют словесное описание. ANSWER создает систему нотации для описания мультимедийного контента, ключевыми особенностями которой являются:

– создание семантической модели режиссерского намерения: онтология кинопроизводства;

– режиссерская система нотации, которая позволит описать сценографию фильма или игры;

– средства для автоматической генерации раскадровки 3D-превизуализации на основе семантической модели;

– средства для автоматического извлечения метаданных, что позволит организовать контентно-ориентированное извлечение необработанного материала в процессе послесъемочного периода (пост-продакшена);

– средства синхронизации ввода пользовательской нотации с тем, что в действительности снимается;

– средства для автоматической генерации 3D-анимационных директив, которые могут быть интегрированы в игровой движок. Это позволит определить кинематографическую презентацию контента в компьютерных играх.

Широкое применение находят *цифровые реальности* – обобщающий термин для технологий виртуальной и смешанной реальности (дополненная реальность и виртуальность), виртуальные миры, мультимодальный интерфейс и ряд других, которые поддерживают работу с сенсомоторными характеристиками человека.

В кинематографии постепенно получает распространение использование *виртуальной реальности* [10] и *виртуального производства*, а также одного из его основных составляющих – *симулятора камеры*. Как отметил Бастер Ллойд, «это следующая ступень превизуализации, которая позволяет режиссеру в режиме реального времени видеть в одном кадре актеров, взаимодействующих с анимированными героями либо с цифровой средой или с тем и другим вместе» [11]. И там же «Виртуальное производство ориентировано на проекты с большими объемами компьютерной графики, когда некоторые сцены полностью генерируются машинами или же в кадре из реальных объектов присутствуют только актеры, а все остальное создается в графических редакторах на этапе подготовки к производству. Отличными примерами служат фильмы «Аватар» (2009) и «Алиса в стране чудес» (2010), где собственно и применялась эта технология».

В ряде работ анализируется применение технологий *смешанной реальности* – дополненной реальности и дополненной виртуальности [3], [4], [12], где в качестве примеров использования таких технологий приводятся Black Swan (augmented reality), Tron: Legacy (augmented virtuality) и Inception (mixed reality).

В работе [12] предлагается при создании превизов использовать технологию *смешанной реальности*, которая позволяет объединить реальный фон и компьютерно-генерируемых персонажей в композицию на открытом пространстве. Такая система позволяет погрузить пользователя в фильм и может работать в двух режимах: захвата изображения и композитинга, а также репетиции действий, которая позволит пользователям попрактиковаться в боевых действиях. Таким образом, в данном случае превиз является техникой, основанной на компьютерно-генерируемых изображениях для визуализации боевых сцен, ракурсов камеры, маркировок камеры, условия освещения и других ситуаций до фактической съемки.

В проекте [13] предлагается создание превизов на основе *дополненной виртуальности* за счет помещения актеров в компьютерную 3D-среду для целей виртуального производства, что позволяет независимым кинематографистам уменьшить затраты на производственный процесс.

Киноиндустрия начинает применять различные форматы виртуальной реальности для создания и просмотра фильмов.

Первый полноценный *VR-кинотеатр в формате видео 360* с использованием гарнитуры

GearVR открылся в Амстердаме в 2016 г. [14]. В качестве российского примера можно привести фильм «Эрмитаж. Виртуальное погружение во времени и пространстве» с К. Хабенским в главной роли мистического экскурсовода [15].

IMAX открыла первый кинотеатр с четырнадцатью футуристичными комнатами для просмотра контента в шлемах VR HTC Vive и StarVR от Starbreeze (с более широким полем обзора) [16]. Зрители оснащаются жилетами Subpac, которые передают вибрации для более глубокого погружения, и сидят в движущихся креслах с обратной связью компании D-BOX Technologies.

Один из взглядов на кинотеатры будущего – это *высокотехнологичные экспериментальные аттракционы*. Например, Orbi в Йокогаме (Япония), объединяющий технологии корпорации SEGA и контент BBC Earth. Он позволяет посетителям изучить мир животных и природы Земли на основе интерактивного мультисенсорного опыта (возможность видеть, слышать, обонять и осязать предметы) [17].

Разновидностью вышеприведенных систем являются *3/4/5D кинотеатры*, которые позволяют просматривать 3D стереофильмы с дополнительным набором движений (4D) и спецэффектов (5D), усиливающих впечатления от просмотра и погружение в сюжет. Видео и звук синхронизируются с определенными движениями и эффектами, которые дополняют основной фильм и увеличивают эффект сенсомоторного погружения.

Основу подобных кинотеатров составляют симуляторы движения – устройства, которые включают в себя пассажиров и создают у них ощущение движения. Симуляторы движения могут быть классифицированы на активные и пассивные в зависимости от того, управляет пассажир симулятором (например, летные тренажеры, симуляторы вождения и автогонок, интерактивные 5D-кинотеатры и др.) или является пассивным ездоком (аттракционы для тематических парков, 5D-кинотеатры и др.). В качестве примеров можно привести наиболее распространенные системы движения компании D-BOX Technologies [18], представленные во многих кинотеатрах Европы, Азии и США, а также имеющийся в лаборатории компьютерной графики, виртуальной и дополненной реальности кафедры вычислительных систем и сетей ГУАП 5D-кинотеатр 5D-Motion компании «СЭМЗ-Вымпел» [19], широко представленный в России и СНГ. 5D-Motion может иметь разные конфигурации. В нашем случае он состоит из подвижной гидравлической платформы с тремя степенями свободы, на которой установлено 4 кресла, стойки управления со встроенным компьютером, проекционной системы (3D-проектор,



Рис. 1. Внешний вид 5D-Motion

экран, стереочки), спецэффектов (ветер, дождь, молния), акустической системы (см. рис. 1).

Возможна замена проекционной системы на шлемы виртуальной реальности. Данный кинотеатр используется для исследовательских и учебных целей, в том числе для разработки превизов на платформе Unity авторских фильмов студентов [20].

Наметилась и тенденция слияния фильмов и компьютерных игр. Например, *интерактивный 3/4/5D-кинотеатр*, в котором для взаимодействия с фильмом используются различные манипуляторы, а также *многозальный интерактивный кинотеатр*, объединяющий по сети два и более географически распределенных залов для интерактивного просмотра фильмов (по типу многопользовательской игры) [21]. Для исследований в данной области в выше упомянутой лаборатории создана экспериментальная многофункциональная сеть симуляторов (кинотеатр, авто и авиа) [22], на базе которой магистрантами реализован превиз многопользовательской игры [23].

В основе интерактивных фильмов лежит концепция *интерактивного повествования* [24], [25]. Это форма цифрового интерактивного опыта, в котором пользователи создают или влияют на драматическую сюжетную линию посредством своих действий, либо принимая на себя роль персонажа в виртуальном мире, выдавая команды управляемым компьютером персонажам, либо непосредственно манипулируя состоянием мира. Таким образом, цель интерактивного повествования заключается в погружении пользователей в виртуальный мир, чтобы они считали себя неотъемлемой частью разворачивающейся истории и что их действия имеют прямое влияние на направление или исход сю-

жетной линии. Это является основным отличием от компьютерных игр. Примером подобного фильма является «Ночная игра», премьера которого состоялась на Каннском кинофестивале в 2016 г. [26]. Перед началом сеанса зрители должны скачать приложение на смартфон, при помощи которого по ходу фильма они смогут по wi-fi голосовать за вариант действий главного героя. Выбирается вариант, набравший большее количество голосов, который показывается на экране. В среднем зритель в течение сеанса делает порядка 60–80 выборов вариантов развития сюжета, а всего в проекте их более 180 вариантов, приводящих к 7 возможным финалам, поэтому длительность фильма разная в среднем от 60 до 100 мин. в зависимости от выбранных зрителями сюжетных поворотов. Всего снято и смонтировано более 240 мин.

В заключение следует отметить, что использование цифровых реальностей при создании, доставке и просмотре как превизов, так и фильмов в целом позволит:

- повысить для различных целевых аудиторий доступность фильмов, качество и разнообразие форм их представления, возможность получения нового опыта и влияния на поведение зрителей с целью увеличения количества повторного использования фильмов или посещения кинотеатра;
- увеличить мотивацию и эмоциональную вовлеченность зрителей фильмов, в том числе за счет возможности менять роли «зритель-участник-соавтор».

Однако необходимо учитывать последствия применения цифровых реальностей – возможности появления у зрителей киберболезни (тошнота, потеря ориентации в пространстве, напря-

жение глаз, головокружение, головная боль, утомление и др.), выявление причин которой на сегодняшний день находится в стадии активных исследований.

### Библиографический список

1. The Previsualization Society. URL: <https://www.fxguide.com/quicktakes/the-previsualization-society-is-announced/> (дата обращения: 10.12.2020).
2. American Society of Cinematographers. URL: [https://theasc.com/ac\\_magazine/June2009/Previs/page4.html](https://theasc.com/ac_magazine/June2009/Previs/page4.html) (дата обращения: 10.12.2020).
3. Previsualization and Virtual Production. Conference – February 24-25 2011. URL: [http://www.brianpohl.com/wp-content/uploads/2011/03/SIRT\\_brochure.pdf](http://www.brianpohl.com/wp-content/uploads/2011/03/SIRT_brochure.pdf) (дата обращения: 10.12.2020).
4. Screen Industries Research and Training Centre (SIRT). URL: <http://www.sirtcentre.com> (дата обращения: 10.12.2020).
5. The Third Floor's Eric Carney on the evolution of previs. URL: [http://postperspective.com/the-third-floors-eric-carney-on-the-evolution-of-previs/?utm\\_source=feedly&utm\\_medium=rss](http://postperspective.com/the-third-floors-eric-carney-on-the-evolution-of-previs/?utm_source=feedly&utm_medium=rss) (дата обращения: 10.12.2020).
6. Timoth'ee De Goussencourt, Jean Dellac, Pascal Bertolino. A Game Engine as a Generic Platform for Real-Time Previs-on-Set in Cinema Visual Effects. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS), Oct 2015, Catania, Italy. 2015, 13 p. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01226184> (дата обращения: 10.12.2020).
7. Nitsche M. Experiments in the Use of Game Technology for Pre-Visualization, Future Play '08, pp. 160-165, 2008. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4800/45cf435ca956323f054e2d335e82913ed777.pdf> (дата обращения: 10.12.2020).
8. 10 технологий, которые изменят кинематограф. URL: <http://www.lookatme.ru/mag/live/future-research/197241-future-cinema> (дата обращения: 10.12.2020).
9. Проект ANSWER. URL: [http://cordis.europa.eu/project/rcn/85343\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/85343_en.html) (дата обращения: 10.12.2020).
10. Ramsbottom J. Virtual Reality Previs Literature Review // Virtual Reality Review, 2015. 6p. URL: <https://people.cs.uct.ac.za/~previs2015/vr-review/index.html> (дата обращения: 10.12.2020).
11. Ллойд Б. Визуализация фильма до команды «Мотор!» // MediaVision. 2010. С. 21–26.
12. Mixed Reality Pre-visualization for Filmmaking: On-set Camera-work Authoring and Action Rehearsal / R. Ichikari, R. Tenmoku, F. Shibata et al. // The International Journal of Virtual Reality. 2008. 7(4). P. 25–32.
13. Stamm A., Teall P., Blanco G. Augmented virtuality in real time for pre-visualization in film // Conference Paper. March-2016, Conference // 2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces. URL: [https://www.researchgate.net/publication/301723697\\_Augmented\\_virtuality\\_in\\_real\\_time\\_for\\_pre-visualization\\_in\\_film](https://www.researchgate.net/publication/301723697_Augmented_virtuality_in_real_time_for_pre-visualization_in_film) (дата обращения: 10.12.2020).
14. Рыжонков В. 2017-й год для виртуальной и дополненной реальности: как технологии придут на массовый рынок. URL: <https://www.forbes.ru/tehnologii/340601-2017-y-god-dlya-virtualnoy-i-dopolnennoy-realnosti-kak-tehnologii-pridut-na> (дата обращения: 10.12.2020).
15. Эрмитаж VR. Погружение в Историю. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=6\\_AShkla21g](https://www.youtube.com/watch?v=6_AShkla21g) (дата обращения: 10.12.2020).
16. IMAX открыла первый театр виртуальной реальности. 16.02.2017/ URL: <http://holographica.space/news/imax-vr-los-angeles-8633> (дата обращения: 10.12.2020).
17. Сайт Orbi Yokohama. URL: <https://orbearth.jp/en/about> (дата обращения: 10.12.2020).
18. Сайт компании D-BOX Technologies. URL: <http://www.d-box.com/corporate-page/about-d-box/> (дата обращения: 10.12.2020).
19. Сайт компании «СЭМЗ Вымпел!». URL: <http://kb-tk.ru/> (дата обращения: 10.12.2020).
20. Майн Е. Е. Разработка превиза трехмерного анимационного мультфильма для 5D-кинотеатра. СПб.: ГУАП, 2020. 81 с.
21. Сайт компании Triotech is a manufacturer in out-of-home multi-sensory interactive attractions. URL: <http://www.trio-tech.com/products/interactive-cinema> (дата обращения: 10.12.2020).
22. Nikitin A., Bulgakov D., Topchiy A. Experimental multifunctional network of simulators based on technologies of virtual and mixed realities // Proceedings of International Conference “Electronic Imaging & the Visual Arts”, ИТМО, St. Petersburg, 2017. P. 20–23.
23. Тончий А. С. Исследование и разработка многопользовательского игрового приложения для симуляторов движения. СПб.: ГУАП, 2018. 122 с.
24. Riedl M., Bulitko V. Interactive Narrative: An Intelligent Systems Approach. AI Magazine. Vol. 34(1), 2013. P. 66–77. URL: <http://www.cc.gatech.edu/~riedl/pubs/aimag.pdf> (дата обращения: 10.12.2020).
25. Интерактивное повествование: Использование разумных систем. URL: <http://aushestov.ru/интерактивное-повествование-исполь/> (дата обращения: 10.12.2020).
26. Сайт фильма «Ночная игра». URL: <http://lateshift.ru> (дата обращения: 10.12.2020).

УДК 621.396.965

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-110-116

**А. А. Сенцов\***

кандидат технических наук, доцент

**Е. К. Григорьев\***

аспирант

**С. А. Ненашев\***

студент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## РАДИООПТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Рассматривается вариант реализации радиооптического комплекса обнаружения и определения траекторных координат объектов естественного и искусственного происхождения в воздушном пространстве путем совмещения информации от двух систем различного типа с целью повышения точности определения координат воздушных объектов и распознавания объектов. В состав комплекса входят двухпозиционная наземная активная РЛС и пассивная оптическая система высокого разрешения. Показано, что комплексирование информации от этих источников позволяет обнаруживать, определять и прогнозировать параметры движения таких объектов, как мало-размерные спортивные самолеты, беспилотные летательные аппараты, стаи птиц. Комплекс предназначен для мониторинга воздушного пространства в особо охраняемых зонах, например аэропортах, с целью защиты от проникновения подобных случайных объектов, представляющих опасность для воздушных судов при их взлете и посадке. Приведены режимы работы комплекса, определены потенциально возможные характеристики комплекса и соответствующие ограничения на условия его эффективной работы.*

**Ключевые слова:** многопозиционные радиолокационные системы, оптическая система высокого разрешения, совместная обработка информации, траекторные координаты, распознавание объектов.

**A. A. Sentsov\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**E. K. Grigoriev\***

PhD Student

**S. A. Nenashev\***

Student

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## RADIO-OPTICAL COMPLEX FOR DETECTING AND DETERMINING THE COORDINATES OF AIR OBJECTS

*The article discusses the variant of the implementation of a radio-optical complex for detecting and determining the trajectory coordinates of objects of natural and artificial origin in the airspace by combining information from two systems of different types in order to increase the accuracy of determining the coordinates of air objects and recognizing objects. The complex includes a two-position ground-based active radar and a high-resolution passive optical system. It is shown that the integration of information from these sources makes it possible to detect, determine and predict the movement parameters of such objects as small-sized sports aircraft, unmanned aerial vehicles, flocks of birds. The complex is designed to monitor the airspace in specially protected areas, such as airports, in order to protect against the penetration of such random objects that pose a danger to aircraft during their take-off and landing. The modes of operation of the complex are given, the potential characteristics of the complex and the corresponding restrictions on the conditions of its effective operation are determined.*

**Keywords:** multi-position radar systems, high-resolution optical system, joint information processing, trajectory coordinates, object recognition.

### Введение

В настоящее время количество малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) существенно увеличивается. Беспилотные летательные системы традиционно ассоциировались с военными целями, однако их широкое распро-

странение вызвано не только расширением их военного применения. Низкая стоимость, доступность и простота в использовании привели к появлению огромного количества БПЛА, управляемых гражданскими пользователями.

Современные БПЛА (квадро-, гекса-, октокоптеры) могут выполнять аэрофото- и видеосъ-

емку, обрабатывать с воздуха сельскохозяйственные культуры, осуществлять наблюдение за инфраструктурой и правопорядком, участвовать в спасательных операциях, доставлять грузы и даже применяться в строительстве жилых и нежилых объектов. С другой стороны, БПЛА могут представлять угрозу, которая надвигается с неба (воды, земли). Например, вмешательство в личную жизнь, а также угрозу жизни, здоровью людей и безопасности объектов инфраструктуры. В период 2014–2020 гг. был зафиксирован ряд инцидентов: падение БПЛА рядом с первыми лицами государств, опасное сближение с воздушными судами, заброс радиоактивных материалов на территорию правительственных объектов, аэрофотосъемка охраняемых частных территорий, столкновение со зданиями, промышленный шпионаж, транспортировка оружия и наркотиков на территорию тюрем. Частота подобных происшествий, как и вероятность полномасштабных террористических актов с использованием БПЛА, стремительно растет. Предупредительные меры, такие как обязательная регистрация беспилотных летательных аппаратов, явно недостаточны для обеспечения защиты от этого нового вида опасности. Поэтому на сегодняшний день потребность в системе, которая сможет обнаружить, отслеживать и классифицировать враждебное использование этих аппаратов, существенно возрастает.

### Особенности радиолокационного наблюдения БПЛА

Принято считать, что РЛС являются эффективными системами обнаружения и классификации разнообразных целей. Но обнаружение малогабаритных БПЛА посредством РЛС представляет сложность, так как эти аппараты имеют тенденцию летать на низких высотах с небольшими скоростями, а также обладают малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР). Низкая высота и малая скорость БПЛА существенно затрудняют их выделение на фоне множества помех, особенно в условиях плотной городской застройки. Малая ЭПР также приводит к значительным затруднениям в режиме обнаружения при воздействии помех.

Из теории радиолокации известно, что объект будет обнаружен при помощи РЛС, если его геометрические размеры превышают длину излучаемой волны. БПЛА состоит из множества мелких деталей, и лишь часть из них являются радиоконтрастными. Таким образом, радиолокационные системы, работающие в дециметро-

вых и более длинных диапазонах, не обеспечивают обнаружение объектов этого типа. Поэтому для обнаружения малогабаритных БПЛА предлагается использовать РЛС, работающие в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, поскольку в этом случае длина волны будет меньше, чем радиоотражающие элементы БПЛА.

В настоящее время ряд производителей различных стран имеют РЛС сантиметрового диапазона, осуществляющих секторный или круговой обзор пространства и обеспечивающих обнаружение объектов с малой ЭПР.

Помимо обнаружения, необходимо решить задачу классификации БПЛА на фоне биологических объектов, таких как птицы и насекомые, которые часто присутствуют в тех же секторах наблюдения. Птицы и БПЛА могут иметь схожие значения ЭПР и траекторию полета, в связи с чем их различение представляет серьезную сложность при классификации целей. Проблема различения между этими двумя классами объектов для РЛС сантиметрового диапазона освещается в [1]–[3], где используется параметр малых доплеровских частот (*micro-doppler signature*) птиц и различных типов БПЛА (с неподвижным крылом, квадрокоптеров, вертолетов) для получения соответствующих характеристик классификации, например, с применением сингулярного разложения. В [4] предлагается рассмотреть параметры, качество отслеживания по которым на порядок лучше, чем при использовании малых доплеровских частот при различении БПЛА на фоне других воздушных судов, птиц или атмосферных явлений, и приводятся соответствующие результаты моделирования.

Классификация малогабаритных БПЛА на основе различения высокоточных дальностных портретов (*high resolution range profiles, HRRP*) или радиолокационных изображений, сформированных РЛС в режиме инверсного синтезирования апертуры (*inverse synthetic aperture radar, ISAR*) может быть затруднительна, так как для этого необходимо достаточное количество элементов разрешения по дальности и в направлении поперечного сечения, особенно для диапазона нижних частот. Методы, основанные на микродоплеровском эффекте, совершенно иные. Если общая ЭПР необходима для обнаружения цели, то для получения полезных малых доплеровских сдвигов ключевой является энергия обратного рассеяния от вращающихся деталей, таких как пропеллеры и лопасти винтов. Как правило, последние делаются из карбона или пластиковых материалов. Чем меньше БПЛА, тем больше вероятность, что у него пластиковые лопасти. Такой выбор материала может оказаться важным с точки зрения «ви-

димости» лопастей радиолокационными системами. Если лопасти из карбона принято считать почти идеальным электрическим проводником, то пластиковые материалы могут иметь диэлектрические свойства близкие к воздуху, что приводит к малому обратному рассеянию.

Таким образом, к преимуществам использования рассмотренных РЛС для задач обнаружения можно отнести: охват обширных участков наблюдаемого пространства за короткий промежуток времени; возможность информировать пользователя о наличии наблюдаемых объектов в зоне действия в реальном масштабе времени; высокую эффективность работы в неблагоприятных метеоусловиях в любое время суток.

Однако при прочих достоинствах подобным системам свойственны ограничения. В частности, однопозиционные РЛС используют информацию, заключенную в характеристиках переотраженного электромагнитного поля от объекта наблюдения по координатам: дальность, угол места и азимут, которая не всегда удовлетворяет требованиям точности по трем координатам одновременно, что необходимо при решении задач определения траекторных координат и сопровождения БПЛА в воздушном пространстве.

В связи с этим целесообразно перейти к системе, состоящей из нескольких разнесенных в пространстве станций, в которой осуществляется совместная обработка радиолокационной информации.

Комплексная обработка радиолокационной информации от нескольких разнесенных позиций дает ряд преимуществ по сравнению с информацией от однопозиционной радиолокационной станции, а именно: получить трехмерное измерение траекторных координат (дальность, азимут, скорость), повысить точность их измерения, разрешающую способность, а также помехозащищенность и другие тактические характеристики [5], [6].

### Двухпозиционные радиолокационные системы

Основным достоинством, реализуемым в многопозиционных радиолокационных системах (МПРЛС), является возможность определения координат объекта как с помощью дальномерной, так и угломерной информации, полученной от различных источников [7], [8].

Также следует отметить следующие преимущества многопозиционных радиолокационных систем:

- возможность создавать зону наблюдения заданной конфигурации в зависимости от тре-

буемого объема и формы наблюдаемого пространства;

- при использовании совместного пассивного приема сигналов, излученных одним активным источником, можно реализовать энергетическое преимущество;

- высокоточное определение пространственного положения объекта;

- более высокая разрешающая способность по сравнению с однопозиционной РЛС;

- распределенность в пространстве и избыточное число постов позволяет функционировать системе в целом при выходе из строя части входящих в состав радиолокационных средств;

- наличие большего объема данных об объекте наблюдения за счет одновременного наблюдения объекта с различных направлений (геометрических, физических характеристик, а также о движении объекта вокруг собственного центра масс) по сравнению с однопозиционной РЛС.

Двухпозиционная система позволяет добиться высокой точности измерений по сравнению с однопозиционной радиолокационной станцией. Это дает возможность повысить тактические характеристики радиолокационных систем путем усложнения алгоритмов обработки радиолокационной информации без модернизации аппаратуры этих систем.

С помощью МПРЛС возможно определение трех координат объекта благодаря измерению дальности относительно нескольких разнесенных РЛС или суммарной дальности относительно нескольких разнесенных в пространстве позиций [9].

На рис. 1 представлены варианты расположения МПРЛС, состоящей из двух РЛС секторного обзора с объединенной зоной наблюдения, в которой находится объект.

Одним из важных преимуществ способа обработки радиолокационных сигналов двухпозиционной системой РЛС является повышение точности определения траекторных координат объектов, в частности, возможности разрешения двух близкорасположенных по азимутальной координате объектов, что невозможно при однопозиционной локации [10], [11].

Однако многопозиционным (двухпозиционным) радиолокационным системам не всегда возможно удовлетворять современным требованиям, предъявляемым к системам мониторинга воздушного пространства. Например, с помощью радиолокационных станций затруднительно с высокой точностью выделить контур наблюдаемого объекта и решить задачу классификации объекта [12].

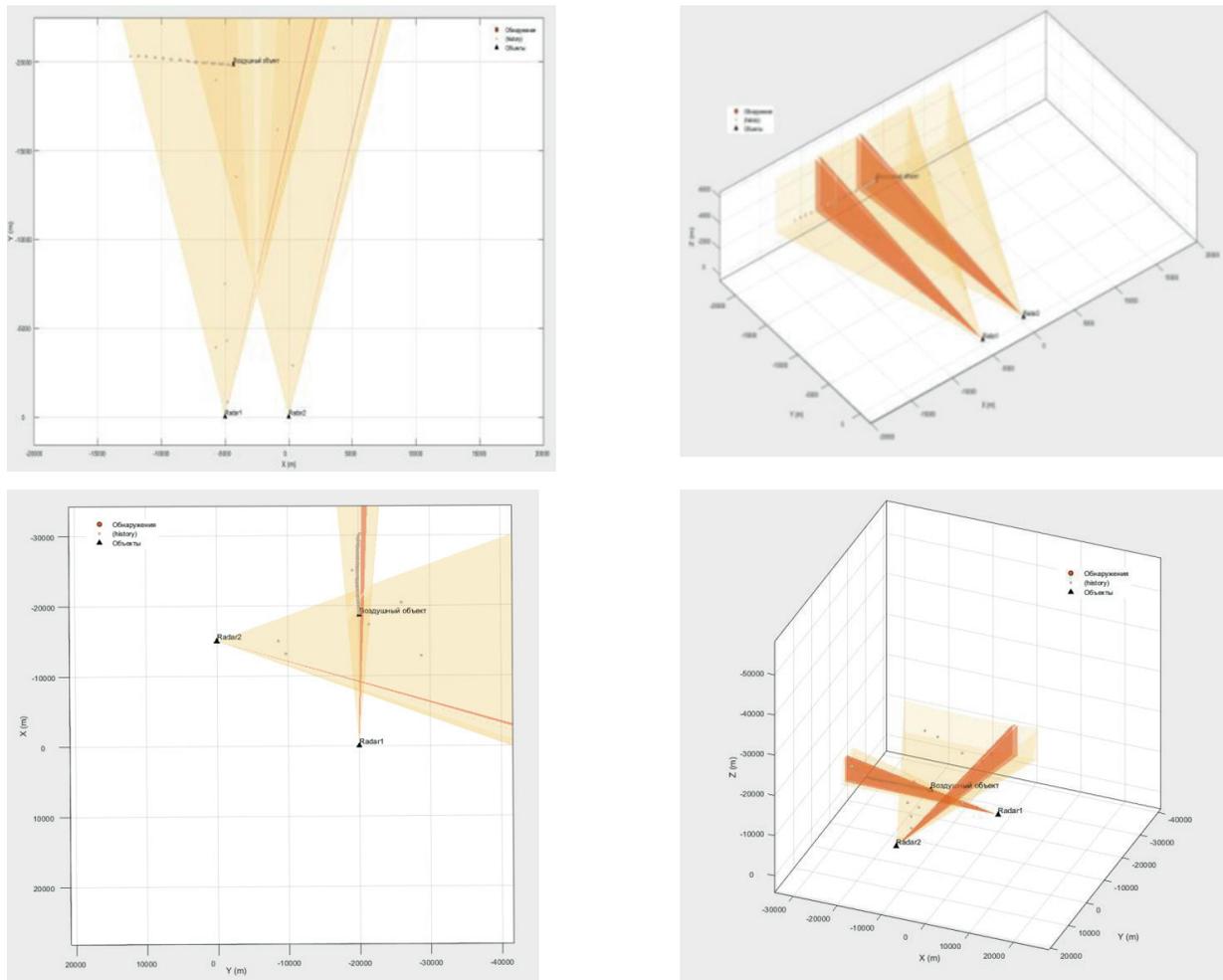


Рис. 1. Варианты расположения МПРЛС, состоящей из двух РЛС секторного обзора с объединенной зоной наблюдения, в которой находится объект

В связи с этим предлагается использовать дополнительные системы наблюдения, а именно – пассивную систему наблюдения оптического диапазона. По отдельности и радиолокационные, и оптические системы обладают рядом недостатков, указанных в табл. 1, однако используя вышеописанные системы в комплексе, достигаются качественно новые характеристики при решении задач определения траекторных координат объектов, а также их классификации.

**Особенности оптического наблюдения БПЛА**

При обработке кадров видеопотока с целью решения задачи наблюдения за движением БПЛА возникает ряд особенностей, таких как движение по отношению к камере, изменение масштаба и изменение фоновых условий. Традиционные методы отслеживания позволяют сопровождать цель в видеопотоке, но их произво-

дительность не позволяет реализовывать режим реального времени требуемого качества.

В последние годы в научной литературе наблюдается бурное развитие методов распознавания и классификации объектов с целью их сопровождения. Основная идея заключается в том, чтобы извлечь интересующий объект из текущего кадра, а затем обновить классификатор в соответствии с динамикой изменениями на изображении [13]–[16]. Существует ряд способов сопровождения объекта в видеопотоке. Эти способы подходят для сопровождения подвижного объекта на однородном фоне. В последние годы было предложено несколько видов алгоритмов сопровождения цели.

Однако если БПЛА полностью скрыт от системы наблюдения видеочамер в течение длительного времени, то следящая система, использующий адаптивную модель, выдает сообщение об ошибке, то есть цель снимается с сопровождения (потеряна).

Таблица 1

Ограничения рассматриваемых систем в отдельности и возможности их снятия при использовании в радиооптическом комплексе

Параметры	Оптическая система	Однопозиционная система РЛС	Двухпозиционная система РЛС	Радиооптический комплекс
Дальность обзора	±	+	+	+
Угол обзора	+	±	+	+
Радиальная скорость	-	+	+	+
Поперечная скорость	±	-	+	+
Наличие ближней «слепой» зоны ( $D_{min}$ )	+	-	-	+
Наличие дальней «слепой» зоны ( $D_{max}$ )	-	+	+	+
Привязка к карте местности	±	+	+	+
Точность определения координат цели	±	±	+	+
Многоцелевое обнаружение и сопровождение	-	±	+	+
Помехи*	±	-	±	+
Классификация	+	-	-	+
Помехи (осадки, освещение, пыль)	-	+	+	+

В [17] описан алгоритм обнаружения объекта, основанный на многомасштабной и деформируемой части, который использует дискриминантный метод обучения. Предложенный алгоритм практически не чувствителен к изменениям ракурса, масштаба, вращению объекта в кадре, однако скорость обнаружения при этом относительно невысока и не всегда удовлетворяет требованиям обработки в режиме реального времени.

В работе [18] предложен алгоритм сопровождения движущегося объекта, основанный на моделях внешнего вида интересующего объекта. Процесс сопровождения в основном разделен

на две категории: порождающий алгоритм и уточняющий алгоритм [18]. Порождающий алгоритм служит для определения объектов по типичной модели обучения. Затем эту модель используют для поиска требуемого объекта в изображении с наименьшей ошибкой. Уточняющий алгоритм переформулировал задачу сопровождения и обнаружения в задачу бинарной классификации, которая способна определять границы между подвижным объектом и фоном, а затем отделить объект от фона.

Таким образом, указанные алгоритмы имеют ограничения, когда интересующий объект скрыт в течение некоторого времени в результа-

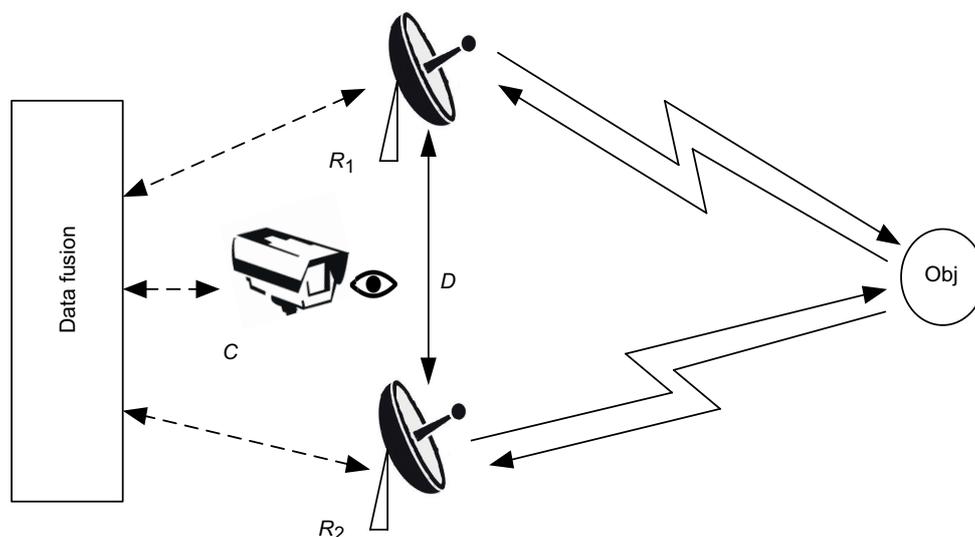


Рис. 2. Структура радиооптического комплекса

Таблица 2

**Возможности работы в заданных режимах рассматриваемых систем в отдельности и при объединении их в радиооптический комплекс**

Режим	Камера	Радар	Камера+Радар
1. Многоцелевое обнаружение и сопровождение	±	±	+
2. Высокоточное выделение границ цели	+	–	+
3. Селекция движущихся целей	–	+	+
4. Обнаружение высокоскоростных целей	–	+	+
5. Обнаружение в ближней зоне	+	–	+
6. Обнаружение в дальней зоне	–	+	+
7. Автоматическое обнаружение и сопровождение	±	+	+
8. Режим ограниченной оптической видимости (туман, запыленность, атмосферные осадки)	–	+	+

те затенения или помех системы видеонаблюдения [19]. Для решения этой задачи предлагается новый метод, основанный на применении набора фильтров Калмана, настроенных на различные виды движения для прогнозирования положения движущегося БПЛА при временной потере видимости с последующим восстановлением применения алгоритма сопровождения, когда видимость объекта восстановлена.

**Радиооптический комплекс**

Структура радиооптического комплекса, реализуемого при объединении двух систем (двухпозиционной РЛС и оптической системы), представлена на рис. 2.

Приемопередающие радиолокационные позиции, расположенные на расстоянии D друг от друга, осуществляющие совместное наблюдение за требуемыми объектом «Obj». При этом объекты могут быть как статическими, так и динамическими. Оптическая система комплекса осуществляет обзор окружающего пространства в пределах зоны мониторинга с помощью оптического датчика «С». После чего вся информация, полученная с двух разнородных систем наблюдения, передается в пункт управления и совместной обработки информации, где впоследствии осуществляется процесс ее отождествления, комплексирования и вывод в единую систему координат [20].

В табл. 1 представлены ограничения рассматриваемых систем в отдельности и возможности их снятия при объединении в радиооптическом комплексе.

В табл. 2 представлены возможности работы в заданных режимах рассматриваемых систем в отдельности и при объединении их в радиооптический комплекс.

**Заключение**

Применение радиооптических систем позволяет решать задачи, которые затруднительно решать отдельно радиолокационными или оптическими средствами.

В работе отражены недостатки применения одиночной РЛС в комплексе с оптической системой по сравнению с возможностями объединения информации от двухпозиционной РЛС и оптической системы. Приведенный анализ достоинств и ограничений рассматриваемых систем подтверждает целесообразность их применения в комплексе. Ключевым моментом в реализации рассмотренных систем являются алгоритмы совмещения полученных данных в единое информационное поле [21].

Комплексы, имеющие в составе радиолокационные средства и оптические системы, обладают большим потенциалом и качественно дополняют друг друга при решении задач, связанных с обнаружением и определением параметров движения малоразмерных воздушных объектов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06029.

**Библиографический список**

1. Wit J., Harmanny R., Molchanov P. Radar micro-Doppler feature extraction using the Singular Value Decomposition // 2014 International Radar Conference. P. 1–6.
2. Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures / P. Molchanov, K. Egiazarian, J. Astola et al. // 2013 European Radar Conference (EuRAD). P. 172–175.
3. Wit J., Harmanny R., Cabic P. Radar micro-Doppler feature extraction using the spectrogram and

the cepstrogram // 11th European Radar Conference (EuRAD). P. 165–168.

4. Feature extraction and radar track classification for detecting UAVs in civilian airspace / N. Mohajerin, J. Histon, R. Dizaji, S. Waslander // 2014 IEEE Radar Conference. P. 0674–0679.

5. Зайцев Д. В. Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех. М.: Радиотехника, 2007.

6. Верба В. С. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч. 3. М.: Радиотехника, 2010.

7. Nenashev V., Kryachko A., Shepeta A. Features of information processing in the onboard two-position small-sized radar based on UAVs, SPIE Future Sensing Technologies. Tokyo, 2019. P. 111970X-1–111970X-7.

8. Ненашев В. А., Сенцов А. А., Кююмчев Г. В. Моделирование процесса формирования радиолокационного изображения высокого разрешения в бортовых РЛС // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 2. № 3. С. 48–56.

9. Программа для расчета взаимного расположения двухпозиционной РЛС и наблюдаемых объектов в полярной и декартовой системах координат / В. А. Ненашев, А. П. Шепета., Е. К. Григорьев и др. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018661851, 20.09.2018. Заявка № 2018614572 от 08.05.2018.

10. Nenashev V., Sentsov A., Shepeta A. The problem of determination of coordinates of unmanned aerial vehicles using a two-position system ground radar // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2018. P. 8604329.

11. Distributed system of small radars in moving object location and tracing / M. Sergeev, V. Nenashev, A. Sentsov, E. Turnetskaya // Procedia Computer Science, 2020. Vol. 176. P. 1713–1721.

12. Nenashev V., Sentsov A., Shepeta A. Formation of radar image the earths surface in the front zone review two-position systems airborne radar // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2019. 2019. P. 8840641.

13. On-Board Unlimited Aircraft Complex of Environmental Monitoring / M. Wattimena, V. Nenashev, A. Sentsov, A. Shepeta // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg, 2018. P. 1–5.

14. Ненашев В. А., Сергеев А. М., Васильев И. А. Моделирование сложных кодо-модулированных сигналов для современных систем обнаружения и передачи информации // Научная сессия ГУАП: сб. докл. В 3 ч. СПб.: ГУАП, 2019. С. 413–417.

15. Ненашев В. А., Сеницын В. А., Страхов С. А. Исследование влияния промышленных помех на характеристики сжатия фазоманипулированных сигналов

в первичных РЛС // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: тр. IX общерос. науч.-практ. конф.: в 2 т. Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. СПб., 2017. С. 351–355.

16. Shepeta A., Nenashev V. Modeling algorithm for SAR image based on fluctuations of echo signal of the earths surface // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2015. Vol. 9642. P. 2194569.

17. Zhengping J., Prokhorov D. Radar-Vision Fusion for Object Classification // Information Fusion, 2008 11th Internation Conference.

18. Color Based Vehicle Detection and Tracking using Kalman Filter with a Fractional Feedback Loop / P. Katuru1, V. Josyula, P. Samudrala et al. // Advances in Computational Sciences and Technology ISSN 0973-6107. Vol. 10. N 8 (2017). P. 2565–2585.

19. Performance of UWB Signal Detecting Circuits / A. Shepeta, A. Makhlin, V. Nenashev, A. Kryachko // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg, 2018. P. 1–4.

20. Сенцов А. А., Поляков В. Б., Дмитриев В. Ф. Комплекс мобильных радиолокационных станций внешнетракторных измерений // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 9. С. 30–35.

21. Сергеев М. Б., Сенцов А. А., Григорьев Е. К. Имитационная модель радиолокационной обстановки интеллектуальной системы управления распределенными средствами радиолокационных станций // Моделирование, оптимизация и информационные технологии». 2020. Т. 8. № 3. С. 14–30.

УДК 629.7.052

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-117-122

**А. А. Сенцов\***

кандидат технических наук, доцент

**С. А. Иванов\*\***

кандидат технических наук, главный специалист

**С. А. Ненашев\***

студент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

\*\*ОАО «ЦНПО «Ленинец»

## ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ УСТРОЙСТВ В СОСТАВЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ МОНИТОРИНГЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Рассматриваются актуальные вопросы применения автономных беспилотных летательных аппаратов для экологического мониторинга земной и морской поверхностей при помощи комплексирования радиолокационной информации. Дана классификация современных беспилотных летательных аппаратов по типам, а также рассматриваются решаемые ими задачи в зависимости от технических характеристик и выполняемых функций. Особое внимание уделено задачам экологического мониторинга, определены технические требования к отдельным системам беспилотных летательных аппаратов: энергообеспечения, беспроводной системы связи и ее шифрации, навигации, аппаратуры мониторинга подповерхностных слоев для реализации бортового беспилотного летательного комплекса оперативного и экологического мониторинга. Предложен используемый на практике вариант построения гексакоптера с возможностью применения полезной нагрузки и технических средств для мониторинга чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, в частности, при сборе информации о состоянии потенциально опасных объектов инфраструктуры.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, автономное наблюдение, комплексирование информации, навигация, мониторинг состояния окружающей среды.

**A. A. Sentsov\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**S. A. Ivanov \*\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor, Chief Specialist

**S. A. Nenashev\***

Student

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

\*\*JSC «CSPA Leninetz»

## POSSIBILITIES FOR INTEGRATION OF DEVICES AS PART OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DURING OPERATIONAL MONITORING OF THE EARTH'S SURFACE

*Topical issues of creation and application of autonomous unmanned aerial vehicles for environmental monitoring of land and sea surfaces by means of radar information aggregation are considered. The classification of modern unmanned aerial vehicles by types is given, and also the tasks solved by them depending on technical characteristics and performed functions are considered. Special attention is paid to the tasks of environmental monitoring, the technical requirements for individual systems of unmanned aerial vehicles are defined: power supply, wireless communication system and its encryption, navigation, monitoring equipment of subsurface layers for the implementation of an onboard unmanned aerial system of environmental monitoring. A practical variant of the hexacopter construction with the possibility of using the payload and technical means for monitoring natural and man-made emergencies, in particular when collecting information on the state of potentially dangerous infrastructure objects, is proposed.*

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, autonomous surveillance, information aggregation, navigation, monitoring the state of the environment.

### Введение

В настоящее время сфера применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стреми-

тельно расширяется и включает в себя поиск объектов в зонах бедствий, картографирование земной поверхности [1], [2], оценку состояния сельскохозяйственных культур, ледников, эко-

логический мониторинг, сбор информации для геологоразведки, обнаружение пожаров и т. п. Особо актуально применение БПЛА для оперативной геологической и экологической разведки в труднодоступных местах, а также в условиях, представляющих опасность для здоровья и жизни людей. Например, для определения состояния поверхности и картографирования труднодоступных участков местности в горных ущельях, а также районов, подверженных химическому загрязнению, и объектов с повышенным радиационным фоном.

Использование малогабаритных РЛС в аппаратуре малых летательных аппаратов (квадро-, гекса-, октокоптеры) позволит в автоматическом режиме обследовать широкие площади зон бедствий, указывая координаты физических объектов, где могут находиться пострадавшие люди, что поможет спасателям оказать своевременную помощь.

Особенностью систем, базирующихся на БПЛА, является ограниченность энергических, габаритных и весовых ресурсов, что требует разработки специальных алгоритмов обзора исследуемых зон и комплексирования информации от бортовых локационных устройств, в том числе многопозиционных систем [3]–[5]. Кроме того, применительно к радиоканалам требуется исследовать специализированные алгоритмы сжатия информации [6], [7] без существенной потери и кодированной передачи [8]–[10] ее как между носителями локационной аппаратуры, так и в наземный пункт обработки и управления, что требуется для реализации режима реального времени.

Основные задачи оперативного экологического мониторинга, решаемые при помощи устройств, базирующихся на БПЛА:

- экологический мониторинг состояния окружающей среды;
- обнаружение зон и объемов протечек трубопроводов, находящихся как под землей, так и над землей, а также оценка их технического состояния и выявление дефектов;
- оценка состояния сельскохозяйственных угодий, а также лесных массивов.
- обнаружение очагов пожаров, состояния горных пород, представляющих угрозу экзогенных процессов (сели, оползни, обвалы и др.);
- поиск людей в зоне бедствий (кораблекрушение, техногенная катастрофа, землетрясение, наводнение, оползни и т. п.);
- осуществление фото- и видеосъемки с целью наблюдения за инфраструктурой и порядком и т. п.;
- патрулирование границ и обнаружение движущихся объектов в охраняемой зоне: опре-

деление положения и скорости движущихся объектов;

- контроль аварийных и нештатных ситуаций на сложных технических объектах и объектах инфраструктуры, координация действий наземных групп;
- мониторинг выполнения строительных и ремонтных работ;
- обнаружения физических объектов и пустот под завалами, аппаратурой использующих сверхширокополосные сигналы;
- определение приоритетности по степени опасности при выборе зон для первоочередного мониторинга [11].

Выполнение вышеуказанных задач возможно только при использовании малогабаритных устройств мониторинга, однако эти локационные устройства не всегда удовлетворяют требованиям грузоподъемности малых летательных аппаратов. Поэтому необходимо рассмотреть основные аспекты, касающиеся возможностей применения портативных локационных устройств мониторинга при размещении их на группе БПЛА с учетом особенностей интеграции этих устройств в радиооптический комплекс.

В табл. 1 и в работах [12]–[14] приведены основные характеристики беспилотных летательных аппаратов по типам.

В настоящее время существуют различные варианты классификации БПЛА: самолетного (рис. 1) и вертолетного типа (рис. 2), тяжелые и легкие, работающие на жидком топливе и на электричестве, большой и малой дальности (см. табл. 1). Выбор того или иного типа летательного аппарата зависит от характеристики объекта исследования, потребности в передаче требуемого объема и типа данных, необходимости режима реального времени или записи на съемный носитель, определяемых поставленной задачей.

Технические характеристики БПЛА вертолетного типа представлены в табл. 2.

Технические характеристики БПЛА самолетного типа представлены в табл. 3.

Исходя из данных табл. 1–3 для задач оперативного мониторинга целесообразно использовать БПЛА вертолетного типа, на которых размещаются локационные устройства из состава многопозиционной системы, поскольку малогабаритные локационные устройства имеют не всегда достаточные характеристики для осуществления высокоточного картографирования.

В работах [16]–[19] были проанализированы особенности реализации основных блоков БПЛА (энергообеспечения, системы связи с шифрацией, системы навигации), а также со-

Таблица 1

**Основные характеристики беспилотных летательных аппаратов [12]–[14]**

Характеристика	БПЛА самолетного типа большой дальности	БПЛА самолетного типа средней дальности	БПЛА вертолетного типа малой дальности
Дальность действия*	50–70 км	15–25 км	2–5 км
Продолжительность полета*	4–5 ч	1–2,5 ч	40–60 мин
Скорость	65–130 км/ч	65–130 км/ч	30–50 км/ч
Взлетная масса	8–10,5 кг	2,5–6,5 кг	1,5–8 кг
Масса целевой нагрузки	1,5–2 кг	0,3–1 кг	0,3–2 кг
Взлет	Пневматическая катапульта	Эластичная катапульта	Вертикальный
Посадка	Парашют, в сеть	Парашют, в сеть	Вертикальная
Размах крыла	2–3 м	1–2 м	0,6–1,5 м
Стоимость	1,7–4,5 млн руб.	1,2–3,3 млн руб.	0,9–2,8 млн руб.
*Характеристики можно улучшить с помощью дополнительного оборудования			

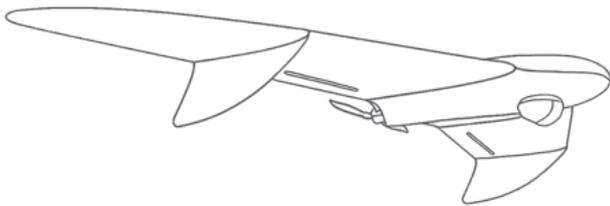


Рис. 1. БПЛА самолетного типа

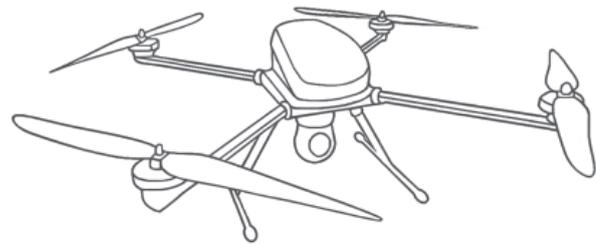


Рис. 2. БПЛА вертолетного типа

Таблица 2

**Технические характеристики БПЛА вертолетного типа [12]–[15]**

Тип БПЛА	Вертолетного типа 6-моторный (гексакоптер)
Подъемная масса полезной нагрузки	4 кг
Собственная масса	4,5 кг
Размеры	900 мм x 900 мм x 600 мм
Скорость полета	0–42 км/ч (0 м/с–12 м/с)
Скорость ветра	до 12 м/с
Время полета без нагрузки порядка	25 мин. (в зависимости от батареи)
Максимальная протяженность маршрута	10 км
Батарея (съемная, весом 1,2 кг)	22, 2 В, 10Ач
Контроль за БПЛА на дальности	до 3 км
Взлет/посадка	ручной и автоматический режимы
Тип двигателя	электрический
Минимальная высота полета	0,5 м
Максимальная высота полета	3500 м
Диапазон рабочих температур	–30–50° С
Время подготовки к взлету	не более 7 мин.

Таблица 3

Технические характеристики БПЛА самолетного типа [12]–[15]

S-350	
Размах крыльев	3,5 м
Длина	0,8 м
Взлетный вес	10 кг
Двигатель	Электрический
Скорость	65–130 км/ч
Дальность связи	90 км
Время полета	до 5 ч
Полезная нагрузка	Стабилизированная видеокамера Стабилизированный тепловизор Фотокамера

став и функции наземного пункта обработки и управления для оценки требуемых технических характеристик бортового беспилотного летательного комплекса.

Шестимоторный беспилотный летательный аппарат вертолетного типа (гексакоптер) представлен на рис. 3.

Для решения задач оперативного экологического мониторинга требуется оборудование специального назначения (радиолокаторы, оптические системы, тепловизоры). Зачастую такое оборудование довольно громоздко по весу и габаритам, поэтому не может быть использовано в качестве полезной нагрузки БПЛА [20]. В качестве такого оборудования для решения заявленных задач могут выступать сверхширокополосный радиолокатор (СШП-радар), малогабаритная радиолокационная станция (РЛС), оптическая система локации.



Рис. 3. Шестимоторный БПЛА вертолетного типа

СШП-радар предназначен для исследования подповерхностных слоев, в частности, исследование структур твердых сред (грунт, лед, песок). Принцип его действия основан на отправке короткого импульса в интересующую точку и получении ответного сигнала, содержащего информацию о структуре исследуемых слоев, а также о глубине, размерах и диэлектрических характеристиках физических объектов, находящихся внутри исследуемой области [19].

Малогабаритная РЛС с электронным управлением положения луча, выполненная по технологии каскадируемых активных фазированных волноводно-щелевых антенных решеток (КАФВ-ЩАР) [21], обеспечивает решение в режиме реального времени следующих задач:

- зондирование окружающего пространства фазоманипулированными импульсами в заданной зоне обзора;
- сжатие принятых сигналов по длительности (дальности);
- обнаружение радиолокационных целей;
- селекцию движущихся целей;
- автоматическое измерение на каждый обзор отсчетов координат и радиальной скорости обнаруженных точечных целей;
- формирование радиолокационной картины совместно с электронной картой местности;
- передачу данных и удаленное управление РЛС.

Методы обработки радиолокационного сигнала основаны на различии свойств полезного сигнала и помехи. Для обеспечения оптимальной обработки принятого сигнала требуется снизить собственные шумы приемника, а также учесть влияние среды на распространения радиоволн, что влечет за собой необходимость использования методов, призванных улучшить соотношение сигнал/помеха, таких как:

- метод накопления;
- частотная фильтрация;
- корреляционный метод;
- согласованная фильтрация;
- нелинейная фильтрация.

Применение в РЛС сложных сигналов позволяет увеличить дальность действия при условии ограниченной величины мощности передатчика. Для обеспечения требуемой разрешающей способности и помехоустойчивости выбираются характеристики зондирующего сигнала [8], [9], [22]. Следующие сложные виды модуляции используют для минимизации уровня боковых лепестков в требуемой плоскости:

- частотно-модулированные сигналы;
- многочастотные сигналы;
- фазоманипулированные сигналы;

- сигналы с кодовой фазовой модуляцией;
- дискретные частотные сигналы;
- составные сигналы с кодовой частотной;
- комбинация нескольких видов модуляции.

Благодаря высокому уровню унификации узлов и деталей, оригинальной системе цифровой обработки сигналов, а также применению антенн с электронным сканированием современная технология позволяет проектировать высокоинформативные малогабаритные РЛС с различными техническими характеристиками в зависимости от требуемых задач.

Оптическая локационная система представляет собой камеру высокого разрешения с поворотным устройством и стабилизатором, сопряженную с GPS/GLONASS-модулем.

Ключевым преимуществом интеграции разнотипного оборудования в единый комплекс на базе нескольких БПЛА является возможность автономного исследования зон бедствий и труднодоступных мест в целях экологического мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций. Комплексная обработка информации от этих устройств предполагает наличие на наземном пункте управления высокоскоростного вычислителя, представленного на рис. 4. В частности, возможно применение выдвижного дисплея для графического отображения информации и задания точной регулировки настроек.

Суммарный вес конструкции малогабаритных устройств локации на БПЛА должен составлять не более 3 кг. Важным фактором при создании единого комплекса оперативного мониторинга является сочетание информации различного типа (радиолокационных данных, видеоданных и др.), дополняющей друг друга и уменьшающей меру неопределенности по отношению к поставленной задаче.

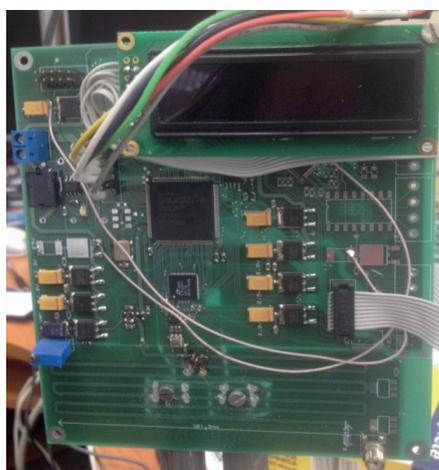


Рис. 4. Плата вычислителя для обработки информации с локационных устройств

## Выводы

Приведенный анализ достоинств и ограничений рассматриваемых систем подтверждает целесообразность их применения. Ключевым моментом в реализации рассмотренных систем являются алгоритмы совмещения полученных данных в единое информационное поле.

Бортовой беспилотный многопозиционный летательный комплекс обладает большим потенциалом при решении задач, связанных с поиском людей и объектов в зоне бедствий и экологических катастроф. Применение комплекса автономного мониторинга на базе БПЛА с мультисенсорной системой локационных устройств позволяет выполнять экологический мониторинг, наблюдение за опасными объектами (лесные пожары, зоны техногенных и естественных ЧС), обнаружение людей и физических объектов при обзоре морских и прибрежных зон. Ключевой особенностью данного беспилотного многопозиционного и мультисенсорного комплекса является использование алгоритмов совместной обработки информации, автономность полета, рациональное соотношение грузоподъемности и длительности полета, а также возможность гибкого перенастраивания оборудования и изменения состава комплекса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 19-79-00303.

## Библиографический список

1. Подоплекин Ю. Ф., Шепета Д. А., Ненасhev В. А. Моделирование входных сигналов бортовой РЛС, обусловленных отражениями зондирующего сигнала от подстилающих поверхностей земли и моря // Морской вестник. 2016. № 4 (60). С. 69–71.
2. Nenashev V. Modeling algorithm for SAR image based on fluctuations of echo signal of the Earth's surface // Proc. of SPIE Remote Sensing. Toulouse, France. 2015. Vol. 9642. P. 96420X-1–96420X-8.
3. Программа для расчета взаимного расположения двухпозиционной РЛС и наблюдаемых объектов в полярной и декартовой системах координат / В. А. Ненасhev, А. П. Шепета, Е. К. Григорьев и др. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018661851, 20.09.2018. Заявка № 2018614572 от 08.05.2018.
4. Nenashev V., Sentsov A., Shepeta A. The Problem of Determination of Coordinates of Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg, 2018. P. 1–5.

5. Features of information processing in the on-board two-position small-sized radar based on UAVs, SPIE Future Sensing Technologies / V. Nenashev, A. Kryachko, A. Shepeta, D. Burylev. Tokyo, Japan, 2019. P. 111970X-1–111970X-7.

6. *Kapranova E., Nenashev V., Sergeev M.* Compression and coding of images for satellite systems of Earth remote sensing based on quasi-orthogonal matrices // Proc. of SPIE, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV. Berlin, Germany. 2018. Vol. 10789. P. 1078923-1–1078923-6.

7. Distributed matrix methods of compression, masking and noise-resistant image encoding in a high-speed network of information exchange, information processing and aggregation, SPIE Future Sensing Technologies / E. Kapranova, V. Nenashev, A. Sergeev et al. Tokyo, Japan, 2019. P. 111970T-1–111970T-7.

8. *Ненашев В. А., Сергеев А. М., Капранова Е. А.* Эксперименты по замене ДКП квазиортогональным преобразованием в алгоритмах сжатия изображений // Научная сессия ГУАП: сб. докл. В 3 ч. Ч. 2. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2018. С. 369–373.

9. *Ненашев В. А., Васильев И. А., Сергеев А. М.* Моделирование сложных кодо-модулированных сигналов для современных систем обнаружения и передачи информации // Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в 3 ч. Ч. 2. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2019. С. 413–417.

10. *Ненашев В. А., Синицын В. А., Страхов С. А.* Исследование влияния промышленных помех на характеристики сжатия фазоманипулированных сигналов в первичных РЛС // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: тр. IX общерос. науч.-практ. конф.: в 2 т. Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. СПб., 2017. С. 351–355.

11. *Айроян З. А., Коркишко О. А., Сухарев Г. В.* Мониторинг магистральных нефтепроводов с помощью беспилотных летательных аппаратов // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4.

12. Свидетельство гос. рег. базы данных 2020621680. Российская Федерация. База данных характеристик беспилотных летательных систем вертолетного типа / М. Б. Сергеев, Е. К. Григорьев, В. А. Ненашев и др.; патентообладатель Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. № 2020621680; дата поступл. 09.09.2020; дата регистр. 15.09.2020.

13. Свидетельство гос. рег. базы данных 2020621690. Российская Федерация. База данных характеристик беспилотных летательных систем самолетного типа / В. А. Ненашев, Е. К. Григорьев, С. А. Ненашев; правообладатель Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. № 2020621690; дата поступл. 07.09.2020; дата регистр. 16.09.2020.

14. Свидетельство гос. рег. базы данных 2020621745. Российская Федерация. База данных характеристик беспилотных летательных систем мультикоптерного типа / М. Б. Сергеев, Е. К. Григорьев., В. А. Ненашев и др.; правообладатель Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. № 2020621745; дата поступл. 10.09.2020; дата регистр. 19.09.2020.

15. *Догерти М.* Дроны: первый иллюстрированный путеводитель по БПЛА / пер. с англ. В. Бычковой, Д. Евтушенко. М.: ГрандМастер, 2017. 224 с.

16. *Аменитский М. В.* Анализ потенциальных угроз системы управления беспилотных летательных аппаратов средних и тяжелых классов // Труды МАИ. 2017. № 94. С. 16.

17. *Бондарев А. Н., Киричек Р. В.* Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 4. С. 13–23.

18. On-Board Unlimited Aircraft Complex of Environmental Monitoring / M. Wattimena, V. Nenashev, A. Sentsov, A. Shepeta. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, 2018. P. 1–5.

19. Performance of UWB Signal Detecting Circuits / A. Shepeta, A. Makhlin, V. Nenashev, A. Kryachko. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, 2018. P. 1–4.

20. *Nenashev V., Sentsov A., Shepeta A.* Formation of radar image the earths surface in the front zone review two-position systems airborne radar. 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). 2019. P. 8840641.

21. *Сенцов А. А., Поляков В. Б., Дмитриев В. Ф.* Комплекс мобильных радиолокационных станций внешнетракторных измерений // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 9. С. 30–35.

22. *Ненашев В. А., Сенцов А. А., Куюмчев Г. В.* Моделирование процесса формирования радиолокационного изображения высокого разрешения в бортовых РЛС. Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 2. № 3. С. 48–56.

УДК 621.39; 615.47:616-072.7

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-123-127

**А. М. Сергеев\***кандидат технических наук,  
старший преподаватель**Н. С. Настуева\*\***

студентка

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

\*\*Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова

## ТЕХНОЛОГИЯ IoT КАК ОСНОВА НОСИМЫХ ОНЛАЙН-МОНИТОРОВ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ

Рассматривается технология IoT для построения глобальных систем мониторинга в здравоохранении. Мониторинг осуществляется удаленно в интересах пациентов с хроническими заболеваниями, инвалидов и беременных. Оцениваются перспективы широкого внедрения IoT в устройства онлайн-мониторинга, особенно в условиях пандемий. Приводятся требования и показываются существующие проблемы общего характера, относящиеся в основном к реализации коммуникаций в системе мониторинга.

**Ключевые слова:** онлайн мониторинг, IoT, IoT, глобальные коммуникации, мобильность пациентов, вовлеченность и удовлетворенность пациентов.

**A. M. Sergeev\***

PhD Sc. Tech., Senior Lecturer

**N. S. Nastueva\*\***

Student

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

\*\*Pavlov First Saint Petersburg State Medical University

## IoT TECHNOLOGY AS THE BASIS OF WEARABLE ONLINE MONITORS FOR DISTRIBUTED SYSTEMS IN HEALTHCARE

IoT technology for building global monitoring systems in health care is being considered. Monitoring is carried out remotely for the benefit of patients with chronic diseases, the disabled and pregnant women. The prospects for the wide introduction of IoT into online monitoring devices, especially in pandemics, are assessed. Requirements are presented and existing problems of a general nature are shown, mainly related to the implementation of communications in the monitoring system.

**Keywords:** online monitoring, IoT, IoT, global communications, patient mobility, patient engagement and satisfaction.

### Введение

Создание дистанционных систем и входящих в них устройств сегодня базируется не только на достижениях медицинской науки, но и на достижениях техники, прогресс в которой ставит задачу выбора технических решений в совокупности с удовлетворением требований медицинских технологий.

Соединение технологий глобальных коммуникаций и современных медицинских технологий в значительной степени определяют облик систем дистанционного наблюдения за функционированием жизненно важных систем организма человека, за его состоянием.

Сегодня в медицине чрезвычайно востребованной является технология Internet of Things

(IoT) – интернет вещей. Она настолько проникла в различные решения для медицины, что появился отдельный специальный термин «Internet of medical things», учитывающий специализацию и получивший аббревиатуру IoT [1]–[3].

Указанная технология помогает автоматизировать и обрабатывать результаты процессов наблюдения за пациентами, контроля за состоянием хронических больных, инвалидов и беременных при обеспечении мобильности как наблюдаемого, так и врача.

Однако особую важность развитие дистанционного онлайн-мониторинга приобретает в условиях массового распространения инфекционных заболеваний и необходимости изоляции населения.

Целью настоящей работы является анализ преимуществ технологии IoMT как основы для создания систем дистанционного онлайн-мониторинга в здравоохранении и оценка перспектив при создании распределенных систем мониторинга в здравоохранении.

**Концепции онлайн-мониторинга и их особенности**

Носимые (мобильные) устройства, находящиеся на постоянной связи через интернет-коммуникации с сервером медицинского учреждения и развитой структурой взаимодействия лечащего врача и экспертов, – тренд в создании нового типа систем мониторинга состояния пациентов.

Эта технология, позволяя пациенту находиться под длительным/постоянным наблюдением, освобождает его от необходимости сохранять свое местоположение, располагаясь в непосредственной близости к подключенной к среде Интернет компьютерной технике. Она повышает вовлеченность пациентов в технологические новшества в здравоохранении и их удовлетворенность, поскольку взаимодействие с врачами стало легким и эффективным [2], [3], а процесс доступа к нему – прозрачным.

С точки зрения здравоохранения IoT также оказывает значительное влияние на существенное снижение расходов и улучшение результа-

тов лечения, а это является важными аспектами реализации принципов здравоохранения и организации работы медицинских учреждений следующего поколения.

С учетом специфики медицинских технологий наблюдения за пациентами, сопровождения их в период реабилитации можно дать общее определение технологии IoMT – это технология глобального сетевого постоянного (непрерывного) взаимодействия пациента и врача (консультанта), оснащенных специализированными вычислительно-коммуникационными средствами, позволяющими осуществлять мониторинг состояния организма пациента.

Цель применения технологии IoMT – минимизация требований к пациенту-пользователю в части обслуживания им собственных потребностей в процессе мониторинга, без территориальных ограничений.

Онлайн-мониторинг вне зависимости от его функционального назначения развивается сегодня согласно двум основным концепциям, связанным с разработкой специализированных носимых устройств (рис. 1) и приспособлением части функционала существующих смартфонов (рис. 2).

Первая концепция основана на возможности разработки уникальных, решающих конкретные задачи устройств с обеспечением оптимального потребления энергии аккумуляторов [4] и распределения вычислительной нагрузки между носимым устройством и сервером меди-



Рис. 1. Реализация системы онлайн-мониторинга согласно первой концепции

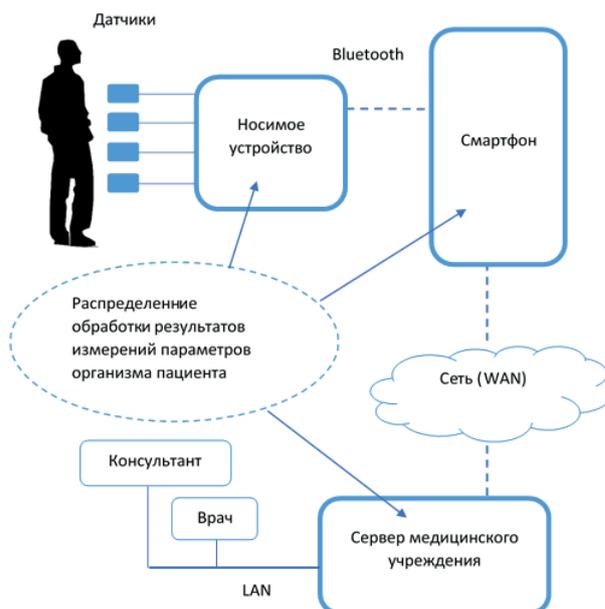


Рис. 2. Реализация системы онлайн-мониторинга согласно второй концепции

цинского учреждения. Под вычислительной нагрузкой здесь подразумевается обработка результатов измерений параметров организма пациента.

Разрабатываемые по этой концепции носимые онлайн-мониторы включают в себя [5], [6] различные датчики, многоканальные усилители биопотенциалов с аналого-цифровыми преобразователями, высокопроизводительное вычислительное ядро, модули беспроводной связи WiFi и BlueTooth, модуль связи через сеть Интернет.

Вторая концепция предполагает использование заложенных в серийно выпускаемые бытовые устройства (смартфоны) возможностей поддержки мобильной связи, вычислительной мощности, памяти, системы позиционирования, датчиков ускорений, интерфейсов и др. для создания на их основе устройств онлайн-мониторинга [7], [8].

Очевидно, что научные исследования и реальные инженерные разработки в настоящее время ведутся в соответствии с указанными концепциями.

В части реализации онлайн-мониторов по первой концепции этому способствуют:

- значительная миниатюризация элементной базы для медицинских целей при одновременном увеличении удельной емкости памяти и возрастающих вычислительных мощностей процессоров [9];
- возрастание удельной емкости источников питания;
- выпуск цифровых модулей с малым потреблением и подключением к сетям на стандартах 802.11, 802.16, LTE и др.;
- развитие и расширение линейки сверхчувствительных микроминиатюрных датчиков и анализаторов.

Реализации онлайн-мониторов по второй концепции способствуют:

- значительное усовершенствование смартфонов и оснащение их расширенным спектром датчиков и функционала, позволяющего подключать на разных условиях внешние устройства [8];
- снижение удельной стоимости обработки данных на смартфонах.

В целом обе концепции поддерживаются:

- значительным улучшением качества коммуникаций в сетях операторов мобильной связи, а именно увеличением пропускной способности, уменьшением задержек, повышением надежности соединений;
- ростом количества аппаратных решений и разработок программного обеспечения для IoT;

– ростом выпуска устройств с подключением к Интернету ведущими мировыми IT-компаниями.

Все указанное выше в совокупности формирует современный тренд развития IoT, а качественные изменения современной элементной базы носимых устройств являются тем потенциалом, который способствует реализации объемной предобработки контролируемых параметров пациента, а также, например, развития плода в фетальный период [10].

### IoT и существующие проблемы

Суть Интернета вещей впервые исследуется в 1991 г. в работе М. Вайзера о ubiquitous computing [11], где он говорит о начале эры вездесущих коммуницирующих устройств. Однако только в 2001 г. были представлены серийные сетевые устройства с коммуникациями типа machine-to-machine (M2M) через Интернет [12].

В России уже к 2000 г. были созданы устройства, подключаемые напрямую к Интернет: IP-видеокамера, IP-видеомонитор [12], [13], IP-велосипед [14], IP-устройства сбора и обработки аналоговой и цифровой информации [12].

IP-велосипед – манипулятор с бесконечным непрерывным перемещением – уже на этапе разработки позиционировался как тренажер для реабилитации пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями и заболеваниями опорно-двигательной системы. Занятия на нем позволяли перемещаться по контенту виртуальных миров, заменяя рутинные занятия на велоэргометре на виртуальное путешествие, отражаемое на подключенном дисплее. IP-устройство сбора и предобработки информации являлось прообразом модулей распределенных систем сбора измеряемых параметров организма пациента.

В целом можно утверждать, что поддержка и активное развитие концепции IoT крупнейшими IT-гигантами позволили ей стать новой движущей силой, способной коренным образом преобразовать многие отрасли человеческой деятельности, в том числе и современное здравоохранение. Суть IoT как технологии для здравоохранения – создание однородного цифрового пространства, обеспечивающего совместимость, коммуникации между цифровыми медицинскими объектами, обмен информацией и перемещение данных. Именно это делает предоставление медицинских услуг более эффективным и формирует условия получения выгод от их цифровизации.

Однако исследование последних лет [15] показывает, что в Российской Федерации только около 14 % изделий, в которых используется технология IoT, являются решениями для электроники медицинского применения. Более существенная проблема – только около 22 % российских компаний, занимающихся разработкой и производством продуктов и решений для IoMT, планируют дальнейшие работы в области медицинской электроники [15].

Немаловажной проблемой является обеспечение безопасности данных, подключений [16], защиты от кибератак, которые отметили около 58 % участников исследования [15], отсутствие промышленных стандартов (46 %), отсутствие нормативной базы (46 %).

В части вопросов комплексного характера особенно актуальными остаются вопросы, связанные с состоянием сетей общего пользования, их современными возможностями. В частности, внедрение технологии 5G позволяет надеяться, что в наиболее сложных условиях – в местах массового скопления людей с мобильными устройствами будет гарантировано подключение онлайн-мониторов к сети [17], [18] и непрерывность мониторинга параметров здоровья и биометрии даже при переключении с одной технологии передачи данных к другой [19].

## Заключение

Технология IoMT является перспективной для создания и массового производства носимых онлайн-мониторов для распределенных систем в здравоохранении. Применение таких систем не только повышает вовлеченность пациентов в сферу удаленного мониторинга, но и становится определяющим при наблюдении за беременными, пациентами с хроническими заболеваниями и пожилыми пациентами в условиях пандемий.

Интерес IoT-производителей к производству модулей медицинского назначения зависит в основном от их востребованности. Поэтому технология IoMT имеет перспективу широкого внедрения в устройства и технологию онлайн-мониторирования в здравоохранении.

## Библиографический список

1. IoT in Healthcare Expectations for 2020. URL: <https://www.digitalinformationworld.com/2020/02/iot-in-healthcare-expectations-for-2020.html> (дата обращения: 07.10.2020).

2. Internet of Things to healthcare. URL: <https://www.medicaldevice-network.com/comment/bringing-internet-things-healthcare> (дата обращения: 07.10.2020).

3. What can IOT do for HealthCare. URL: <https://www.wipro.com/business-process/what-can-iot-do-for-healthcare> (дата обращения: 07.10.2020).

4. *Востриков А. А., Куртяник Д. В., Сергеев А. М.* Источники питания мобильных опто-информационных систем // *Universum: технические науки*. 2017. № 4 (37). С. 40–45.

5. *Юлдашев З. М., Рагев А. М.* Метод и аппаратно-программный комплекс для оценки функционального состояния и эффективности носимых online-кардиомониторов // *Биотехносфера*. 2019. № 6 (64). С. 10–15.

6. *Анисимов А. А., Глазова А. Ю., Пустозеров Е. А.* Системы удаленного мониторинга здоровья людей с хроническими заболеваниями. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 172 с.

7. Кардиомонитор CardioQVARK. Контроль сердечно-сосудистой системы. URL: <https://cardioqvark.ru/> (дата обращения: 07.10.2020).

8. CardioSecur. URL: <https://www.cardiosecur.com> (дата обращения: 07.10.2020).

9. *Yoshimoto M., Izumi S.* Recent Progress of Biomedical Processor SoC for Wearable Healthcare Application: A Review // *IEICE Trans. Electron*. Vol. E102-C. N 4. P. 245–259.

10. *Боброва Ю. О.* Методы и система удаленного мониторинга состояния плода посредством регистрации фетальной активности. URL: <https://etu.ru/ru/nauchnaya-i-innovacionnaya-deyatelnost/podgotovka-kadrov-vysshey-kvalifikacii/obyavleniya-o-zashitah-doktorskih-i-kandidatskih-dissertaciy> (дата обращения: 07.10.2020).

11. *Weiser M.* The Computer for the 21st Century // *Scientific American Special Issue on Communications, Computers and Networks*. 1991.

12. *Астапкович А. М., Сергеев М. Б., Востриков А. А.* Информационно-управляющие системы на основе Интернет // *Информационно-управляющие системы*. 2002. № 1. С. 12–18.

13. *Сергеев М. Б., Чудиновский Ю. Г.* IP-сеть как основа построения распределенных информационно-управляющих систем // *Информационно-управляющие системы для подвижных объектов*. СПб.: Политехника, 2002. С. 33–42

14. *Сергеев М. Б., Никитин А. А., Никитин А. В.* Принципы построения и реализация пользовательского интерфейса систем тренинга управления подвижными объектами на примере аппаратно-программного комплекса «Велонет» (Velonet) // *Информационно-управляющие системы для под-*

вижных объектов. СПб.: Политехника, 2002. С. 66–78.

15. Исследование радиоэлектронной отрасли. Интернет вещей: потенциал российских компаний // АО «ЦНИИ «Электроника», 2019. URL: <https://www.instel.ru/izdaniya/inform-material/internet-veshchey-potentsial-rossiyskikh-kompaniy> (дата обращения: 07.10.2020).

16. *George V. Neville-Neil*. IoT: The Internet of Terror // *Communications of the ACM*. 2017. Vol. 60. N 10. P. 36–37.

17. *Sergeev A., Blaunstein N*. Evolution of Multiple-Access Networks – Cellular and Non-cellular //

Historical Perspective. Part 1 // Информационно-управляющие системы. 2018. N 4. P. 86–104.

18. *Sergeev A., Blaunstein N*. Evolution of Multiple-Access Networks – Cellular and Non-cellular – in Historical Perspective. Part 2 // Информационно-управляющие систем. 2018. № 5 (96). P. 94–103.

19. *Балонин Н. А., Сергеев М. Б.* Беспроводные персональные сети: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2012. 60 с.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

## БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 007

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-128-131

**А. В. Борисовская\***

ассистент

**А. М. Тюрликов\***

доктор технических наук, профессор

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

### ОБЗОР МЕТОДОВ ДОСТУПА АБОНЕНТОВ К ОБЩЕМУ КАНАЛУ В СИСТЕМАХ С ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕОГРАНИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ АБОНЕНТОВ И ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ «УСПЕХ-НЕУСПЕХ»

Представлен обзор существующих методов доступа абонентов к общему каналу в системах с потенциально неограниченным числом абонентов и обратной связью «Успех-Неуспех». Приведены результаты работы одного из алгоритмов для двоичной обратной связи «Успех-Неуспех», которые были получены с помощью имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** системы связи с неограниченным числом абонентов, системы передачи данных с двоичной обратной связью, общий канал связи, случайный множественный доступ.

**A. V. Borisovskaya\***

Assistant

**A. M. Turlikov\***

Dr. Sc. Tech., Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

### OVERVIEW OF METHODS OF USER ACCESS TO A COMMON CHANNEL IN SYSTEMS WITH A POTENTIALLY UNLIMITED NUMBER OF USERS AND FEEDBACK «SUCCESS-FAILURE»

This article provides an overview of existing methods of user access to a common channel in systems with a potentially unlimited number of users and feedback «Success-Failure». The results of one of the algorithms execution for binary feedback «Success-Failure», which were obtained using simulation, are presented.

**Keywords:** communication systems with an unlimited number of users, data transmission systems with binary feedback, common communication channel, random multiple access.

Современная технология, которая получила название интернет вещей, позволяет объединять в единую сеть с общим центром (базовой станцией) неограниченное число устройств, таких как «умные» часы, спортивные браслеты, системы «умного» дома и т. п. В связи с тем, что большинство устройств оснащены маломощным передатчиком, базовая станция часто не может отличить ситуации в канале «Конфликт» (передавало несколько абонентов или устройств) и «Пусто» (никто не передавал). Таким образом,

интернет вещей можно рассматривать как систему связи с неограниченным числом абонентов (устройств) и двоичной обратной связью «Успех-Неуспех». С появлением концепции интернета вещей проблема доступа абонентов к общему каналу в системах с потенциально неограниченным числом абонентов и обратной связью «Успех-Неуспех» вновь становится актуальной.

Приведем краткий обзор работ, в которых предложены различные решения данной проблемы.

Таблица 1

Модели систем с двоичной обратной связью «Успех-Неуспех»

Модель системы	Работы, в которых рассматривается двоичная обратная связь «Успех-Неуспех»
Базовая модель	[15]
Базовая модель + информация о времени появления пакета	[12], [13]
Базовая модель + специальный тестовый пакет	[10], [11]
Базовая модель + дополнительное расширение	[14]

В работах [1], [2] была рассмотрена система с троичной обратной связью (возможны три ситуации в канале: «Успех», «Конфликт» и «Пусто») и бесконечным числом абонентов, то есть пуассоновским входным потоком с интенсивностью  $\lambda$ . Опираясь на предположение, что всем абонентам известно общее число сообщений  $N_n$ , находящихся в системе в момент времени  $n$ , каждый абонент передает свое сообщение с вероятностью  $p_n = 1/\max(1, N_n)$ . Данный алгоритм устойчив, если интенсивность входного потока  $\lambda$  ниже  $e^{-1}$ .

В работах [3]–[7] были предложены различные алгоритмы случайного множественного доступа для системы с троичной обратной связью, которые также стабильны только для  $\lambda < e^{-1}$ .

Алгоритмы случайного множественного доступа для систем с двоичной обратной связью были предложены в работах [8], [9], где рассматривались два вида двоичной обратной связи: «Конфликт-Неконфликт» и «Пусто-Непусто». Для данных видов обратной двоичной связи доказано, что не существует устойчивого алгоритма при  $\lambda \geq e^{-1}$ .

В работах [10], [11] была введена расширенная модель системы с двоичной обратной связью «Успех-Неуспех» и предложены алгоритмы, при которых пропускная способность системы равна  $e^{-1}$ . Предложенные алгоритмы стабильны при  $\lambda < e^{-1}$  за счет расширения системы, то есть за счет дополнительного тестового пакета, в котором содержится дополнительная информация о ситуации в окне.

В работах [12], [13] рассмотрена система с двоичной обратной связью «Успех-Неуспех» с дополнительным расширением (абоненту известна информация о времени появления у него сообщения). В этой работе показано, что существует алгоритм, который стабилен при  $\lambda < 0,317$ . В работе [14] предложены алгоритмы для системы с некоторым дополнительным расширением и обратной двоичной связью «Успех-Неуспех».

В работе [15] предложен алгоритм для системы с обратной двоичной связью «Успех-Неуспех» без дополнительных тестовых пакетов и других дополнительных опций. Этот алгоритм основан на дополнительной рандомизации. В данной работе доказано, что алгоритм работает стабильно при  $\lambda \in [\lambda_0, \lambda_1]$ , если  $0 < \lambda_0 < \lambda_1 < e^{-1}$ . Кроме того, в работе [15] сформулирована гипотеза о существовании алгоритма, который обеспечивает стабильную работу системы при любых  $\lambda: \lambda < e^{-1}$ . В работе [16] приведено доказательство данной гипотезы.

Модель системы без дополнительных расширений будем называть базовой моделью. Для нас

наибольший интерес представляет базовая модель системы с двоичной обратной связью «Успех-Неуспех», так как она наиболее близка к интернету вещей.

Двоичная обратная связь «Успех-Неуспех» рассматривается в работах [10]–[15]. Сведения о моделях систем, используемых в данных работах, приведены в табл. 1.

Из обзора работ можно сделать вывод, что только в работе [15] рассматривается базовая модель системы с двоичной обратной связью «Успех-Неуспех». Опишем алгоритм, предложенный в работе [15], но с небольшой модификацией, которая заключается в добавлении нового параметра алгоритма. Предполагается, что в системе имеется неограниченное число абонентов, то есть рассматривается система с пуассоновским входным потоком с интенсивностью  $\lambda$ . Предполагается, что в системе есть базовая станция, которая синхронизирует работу системы. Все время работы системы разбито на окна. Все абоненты знают моменты разделения окон и могут начинать передачу только в начале окна. Все сообщения у всех абонентов имеют одинаковую длину. Длительность окна равна времени передачи одного сообщения. В каждом окне может происходить одно из трех событий «Успех», «Пусто» или «Конфликт», но базовая станция может различать только два события в окне «Успех» и «Неуспех». Абоненты не знают количество абонентов, имеющих готовый для передачи пакет, но в каждом окне абоненты могут оценить его. Пусть оценка количества абонентов –  $S_t$ , где  $t$  – номер окна. Предполагается, что до начала работы системы в ней имеется один абонент, имеющий готовый для передачи пакет, то есть  $S_t = 1$ . В каждом окне  $t$  генерируется случайная величина  $I_t$ , которая с веро-

ятностью  $1/2$  принимает значение  $0$  и с вероятностью  $1/2$  принимает значение  $1$ . Вероятность, с которой абоненты передают сообщение в окне  $t$ , вычисляется следующим образом:

$$P_t = \begin{cases} \beta/S_t, & \text{если } I_t = 0 \\ 1/S_t, & \text{если } I_t = 1 \end{cases},$$

где  $\beta$  – параметр алгоритма и  $\beta \in (0,1)$ . Абоненты вычисляют  $S_{t+1}$  с помощью предыдущего значения  $S_t$ :

$$S_{t+1} = \begin{cases} S_t + C, & \text{если Неуспех} \\ S_t + B, & \text{если Успех и } I_t = 0 \\ \max(S_t - (B + \delta), 1), & \text{если Успех и } I_t = 1 \end{cases},$$

где  $C$ ,  $B$  и  $\delta$  – параметры алгоритма. Параметр  $\delta$  – новый параметр алгоритма. При  $\delta = 0$  данный алгоритм полностью совпадает с алгоритмом, предложенным в работе [15].

В работах [12], [13] и [15] предлагаются алгоритмы для обратной двоичной связи «Успех-Неуспех» и описывается на качественном уровне эффект высокой задержки при низких интенсивностях входного потока, но ни в одной из данных работ количественных оценок задержки не дается. В настоящей работе было проведено имитационное моделирование алгоритма,

предложенного в работе [15]. В результате моделирования была получена зависимость средней задержки  $d$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  (рис. 1, случай  $\delta = 0$ ). Для удобства отображения значений задержки на оси ординат был выбран логарифмический масштаб. Из графика видно, что алгоритм устойчив при  $\lambda \in [\lambda_0, \lambda_1]$  и  $0 < \lambda_0 < \lambda_1 < e^{-1}$ , что было доказано в работе [15].

Таким образом, имитационное моделирование является наглядным подтверждением стабильной работы данного алгоритма при интенсивности входного потока из некоторого интервала. Кроме того, с помощью имитационного моделирования удалось установить, что введение параметра  $\delta$  позволяет уменьшить задержку при низких интенсивностях входного потока. Однако с увеличением параметра  $\delta$  задержка при высоких интенсивностях входного потока возрастает.

В рамках данного обзора были рассмотрены существующие методы доступа абонентов к общему каналу в системах с неограниченным числом абонентов и двоичной обратной связью «Успех-Неуспех». В одной из рассмотренных работ [15] для системы с двоичной обратной связью «Успех-Неуспех» без каких-либо дополнительных расширений был предложен алгоритм, который для некоторых значений интенсивности входного потока  $\lambda \in [\lambda_0, \lambda_1]$  и  $0 < \lambda_0 < \lambda_1 < e^{-1}$  обеспечивает стабильную работу системы. Недостатком данного алгоритма является большая

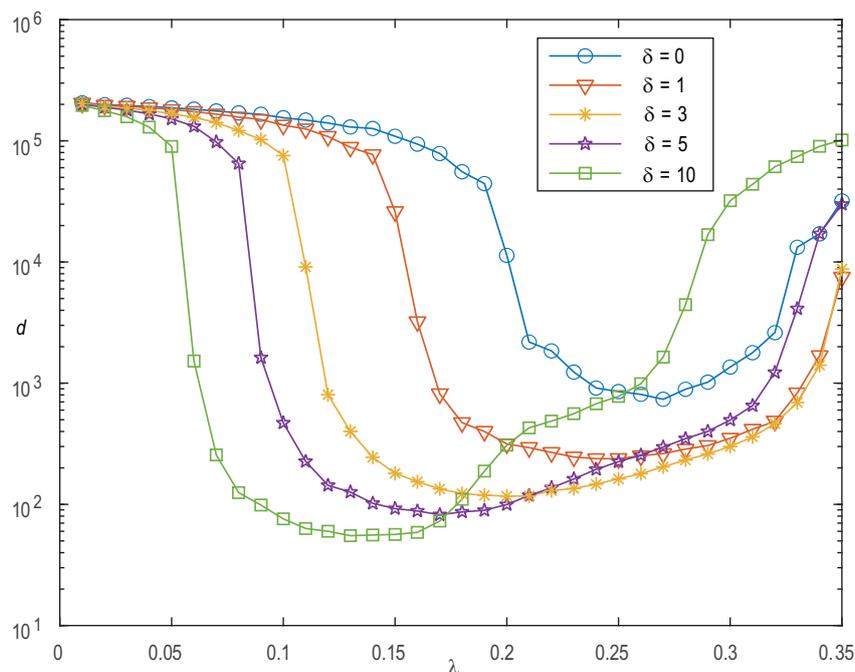


Рис. 1. Зависимость средней задержки от интенсивности входного потока (при  $\beta=0,55$ ,  $B=10$ ,  $C=0,55$ )

задержка при низких интенсивностях входного потока. Согласно сформулированной в работе [15] и доказанной в работе [16] гипотезе существует алгоритм, который будет обеспечивать стабильную работу системы при любых  $\lambda: \lambda < e^{-1}$ . Таким образом, актуальной проблемой и целью дальнейших исследований является задача разработать алгоритм, который при низких интенсивностях входного потока будет работать устойчиво.

### Библиографический список

1. *Fayolle G., Gelemb E., Labetoulle J.* Stability and optimal control of the packet switching broadcast channel // *J. of Assoc. Comput. Mach.*, 1977. N 24. P. 375–386.
2. *Falin G.* Random processes in structurally complex queueing systems: Diss. d.f.-m.s. M.: MSU, 1989.
3. *Цыбаков Б. С., Михайлов В. А.* Свободный синхронный доступ пакетов в широкополосный канал с обратной связью // *Проблемы передачи информации*. 1978. № 14:4. С. 32–59.
4. *Capetanakis J.* Tree algorithms for packet broadcast channels // *IEEE Transactions on Information Theory*. 1979. N 25:5. P. 505–515.
5. *Hajek B., Loon T.* Decentralized dynamic control of a multiaccess broadcast channel // *IEEE Trans. Automatic Control*, 1982. N 27:3/ P. 559–569.
6. *Михайлов В. А.* Геометрический анализ устойчивости цепей Маркова в  $R_+^n$  и его приложение к вычислению пропускной способности адаптивного алгоритма случайного множественного доступа // *Проблемы передачи информации*. 1988. № 24:1. С. 61–73.
7. *Фосс С. Г.* Стохастически рекурсивные последовательности и их применение в теории систем обслуживания: дисс. д-ра физ.-матем. наук. Новосибирск, 1992.
8. *Mehravari N., Berger T.* Poisson multiple-access contention with binary feedback // *IEEE Transactions on Information Theory*. 30:5. 1984. P. 745–751.
9. *Paris B., Aazhang B.* Near-optimum control of multiple-access collision channels // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 1992. N 40. P. 1298–1308.
10. *Цыбаков Б. С., Белояров А. Н.* Случайный множественный доступ в канале с двоичной обратной связью вида «успех-неуспех» // *Проблемы передачи информации*. 1990. № 26:3. С. 67–82.
11. *Цыбаков Б. С., Белояров А. Н.* Случайный множественный доступ в канале с двоичной обратной связью / Б. С. Цыбаков, А. Н. Белояров // *Проблемы передачи информации*. 1990. № 26:4. С. 83–98.
12. *Тюрликов А. М., Фосс С. Г.* Об эргодических алгоритмах в системах случайного множественного доступа с обратной связью «успех-неуспех» // *Проблемы передачи информации*. 2010. 46:2. С. 91–109.
13. *Malkov A., Turlikov A.* Random multiple access protocols for communication systems with «success-failure» feedback // *IEEE International Workshop on Information Theory*. 1995. P. 1–39.
14. *Чебунин М. Г., Фосс С. Г.* О стабильности систем случайного множественного доступа с минимальной обратной связью // *Сибирские электронные математические известия*. 2019. С. 1805–1821.
15. *Фосс С. Г., Хайек Б., Тюрликов А. М.* Протоколы с двоичной рандомизацией для системы множественного доступа с обратной связью «успех-неуспех» // *Проблемы передачи информации*. 2016. № 52:2. С. 61–71.
16. *Чебунин М. Г.* Об эргодических алгоритмах в системах случайного множественного доступа с частичной обратной связью // *Сибирские электронные математические известия*. 2016. № 13. С. 762–781.

УДК 51-74

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-132-137

**К. А. Бостанбеков\***

магистр, исследователь

**Г. Д. Георгиев\*\***

кандидат технических наук, исследователь

**Д. К. Ким\*\*\***

кандидат физико-математических наук, профессор, исследователь

\*Казахский Национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

\*\*Центр энергетических решений, Варна, Болгария

\*\*\*Университет Нархоз, Алматы, Казахстан

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ В СТРУКТУРЕ ГЕНЕРАЦИИ

Разработана математическая модель функционирования энергосистемы с солнечной электрической станцией (СЭС) в структуре генерации на основе упрощенной энергосети Жамбылской области Казахстана с СЭС «Бурное». Модель включает в себя системного оператора, линии электропередач, тепловые электростанции, гидроэлектростанцию, одну СЭС, две конденсаторные батареи, один реактор, один синхронный компенсатор и четыре трансформатора. Математическая модель функционирования энергосистемы позволяет в строгом виде сформулировать постановки задач, связанные с работой возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

**Ключевые слова:** математическая модель, возобновляемые источники энергии, солнечная электростанция, оптимальное управление, оценка максимальной мощности СЭС.

**K. A. Bostanbekov\***

Master, Researcher

**G. D. Georgiev\*\***

PhD Sc. Tech., Researcher

**D. K. Kim\*\*\***

PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor, Researcher

\*Kazakh National Technical University, Almaty, Kazakhstan

\*\*Center for energy solutions, Varna, Bulgaria

\*\*\*Narxoz University, Almaty, Kazakhstan

## MATHEMATICAL MODEL OF THE POWER SYSTEM WITH A SOLAR POWER PLANT

A mathematical model of operation of the power system with a solar power plant (SPP) based on the simplified power grid of Zhambyl Region of Kazakhstan with the SPP "Burnoye" was developed. The model includes a system operator, transmission lines, thermal power plants, hydroelectric power plant, one SPP, two capacitor banks, one reactor, one synchronous compensator and four transformers. The mathematical model of power system operation allows a rigorous formulation of problem statements related to the operation of renewable energy sources (RES).

**Keywords:** mathematical model, renewable energy sources, solar power plant, optimal control, maximal capacity of SPP.

### Введение

В связи со строительством электростанций на основе использования ВИЭ в Казахстане возникает актуальная задача их интеграции в существующие электрические сети с учетом случайных изменений вырабатываемой мощности, вызванных непредсказуемыми колебаниями скорости ветра и солнечной радиации. Сразу же оговоримся, что под ВИЭ мы понимаем солнечные и

ветряные электрические станции. При интеграции ВИЭ приходится управлять большим числом процессов, связанных со стохастической природой ВИЭ, чем в традиционной энергосистеме, которая отличается высокой степенью предсказуемости и поэтому невозможностью планирования нагрузки в штатном режиме функционирования. Таким образом, возникает целый ряд вопросов о поведении энергосистемы в новых условиях с учетом ВИЭ в структуре генерации.

Следует отметить, что хотя проблема интеграции ВИЭ касается всех энергосистем с возрастающей долей ВИЭ, каждая из них уникальна и требует отдельного рассмотрения. Энергосистема Казахстана, в отличие от западных аналогов [1], характеризуется дефицитом маневренных мощностей, большой протяженностью линий электропередач высокого напряжения (ВН) со значительной генерацией реактивной мощности, высоким пространственным разбросом объектов энергопроизводства и потребления, централизованными принципами управления, концентрацией крупных генерирующих мощностей и значительным износом основного оборудования [2], [3]. Для таких систем вопросы интеграции ВИЭ мало изучены, в связи со слабым развитием ВИЭ. Таким образом, известные результаты для энергосистем других стран не совсем подходят для прямого применения в казахских условиях.

В данной работе мы сконцентрируемся только на вопросах балансирования мощностью и управления напряжением на примере упрощенной модели энергосистемы ВН Жамбылской области с СЭС «Бурное». Сразу же оговоримся, что для своих расчетов мы рассматриваем упрощенную модель с определенными характеристиками, которые, на наш взгляд, позволяют ухватить основные моменты работы всей энергосистемы Казахстана. Привязка к СЭС «Бурное» обусловлена только желанием получения конкретных результатов для функционирующей энергосистемы Казахстана, хотя приведенные результаты могут быть естественным образом применены для других ВИЭ.

Большая часть энергии в Казахстане производится на маломаневренных тепловых электростанциях (ТЭС). В энергосистеме имеются также гидроэлектростанции (ГЭС), но возможность их использования для балансирования довольно ограничена по различным причинам, связанным с их загруженностью и поддержанием водного режима. Таких инструментов регулирования, как гидроаккумулирующие электростанции, в Казахстане нет; балансирующий рынок еще не запущен; договорное отключение потребителей в случае нехватки мощностей не используется. Имеется возможность балансирования с помощью трансграничных перетоков, но есть существенные ограничения по их использованию. Таким образом, для изучения возможности интеграции ВИЭ в энергосистему необходимо формализовать имеющиеся инструменты балансирования (ТЭС, ГЭС, трансграничные перетоки) в виде строгой математической модели и при ее построении уделить особое вни-

мание именно управлению с помощью такого инструмента, как ТЭС.

Разработка адекватной математической модели функционирования любой энергосистемы с учетом ВИЭ зависит от многих факторов: типов и объемов регулирующих мощностей, правил работы ВИЭ в энергосистеме, договоренностей с соседними энергосистемами по трансграничным перетокам и многим другим правилам функционирования. Опишем ситуацию с энергосистемой Казахстана.

Функционирование энергосистемы Казахстана в самом кратком виде можно описать следующим образом: системный оператор (СО) за сутки вперед собирает данные от производителей и потребителей энергии и разрабатывает суточный почасовой график производства-потребления электроэнергии таким образом, чтобы в каждый момент времени производилось энергии ровно столько, сколько требуется для потребления. Согласно этому графику СО знает заранее, сколько энергии, кто и когда производит или потребляет на следующий день. Если возникают небалансы, то СО использует свои регулирующие мощности для достижения баланса. В целом функционирование энергосистемы без ВИЭ можно охарактеризовать высокой предсказуемостью и очень малыми колебаниями от прогнозного графика. Что касается ВИЭ, то, как уже отмечалось, правила для их управления не до конца проработаны, поэтому они, так же как и остальные, подают СО прогнозный график на сутки вперед, но при этом не несут никакой ответственности за его нарушение. Так как мощности ВИЭ в Казахстане в данный момент невелики, то и колебания расхождений между прогнозными и реальными значениями выработки не влияют на функционирование энергосистемы. Вместе с тем, с увеличением объемов ВИЭ ситуация поменяется, и именно этот случай требует изучения.

В рамках данной работы была разработана математическая модель функционирования энергосистемы с СЭС в структуре генерации, которая позволяет в строгом виде сформулировать постановки задач для различных задач балансирования энергосистемы.

### Модель энергосистемы

Рассмотрим упрощенную модель энергосистемы на основе сети ВН Жамбылской области. Положим, что энергосистема состоит из 15 системообразующих подстанций, одна из которых связывает энергосистему Казахстана с системой



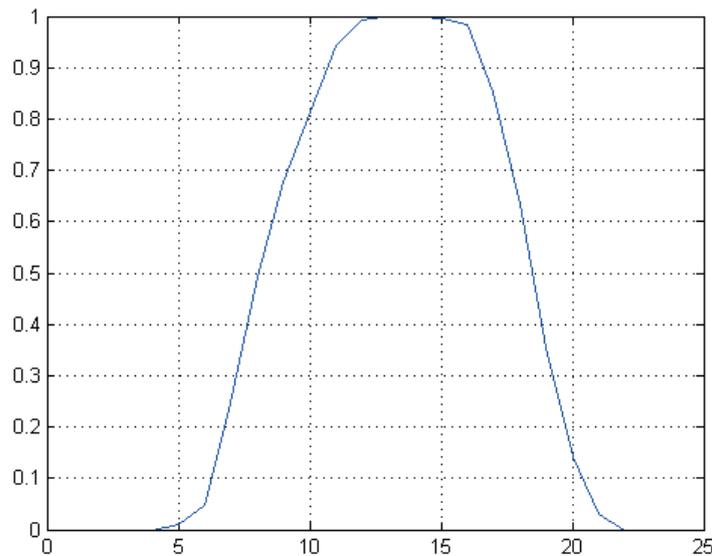


Рис. 2. График  $\delta_n$

выработки от времени суток и зависит, помимо географических и сезонных факторов, также и от технических параметров СЭС. На рис. 2 приведен суточный график  $\delta_n$  для СЭС «Бурное».

Пусть  $TP_n$  – активная мощность ЖГРЭС в момент времени  $n$ . ЖГРЭС не может иметь больше своей номинальной мощности и ниже определенного значения, если не учитывать возможность остановки генератора и его запуска из холодного состояния, поэтому

$$0 \leq \underline{TP} \leq TP_n \leq \overline{TP}. \quad (1)$$

Также для ЖГРЭС имеются ограничения на скорость набора и сброса мощности:

$$|TP_n - TP_{n-1}| \leq K, \quad (2)$$

где  $K > 0$  – некоторая константа.

Более того, для управления ЖГРЭС требуется умелое и тонкое согласование многих сопряженных агрегатов – котлов, насосов, мельниц, транспортных лент, дымовых вентиляторов и прочее, не все они достаточно гибкие в своих режимах, поэтому положим, что ЖГРЭС может находиться только в трех состояниях: уменьшение мощности, постоянная мощность и увеличение мощности, и переход (или переключение) за один момент времени из состояния уменьшения мощности в состояние ее увеличения и, наоборот, невозможен. Пусть

$$\gamma_n = \begin{cases} 1, & \text{если } TP_n > TP_{n-1} \\ 2, & \text{если } TP_n = TP_{n-1} \\ 3, & \text{если } TP_n < TP_{n-1} \end{cases}$$

Тогда соотношение (2) принимает вид:

$$TP_n \leq TP_{n+1} \leq TP_n + K > 0, \text{ если } \gamma_n = 3$$

$$TP_n - K \leq TP_{n+1} \leq TP_n + K > 0, \text{ если } \gamma_n = 2 \quad (3)$$

$$TP_n - K \leq TP_{n+1} \leq TP_n > 0, \text{ если } \gamma_n = 1.$$

Для активной мощности ГЭС  $HP_n$  имеются следующие ограничения:

$$0 \leq HP_n \leq HP \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N HP_n \leq \overline{HP}, \quad (5)$$

где  $HP$  – максимальная мощность ГЭС и  $\overline{HP}$  связано с ограничениями водного режима.

Предположим, что согласно двусторонним договоренностям перетоки активной мощности  $BP_n$  из и в соседнюю энергосистему ограничены определенным порогом, то есть

$$\underline{BP} \leq BP_n \leq \overline{BP}, \quad (6)$$

где  $BP_n$  – активная мощность БУ,  $\underline{BP} \leq 0 \leq \overline{BP}$ .

Обозначим мощность батареи конденсаторов как реактивную мощность шунта в Ванновке  $CQ_n^{(1)} \geq 0$  и в Чулак-Кургане как  $CQ_n^{(2)} \geq 0$ .

Кроме условий (1)–(6) есть еще множество условий, например, связанных с поведением реактивной мощности, которые мы не будем детализировать.

Состояние энергосистемы с переменным током в фиксированный момент времени может быть описано при помощи ее эквивалентной модели с постоянными параметрами (напряжение, мощность, ток) на множестве комплексных чисел, которые связаны между собой в виде некоторой системы функциональных уравнений. Если решение этой системы существует, то состояние называется *установившимся режимом*.

Энергосистему можно рассмотреть как связанный граф (т. е. любые 2 узла связаны между собой ребром или цепочкой ребер), где узлы соответствуют станциям и подстанциям, а ребра – линиям электропередач и трансформаторам. Для простоты изложения будем говорить, что узел производит или потребляет мощность, подразумеваемая прикрепленные к нему нагрузки и/или генераторы.

Предположим, что энергосистема состоит из  $s$  узлов и  $l$  линий. Каждый узел  $i$  в момент времени  $n$  характеризуется вектором  $V_n^{(i)} = (P_n^{(i)}, Q_n^{(i)}, U_n^{(i)})$ , где  $P_n^{(i)}$  – активная мощность,  $Q_n^{(i)}$  – реактивная мощность и  $U_n^{(i)}$  – модуль отношения напряжения узла к его номинальному напряжению. Положим, что  $P > 0$  ( $Q > 0$ ), если узел генерирует активную (реактивную) мощность, и  $P < 0$  ( $Q < 0$ ), если узел потребляет мощность.

Кроме упомянутых свойств каждый узел и линия имеют еще ряд таких характеристик, как угол вектора напряжения, длина линии, ее активное и реактивное сопротивления, коэффициент трансформации и многое др., детали, которые мы опустим.

Таким образом, поведение системы в течение  $N$  моментов времени описывается векторами  $(V_n^{(1)}, V_n^{(2)}, \dots, V_n^{(s)})$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ . Так как мы изучаем поведение энергосистемы при различных значениях активной мощности ВИЭ, то в дальнейшем под энергосистемой будем понимать  $(V_n^{(1)}, V_n^{(2)}, \dots, V_n^{(s)})$  без активной мощности ВИЭ, чье значение будет определяться отдельно.

СО обязан поддерживать напряжения в системе, что означает принадлежность их значений определенному допустимому интервалу. Формализуем это понятие.

*Определение 1.* Будем говорить, что энергосистема находится в нормальном установившемся режиме в момент времени  $n$ , если существует установившийся режим и

$$\min\{U_n^{(1)}, U_n^{(2)}, \dots, U_n^{(s)}\} \geq 0.95,$$

$$\max\{U_n^{(1)}, U_n^{(2)}, \dots, U_n^{(s)}\} \leq 1.05.$$

В связи с наличием СЭС, которая генерирует только активную мощность, возникает ряд задач: оптимальное управление энергосистемой, оценка максимальной мощности СЭС, безопасной для энергосистемы с точки зрения обеспечения баланса и поддержания напряжения.

Сформулируем задачу оценки максимальной мощности СЭС (см. [4] без условия (3)). Пусть  $G_0$  – допустимое множество начальных состояний энергосистемы. Задача по оценке максимальной мощности СЭС, которая может быть интегрирована в энергосистему, сформулируем в следующем виде: для любого начального  $(V_0^{(1)}, V_0^{(2)}, \dots, V_0^{(s)}) \in G_0$  требуется найти такое  $\bar{R} = \bar{R}(V_0^{(1)}, V_0^{(2)}, \dots, V_0^{(s)})$ , что для любого  $0 \leq R_n \leq \bar{R}(V_0^{(1)}, V_0^{(2)}, \dots, V_0^{(s)}) \times \delta_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , существует управление энергосистемой, то есть существуют такие вектора:

$$(TP_n, HP_n, CQ_n^{(1)}, CQ_n^{(2)}), \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

удовлетворяющие характеристикам изучаемой энергосистемы (1), (3)–(5), что для любого момента времени система находится в нормальном установившемся режиме и выполнено (6).

Простыми словами, суть постановки – найти максимальную мощность ВИЭ, при которой существует такое управление системой в течение  $N$  моментов времени, что все ее параметры лежат в допустимых пределах, например, траектория напряжения каждого узла не выходит за границы допустимого интервала, и достигается баланс мощности.

Сформулируем также задачу оптимального балансирования в рамках нашей математической модели (см. [5] без условия (3)). Для этого требуется определить вероятностный прогноз генерации СЭС. Для полного отсутствия прогноза его можно определить как последовательность независимых случайных величин  $\{\alpha_n\}$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , таких, что имеют равномерное распределение на отрезке  $[0, \bar{R} \times \delta_n]$  в каждый момент времени  $n$ . Пусть  $C_a$  – стоимость единицы энергии ЖГРЭС;  $C_h$  – стоимость единицы энергии ГЭС;  $C_b$  – стоимость единицы энергии (из и в) БУ. СО стремится уменьшить стоимость балансирования. Реактивная мощность будет бесплатной. Как уже отмечалось, персонал ТЭС из-за сложности технического регулирования и технического износа оборудования стремится, чтобы генерация станции была монотонной, то есть количество переключений, когда генерация снижалась, а затем стала постоянной или после того как была постоянной, потом стала

увеличиваться, было как можно меньшим. Поэтому вполне естественно положить, что каждое такое переключение повышает стоимость использования энергии. Положим, для  $n \geq 1$ , что

$$q_n = \begin{cases} 1, & \text{если } \gamma_n \neq \gamma_{n-1} \\ 1, & \text{если } \gamma_n = \gamma_{n-1} \end{cases}$$

и стоимость переключения равна одной условной единице. Номинальная мощность СЭС не превышает максимального значения  $\bar{R}$ . Пусть, как и ранее, известны суточные графики производства/потребления объектов не для балансирования и начальное состояние системы  $(V_0^{(1)}, V_0^{(2)}, \dots, V_0^{(s)})$ . Тогда для оптимизации расходов на балансирование энергосистемой в течение  $N$  моментов времени требуется найти такое управление, то есть вектора

$$(TP_n, HP_n, CQ_n^{(1)}, CQ_n^{(2)}), \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

удовлетворяющие (1), (3)–(6), чтобы в каждый момент времени система находилась в нормальном установившемся режиме и при этом минимизировать целевой функционал:

$$E \sum_{n=1}^N (C_a \times TP_n + q_n + c_h \times HP_n + c_b \times |BP_n|),$$

где  $E$  – оператор математического ожидания.

## Заключение

Если рассматривать задачу интеграции ВИЭ в энергосистему в общем виде, то следует учесть целый комплекс вопросов от типов и объемов регулирующих мощностей, договоренностей с соседними энергосистемами по трансграничным потокам, погрешностей метеопрогнозирования и правил работы ВИЭ в энергосистеме.

В данной работе были описаны основные характеристики функционирования энергосистемы Казахстана, которые сводятся к медленным тепловым станциям, весьма ограниченным по использованию ГЭС, и ограничениям на трансграничные потоки из и в РФ. На этой основе была построена математическая модель упрощенной энергосистемы Казахстана с учетом ВИЭ в структуре генерации на конкретном примере энергосети Жамбылской области и СЭС «Бурное». В рамках построенной математической модели были строго сформулированы задачи оценки максимальной мощности ВИЭ, безопасной для энергосистемы, и оптимального балансирования.

## Библиографический список

1. *Morales J., Conejo A., Madsen H.* Integrating Renewables in Electricity Markets. Springer. 2014. 429 p.
2. *Холттинен Х., Уски-Йоутсенену С., Кивилуома Ю.* Оценка энергосистемы для целей развития ветроэнергетики в Казахстане. Финальный отчет. Программа развития ООН. Проект ПРООН/ГЭФ и правительства Казахстана, 2011. 64 с.
3. Исследование влияния ВИЭ при существующих возможностях ЕЭС Казахстана (уровень 2015–2020) / Р. Лигаи, В. Тюгай, Н. Таймакова и др. // Энергетика. 2016. С. 24–29.
4. *Kim D., Georgiev G.* Management of the kazakh high-voltage power system in the presence of solar power park // The 9<sup>th</sup> International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering “ELEKTROENERGETIKA 2017”. 2017. P. 64–67.
5. *Georgiev G., Kim D.* Balancing of stochastic generation of a renewable park by means of thermal, hydro power plants and bi-directional flows from neighboring energy networks // The 9<sup>th</sup> International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering “ELEKTROENERGETIKA 2017”. 2017. P. 60–63.

УДК 004.7

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-138-141

**Д. А. Васильев\***

студент

**А. М. Тюрликов\***

доктор технических наук, профессор

**П. ван де Вен\*\***

кандидат технических наук, доцент

**В. В. Шнеер\*\*\***

кандидат физико-математических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

\*\*Центр Математики и Информатики, Амстердам, Нидерланды

\*\*\*Университет Хериота-Ватта, Эдинбург, Великобритания

## МОДЕЛЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В СЕТЯХ 5G

С приходом сетей пятого поколения возникает необходимость изменения структуры вычислительных мощностей внутри сети. Это обусловлено тем, что данное поколение сетей должно стать основой для полномасштабного развития интернета вещей. Так, в структуру сети 5G решили добавить MEC (mobile-edge computing) сервера, которые должны обеспечивать более оперативный ответы из-за снижения задержек. Для подобного рода серверов и возникает задача предоставления пользователю максимально возможного количества вычисляемых мощностей при условии передвижения пользователя внутри сети.

**Ключевые слова:** MEC, моделирование, 5G.

**D. A. Vasilyev\***

Student

**A. M. Turlikov\***

Dr. Sc. Tech., Professor

**P. van de Ven\*\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**V. V. Shneer\*\*\***

PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

\*\*CWI, Amsterdam, the Netherlands

\*\*\*Heriot-Watt University, Edinburgh, United Kingdom

## MODEL OF USING MOBILE EDGE COMPUTING ATTACHED TO USER'S MIGRATION IN 5G

With creation of fifth generation of mobile networks we need to change structure of network's processing powers. We need these changes because this network's generation is base for an Internet of Things. This is why MEC (mobile-edge computing) servers were added to structure of 5G. These servers should decrease delay. For MEC's servers arising task to give user maximum processing power while user migrating through the network.

**Keywords:** MEC, simulation, 5G.

### Введение

Каждый год количество устройств, подключенных к сети Интернет, увеличивается. Сначала к всемирной паутине были подключены только персональные компьютеры, потом добавились смартфоны и другие мультимедийные устройства. Теперь с приходом сетей пятого поколения должен в полной мере раскрыть-

ся потенциал ИОТ (англ. *Internet of Thing* – интернет вещей). А это значит, что к сети будет добавлено подключение огромного множества устройств и датчиков от домашних холодильников до датчиков на производстве. Это, конечно, повлечет увеличение нагрузки на имеющиеся внутри сети вычислительные ресурсы, что приведет к увеличению задержек для абонентов. Для таких устройств, как «умные»

холодильники, скорее всего увеличенная задержка не станет критической. Но вот для таких устройств, как, например, датчики давления на производственном оборудовании, подобное промедление может стать фатальным. Ведь из-за большой задержки он может не успеть среагировать на резко возросшее давление и не применить требуемые в таком случае меры. Помимо недвижимых устройств, есть и мобильные, такие как автомобили, которым также крайне важно получать необходимую информацию. Вот для такого рода устройств мы и хотим промоделировать работу сети. Данная тема сейчас активно обсуждается, это можно увидеть на примере статей [1]–[10]. Однако предложенные в указанных статьях модели достаточно сложны, поэтому в них принципиально невозможно получить аналитические данные. Предоставленная нами модель основывается на ряде параметров, которые в той или иной степени можно взять из реальной системы, но в то же время наша модель отличается меньшей сложностью, что позволяет получать на ее основе аналитические данные. В этой статье рассматриваются система допущений для наиболее общей модели; упрощенная модель с меньшим количеством параметров; заключение, в котором описывается дальнейшее развитие системы.

## Модель системы

Представленная в данной статье модель базируется на следующих допущениях:

*Допущение 0:* в системе имеется  $n$  областей. Пользователи могут появляться в системе в любой области и перемещаться из любой области в любую область.

*Допущение 1:* процесс появления пользователя в  $i$ -й области описывается пуассоновским потоком с интенсивностью  $\lambda_i$ . Объем задачи, который должен выполнить пользователь, распределен по экспоненциальному закону с параметром 1. Вычислительная мощность в  $j$ -й области равняется  $\mu_j$ , то есть при условии, что пользователь не перемещается из этой области и других пользователей в ней нет, время выполнения задачи будет распределено по экспоненциальному закону с параметром  $1/\mu_j$ . Если в области имеются другие пользователи, то время выполнения будет увеличивается (см. допущение 4). Если пользователь перемещается в другую область, то время выполнения задачи также увеличивается (см. допущение 3).

*Допущение 2:* если пользователь находится в области  $i$ , то может произойти одно из следующих событий: выполнение задачи пользователя завершается, и пользователь покидает систему или пользователь перемещается в некоторую область  $j$ . Какое событие произойдет, определяется следующим образом: для всех  $j \neq i$  формируются случайные величины, распределенные по экспоненциальному закону с параметром  $q_{ij}$ . Таких величин у нас формируется  $n - 1$ , к меньшей из них прибавляется времена выполнения работы. Если время выполнения работы меньше, чем время перехода в другую область, то пользователь покидает систему по окончании выполнения своей работы.

*Допущение 3:* если пользователь переходит из любой области в любую, то на перенос задачи с одних мощностей на другие затрачивается время, распределенное по экспоненциальному закону с параметром  $d$ . В этот момент решение задачи не производится.

*Допущение 4:* на базовой станции вычислительные мощности  $\mu_j$ , распределяются между обрабатываемыми задачами поровну. Кроме этого, при удалении пользователя от станции, где обрабатывается его задача, ведет к ослаблению сигнала, что увеличивает время выполнения

в  $\frac{1}{w_{ij}}$ . Тогда время выполнения каждой обрабатываемой задачи распределяется по экспоненциальному закону с параметром  $\frac{1}{\mu_j} k w_{ij}$ , где

$k$  – количество обрабатываемых задач на каждом сервере.

*Допущение 5:* если пользователь, у которого работа выполнялась в области  $k$ , в соответствии с допущением 2 перешел из области  $i$  в область  $j$ , то он с вероятностью  $a_{ijk}$  решит перенести свою работу из области  $k$  в область  $j$ , а с вероятностью  $1 - a_{ijk}$  оставляет свою работу в области  $k$ .

Таким образом, сама модель описывается следующим набором параметров:

$n$  – количество областей, оснащенных вышкой сотовой связи и серверами для вычислений;

$\lambda_i$  – интенсивность появления пользователя в  $i$ -й локации;

$q_{ij}$  – индекс, необходимый для вычисления времени перехода из локации  $i$  в локацию  $j$ ;

$a_{ijk}$  – вероятность того, что пользователь станет переносить свою задачу с одних вычислительных мощностей на другие;

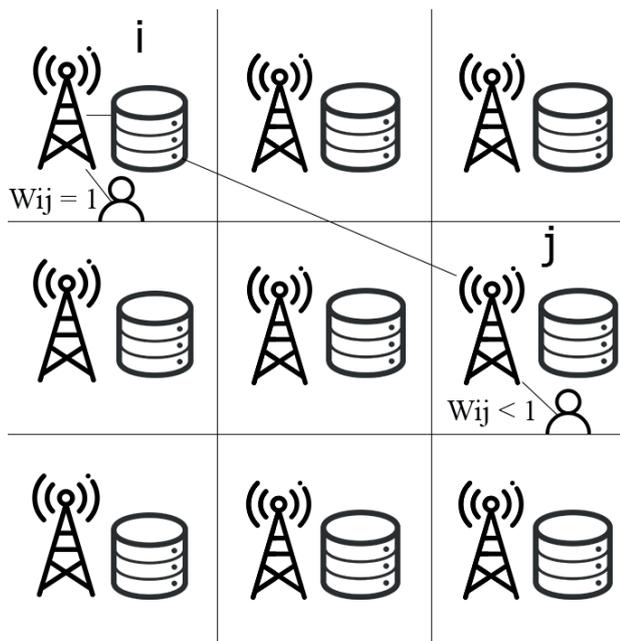


Рис. 1. Зависимость значения коэффициента  $w_{ij}$  от расположения пользователя и его задачи

$d$  – коэффициент, через который рассчитывается время переноса задачи между разными серверами;

$\mu_j$  – коэффициент, показывающий, как быстро может производиться работа в локации  $i$ ;

$w_{ij}$  – коэффициент, который показывает, как изменяется качество сигнала между пользователем и базовой станцией (рис. 1).

Для всех описанных выше величин параметры  $i, j$  принимают следующие значения:  $i, j \in [1, n]$

### Модель симметричной системы

В симметричной модели часть параметров выглядит следующим образом:

$a_{ijk} = 0$  если  $i \neq k$  и, в противном случае  $a_{ijk} = a_i \in (0, 1]$ . Не следует перемещать задачу, если она уже обрабатывается на серверах области, отличной от области местоположения пользователя. Если же пользователь находится в одной области со своей задачей, то последняя может переместиться в другую область вместе с пользователем с вероятностью  $a_i$  или остаться с вероятностью  $1 - a_i$ .

Также будем считать, что  $w_{ij} = w, i \neq j$ . Данное условие означает, что вне зависимости от удаленности пользователя от серверов его задача не будет получать меньше вычислительных ресурсов из-за ухудшения сигнала.

Еще мы принимаем, что  $q_{ij} = 1$ , для всех  $i \neq j$ . Это выражение означает, что все области равноудалены друг от друга.

Таким образом, модель симметричной системы описывается следующим набором параметров:

$n$  – количество областей, оснащенных вышкой сотовой связи и серверами для вычислений;

$\lambda_i$  – интенсивность появления пользователя в  $i$ -й локации;

$d$  – коэффициент, через который рассчитывается время переноса задачи между разными серверами;

$\mu_j$  – коэффициент, показывающий, как быстро может производиться работа в локации  $i$ .

Для всех описанных выше величин параметры  $i, j$  принимают следующие значения:  $i, j \in [1, n]$ .

### Заключение

Модель, описанная в этой статье, является несколько более простой, чем другие подобные ей, приведенные в статьях на данную тематику. Тем не менее рассмотренная модель позволяет получить такие аналитические результаты о работе системы, как интенсивность выходного потока и среднее количество пользователей в системе. Дальнейшим направлением наших исследований станут попытки получить аналитический результат работы системы и сравнить их с результатами, выявленными в результате имитационного моделирования, а также работа над моделью с целью приближения ее к работе реальной системы.

### Библиографический список

1. Ouyang T., Zhou Z., Chen X. Follow Me at the Edge: Mobility-Aware Dynamic Service Placement for Mobile Edge Computing // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2018. N 36. P. 2333–2345.
2. Mach P., Becvar Z. Mobile Edge Computing: A Survey on Architecture and Computation Offloading // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. N 19. P. 1628–1656.
3. Атея А. А., Мутханна А. С., Кучерявый А. Е. Архитектура сотовой системы 5G на базе МЕС // Материалы Междунар. науч. конф. 2017. С. 23–29.

4. *Borst S., Proutiere A., Hegde N.* Capacity of wireless data networks with intra-and inter-cell mobility // *INFOCOM*. 2006.
5. Networks and devices for the 5G era / *B. Bangert, S. Talwar, R. Arefi, K. Stewart* // *IEEE Communications Magazine*. 2014. N 52. P. 90–96.
6. *Ko S., Han K., Huang K.* Wireless Networks for Mobile Edge Computing: Spatial Modeling and Latency Analysis // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018. N 17. P. 5225–5240.
7. *Ksentini A., Taleb T., Chen M.* A Markov Decision Process-based Service Migration Procedure for Follow Me Cloud // 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2014. P. 1350–1354.
8. Mobility-Induced Service Migration in Mobile Micro-Clouds / *S. Wang, R. Uргаonkar, T. He et al.* // 2014 IEEE Military Communications Conference. 2014. P. 835–840.
9. Efficient Resource Allocation for On-Demand Mobile-Edge Cloud Computing / *X. Chen, W. Li, S. Lu et al.* // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018. N 67. P. 8769–8780.
10. Dynamic service migration in mobile edge-clouds / *S. Wang, R. Uргаonkar, T. He et al.* // 2015 IFIP Networking Conference (IFIP Networking). 2015. P. 1–9.

УДК 621.391.1

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-142-146

**В. А. Веселова\***

студент

**А. А. Овчинников\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## О КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИТЕРАТИВНЫХ ДЕКОДЕРОВ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ

Производится анализ корректирующей способности итеративных декодеров низкоплотностных кодов. Оценивается вектор ошибки, исправляемый итеративным декодером инвертирования бит, и производится сравнение с декодированием по максимуму правдоподобия. Приводятся результаты экспериментов по оценке вероятности ошибки декодирования низкоплотностных кодов.

**Ключевые слова:** низкоплотностный код, линейный код, декодирование низкоплотностных кодов, итеративные декодеры, декодирование по максимуму правдоподобия (МП), стандартная расстановка.

**V. A. Veselova\***

Student

**A. A. Ovchinnikov\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## ABOUT THE CORRECTIVE CAPACITY OF ITERATIVE DECODERS OF LOW-DENSITY PARITY-CHECK CODES

In this article, an analysis of the correcting capacity of iterative decoders of low-density parity-check codes. The error vector corrected by the iterative bit-inverting encoder is estimated and compared with likelihood decoding. The results of estimates on the estimation of the error probability for decoding low-density codes are presented.

**Keywords:** low-density parity-check code, linear code, decoding of low-density parity-check codes, iterative decoders, maximum likelihood (ML) decoding, standard spread.

### Введение

В современном мире широко используется передача информации в каналах связи. При передаче посторонние шумы могут оказывать на информацию воздействие, которое приводит к изменению сообщения на приемной стороне. В связи с этим используются методы помехоустойчивого кодирования, которые способны определить факт возникновения ошибок и исправить их.

В последние годы в стандартах стали часто использовать низкоплотностные коды (код с малой плотностью проверок на четность, или LDPC-код) [1], [2]. Для LDPC-кодов используют итеративные алгоритмы декодирования, декодеры принимают решения относительно отдельных символов принятого слова. Известные методы итеративного декодирования низкоплотностных кодов делятся на алгоритмы с жестким (инвертирования бит) и мягким (распространение доверия) решениями [2], [3].

При этом из теории кодирования известно, что наилучшим с точки зрения вероятности ошибки на слово критерием декодирования является декодирование по максимуму правдоподобия (МП) [3]. Оно является NP-полной задачей и имеет экспоненциальную сложность, поэтому зачастую для линейных кодов (например, кодов БЧХ или Рида-Соломона) используется декодирование «в сфере» радиуса  $t$  ( $d_0 = 2t + 1$ ).

В статье производится анализ итеративных декодеров. Так как они не являются декодерами по МП и декодерами «в сфере», сложно описать множество ошибок, которые они исправляют. В данной работе оценивается вектор ошибки, исправляемый итеративным декодером инвертирования бит (*Bit-Flipping Algorithm*) [2], и производится сравнение с декодированием по МП.

На рис. 1 представлен график зависимости вероятности ошибки на слово (FER) от отношения сигнал-шум (SNR) при декодировании низкоплотностного кода PEG (24, 10) [4] двумя алгоритмами: по МП и инвертирования бит.

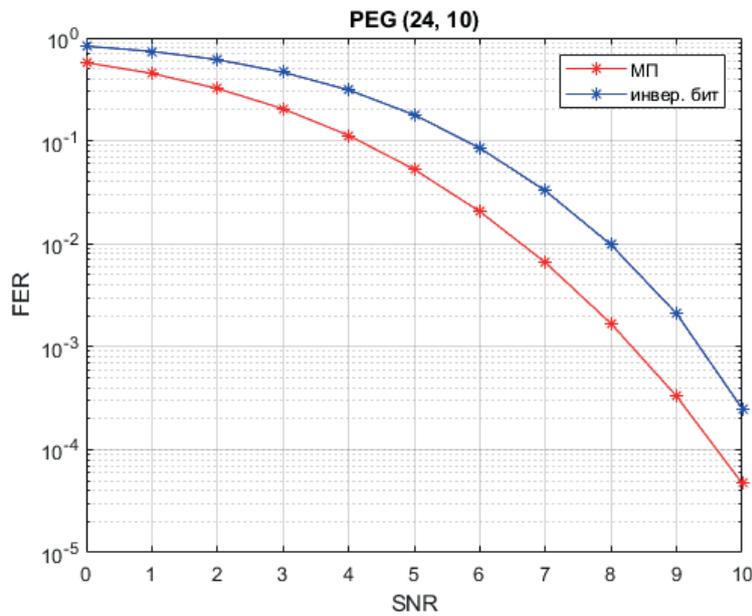


Рис. 1 Вероятность ошибки на слово при декодировании низкоплотного кода PEG (24, 10)

**Декодирование линейных кодов**

В теории кодирования широкое распространение получили линейные коды (код длины  $n$  с  $k$  информационными символами и  $r = n - k$  проверочными символами) [5], [6]. Данные коды имеют простые процедуры кодирования и декодирования по порождающей и проверочной матрицам соответственно. При передаче кодового слова  $a$  по каналу на него воздействуют шумы, которые приводят к возникновению ошибок  $e$  в передаваемом слове. Тогда принятый вектор можно представить как сумму передаваемого кодового слова и вектора ошибок.

$$b = a + e.$$

Задача декодирования линейных кодов состоит в поиске гипотетически передаваемого кодового слова  $\hat{a}$ , зная принятое слово  $b$ . Для это есть разные критерии принятия решения: максимум апостериорной вероятности (МАВ), максимум правдоподобия (МП), минимум расстояния (МР) [3].

Критерий МАВ минимизирует вероятность ошибки декодирования на слово за счет поиска наиболее вероятного кодового слова при известном принятом векторе. Декодирование по МАВ совпадает с декодированием МП при условии, что появление кодовых слов на входе канала равновероятное. Также декодирование по МР совпадает с декодированием по МП при условии, что метрика согласована с каналом связи.

Линейный код имеет минимальное расстояние  $d_0 = 2t + 1$ , где  $t$  – гарантированное количество исправляемых ошибок в линейном коде. Одним из вариантов декодирования по минимуму расстояния является декодирование «в сфере», где радиус сферы равен  $t$ .

Декодирование по МП и МР можно производить с помощью стандартной расстановки [3]. Стандартная расстановка имеет все возможные векторы длины  $n$ . Стандартная расстановка кода представляет собой таблицу, строки которой являются смежными классами, а векторы в первом столбце – их лидерами. Первая строка таблицы содержит все кодовые слова. Схематичное представление стандартной расстановки приведено на рис. 2.



Рис. 2 Схематичное представление стандартной расстановки

При декодировании по МР в лидеры выбираются самые легкие векторы в данной метрике, например в метрике Хэмминга. При декодировании по МП в лидеры выбираются самые вероятные векторы. Если рассматривать двоично-симметричный канал (ДСК), то самыми легкими и самыми вероятными будут являться одни и те же векторы. Таким образом, декодирование по МП совпадает с декодированием по МР в метрике Хэмминга. При декодировании «в сфере» все векторы веса меньше  $t$  являются подмножеством множества лидеров.

Ошибки декодирования по стандартной расстановке происходит в том случае, если вектор принадлежит множеству векторов смежных классов. Иными словами, вектор не принадлежит множеству лидеров смежных классов:

$$P_e = 1 - \sum_{i=0}^{2^r-1} P(g_i),$$

где  $g_i$  – лидер смежного класса.

#### Декодирование низкоплотных кодов

Низкоплотные коды, или код с малой плотностью проверок на четность (LDPC-код), были предложены Р. Галлагером в 1963 г. [1], [2]. Низкоплотный код характеризуется своей разреженной проверочной матрицей (строки и столбцы содержат мало ненулевых пози-

ций по сравнению с размерностью матрицы). По определению, если каждая строка матрицы содержит одинаковое число единиц и каждый столбец равен количеству единиц, то код называют регулярным (в противном случае – нерегулярным). Часто LDPC-коды задаются с помощью графа Таннера [7], представляющий из себя двудольный граф, вершины которого делятся на два множества:  $n$  символьных вершин, соответствующих столбцам, и  $r$  проверочных вершин, соответствующих строкам проверочной матрицы.

Метод декодирования низкоплотных кодов представляет собой итеративные посимвольные процедуры, то есть декодеры принимают решения относительно отдельных символов принятого слова. Известные методы итеративного декодирования низкоплотных кодов делятся на алгоритмы с жестким и мягким решениями [2], [3]. Декодеры с жестким решением применяются для дискретных каналов (например, двоично-симметричного), а декодеры с мягким решением – для полунепрерывных каналов (например, для канала с аддитивным белым гауссовским шумом). Одним из методов декодирования, предложенным Галлагером [2], является алгоритм инвертирования бит (*Bit-Flipping Algorithm*). Вкратце, алгоритм инвертирования бит сначала оценивает все уравнения проверки четности в проверочной матрице, а затем «переворачивает» те биты в полученном слове, которые превысили фиксированное число неудач-

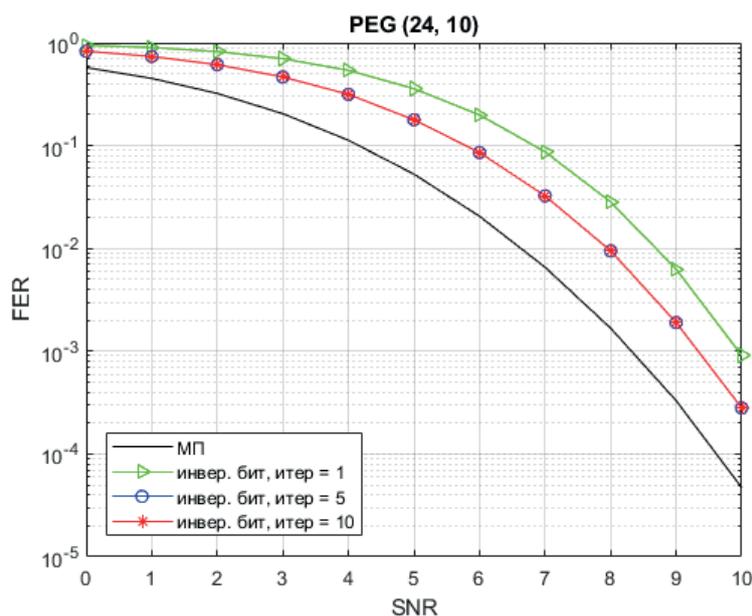


Рис. 3 График ошибки декодирования кода PEG (24, 10)

ных проверок четности. Затем этот шаг повторяется с измененным полученным словом до тех пор, пока не будут выполнены все проверки четности или пока не будет выполнено максимальное количество итераций алгоритма.

Итеративные декодеры имеют простую реализацию и обеспечивают малую вероятность ошибки, но результаты декодирования не совпадают с декодированием по МП или МР. Поэтому для поиска более эффективных (с точки зрения вероятности) алгоритмов декодирования низкоплотных кодов важно понимать связь исправляемых векторов итеративными декодерами и декодером по МП или по МР.

### Результаты экспериментов

Для проведения экспериментов рассматривалась конструкция PEG, с параметрами  $n = 24$ ,  $k = 10$ . Для данного кода строилась стандартная расстановка, и производилось декодирование всех возможных векторов длины  $n$  инвертирования бит с количеством итераций 1, 5, 10. Результаты ошибки декодирования можно видеть на графике, изображенном на рис. 3. На рис. 4 приведены карты исправляемых векторов ошибок для стандартной расстановки и итераций 1, 5, 10 инвертирования бит.

Можно видеть, что стандартная расстановка позволяет декодировать все векторы, являющиеся лидерами. Декодер инвертирования бит позволяет исправить меньшее количество векторов ошибок, но часть из них не является лидерами. При одной итерации алгоритма мало векторов декодируются верно, при увеличении числа итераций количество верно декодированных вектор увеличивается. Для наглядной оценки веса декодированных векторов алгоритмом инвертирования бит были построены весовые спектры с указанием веса всех декодированных векторов и весовой сектор лидеров из декодированных векторов, из которых видно, что преимущественное количество декодированных векторов является лидерами, а векторы, не являющиеся лидерами, не превышают веса лидеров (рис. 5).

### Заключение

В данной статье рассматривается множество векторов ошибок, исправляемых итеративным декодером инвертирования бит для низкоплотных кодов. Проведены эксперименты, которые показали, что итеративный декодер может декодировать часть векторов, некоторые из которых не являются лидерами и не могут быть декодированы стандартной расстановкой.

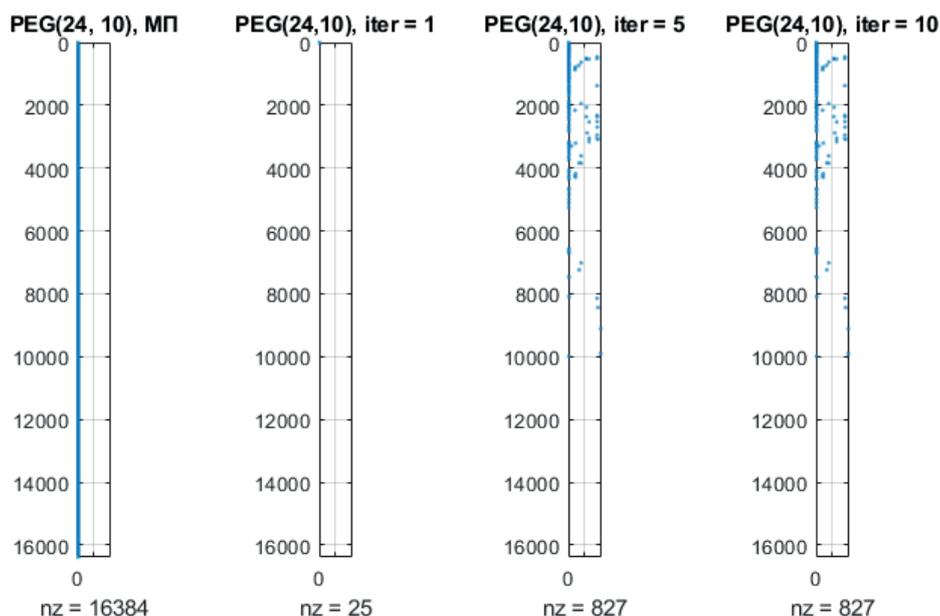


Рис. 4 Карты декодированных векторов кода PEG (24, 10) по МП и декодером инвертирования бит с разным количеством итераций

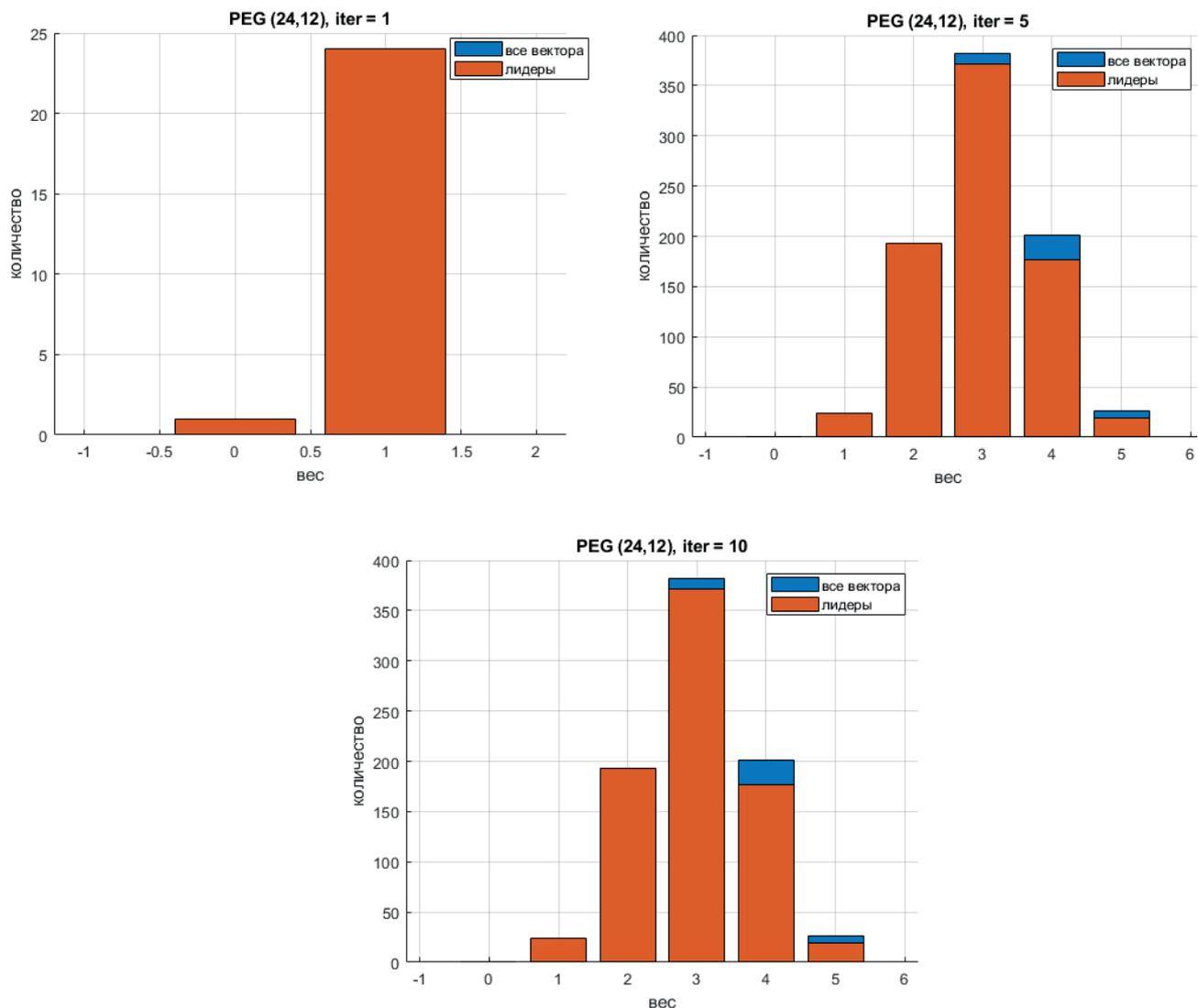


Рис. 5 Весовые спектры декодированных векторов кода PEG (24, 10) алгоритмом инвертирования бит с разным количеством итераций

### Библиографический список

1. Gallager R. Low-density parity check codes // IRE Trans. on Information Theory, 1963. 90 p.

2. Lin S., Ryan W. Channel Codes: Classical and Modern. Cambridge university press, 2009. 710 p.

3. Блаунштейн Н. Ш., Крук Е. А., Сергеев М. Б. Оптическая связь: оптоволоконная, атмосферная. СПб.: ГУАП, 2016. 286 с.

4. Hua X., Banhashemi A. Improved progressive-edge-growth (PEG) construction of irregular LDPC codes // IEEE Communications Letters. Vol. 8. N 12. P. 715–717.

5. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролируемые ошибки. М.: Мир, 1986. 576 с.

6. Мак-Вильямс Ф., Слоэн Н. Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Связь, 1979. 744 с.

7. Tanner M. A Recursive Approach to Low Complexity Codes // IEEE Transactions on Information Theory, IT(27):533–547.

УДК 621.391.1

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-147-155

**В. К. Витвинов\***

магистрант

**И. А. Пастушок\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## РАЗРАБОТКА СОГЛАСОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИЛОЖЕНИЙ И АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ РАДИОРЕСУРСОВ В СЕТЯХ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Отмечена ограниченность применения существующих программных и аппаратных решений. Показано, что современная концепция разработки программного обеспечения сетей пятого поколения предоставляет возможность развертывания приложений на базовых станциях и реализует технологии контейнеризации и оркестрации. Предложена структура открытого программного обеспечения и возможности ее развертывания при наличии необходимых ресурсов.

**Ключевые слова:** виртуализированные сетевые элементы, мультивендорная RAN, открытая сеть 5G.

**V. K. Vitvinov\***

Postgraduate Student

**I. A. Pastushok\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## DEVELOPMENT OF A CONSISTENT ARCHITECTURE OF APPLICATIONS AND ALGORITHMS FOR PLANNING RADIO RESOURCES IN FIFTH GENERATION NETWORKS FOR DIGITAL PRODUCTION

The limited use of existing software and hardware solutions is noted. It is shown that the modern concept of software development for fifth-generation networks provides the ability to deploy applications at base stations and implements containerization and orchestration technologies. The structure of open source software and the possibility of its deployment in the presence of necessary resources are proposed.

**Keywords:** virtualized network elements, multi-vendor RAN, open 5G network.

В настоящий момент существует проблема у операторов связи, заключающаяся в ограниченных возможностях использования телекоммуникационного оборудования и программного обеспечения. Также подобные решения имеют ряд существенных ограничений, одно из которых заключается в том, что оборудование может быть использовано только с определенным программным обеспечением, и эти составляющие должны быть произведены одной компанией-поставщиком. Это накладывает ограничения и большие расходы для операторов. Но в данный момент объединением из крупнейших телекоммуникационных и не только компаний разрабатывается технология под названием Open RAN, которая позволяет решить ряд существующих проблем. Это объединение называется O-RAN Alliance [1]. Члены и участники альянса O-RAN обязались развивать сети радиодоступа (RAN) по всему

миру. Будущие сети RAN будут построены на основе виртуализированных сетевых элементов, аппаратного обеспечения White-box и стандартизированных интерфейсов, которые полностью охватывают основные принципы открытости O-RAN. Экосистема инновационных новых продуктов уже формируется, она сформирует основу мультивендорной функционально совместимой автономной RAN, о которой многие мечтали и обсуждали ранее, но только сейчас это стало возможным благодаря глобальному анализу и структурированию отрасли, приверженности и лидерству членов и участников альянса O-RAN.

O-RAN SC сотрудничает с O-RAN Alliance и Linux Foundation для поддержки разработки программного обеспечения для решения открытой RAN, доступного каждому [1]–[3]. Сообщество будет согласовано с архитектурой и спецификациями, созданными в рабочих группах

O-RAN Alliance, для создания рабочего программного решения для открытой и интеллектуальной сети 5G RAN. Основными представителями данной области разработки и исследований являются мобильные операторы западной и евразийской частей мира (AT&T, China telecom и др.), крупные и известные компании по производству телекоммуникационного оборудования (Nokia, Bell и др.) [4]–[8].

Инициативы O-RAN Software сосредоточены на приведении эталонной реализации программного обеспечения в соответствие с открытой архитектурой и спецификациями O-RAN Alliance [1], [2]. Цель состоит в том, чтобы создать решение, которое можно использовать для унификации и ускорения развития и развертывания в RAN. Сообщество настроено на продвижение открытого исходного кода, а также на поддержку беспроводных технологий для основных патентов.

На данный момент предлагаемая технология находится еще в разработке, но уже есть результаты проделанных работ, которые могут продемонстрировать некоторые возможности. Для этого необходимо начать с рассмотрения построенной архитектуры для более детального обзора. Архитектура O-RAN SC соответствует стандартам O-RAN Alliance [1]. В O-RAN сторона радиосвязи включает Near-RT RIC, O-CU-CP,

O-CU-UP, O-DU и O-RU. Сторона управления включает в себя структуру управления службами и оркестрации, которая содержит функцию Non-RT-RIC.

Основные составляющие, их назначение и возможности:

- **near-RT RIC:** O-RAN near-real-time RAN Intelligent Controller – логическая функция, которая обеспечивает управление и оптимизацию элементов и ресурсов O-RAN в режиме почти реального времени с помощью детального сбора данных и действий через интерфейс E2;

- **non-RT RIC:** O-RAN non-real-time RAN Intelligent Controller – логическая функция, обеспечивающая управление и оптимизацию элементов и ресурсов RAN не в реальном времени, рабочий процесс AI/ML, включая обучение и обновления моделей, и на основе политик руководство по приложениям функциям в near-RT RIC;

- **NMS:** Network Management System – система управления сетью;

- **O-CU:** O-RAN Central Unit – логический узел, на котором размещены протоколы RRC, SDAP и PDCP;

- **O-CU-CP:** O-RAN Central Unit Control Panel – логический узел, на котором размещается RRC и часть управляющего уровня протокола PDCP;

- **O-CU-UP:** O-RAN Central Unit User Panel – пользовательский уровень: логический узел, на

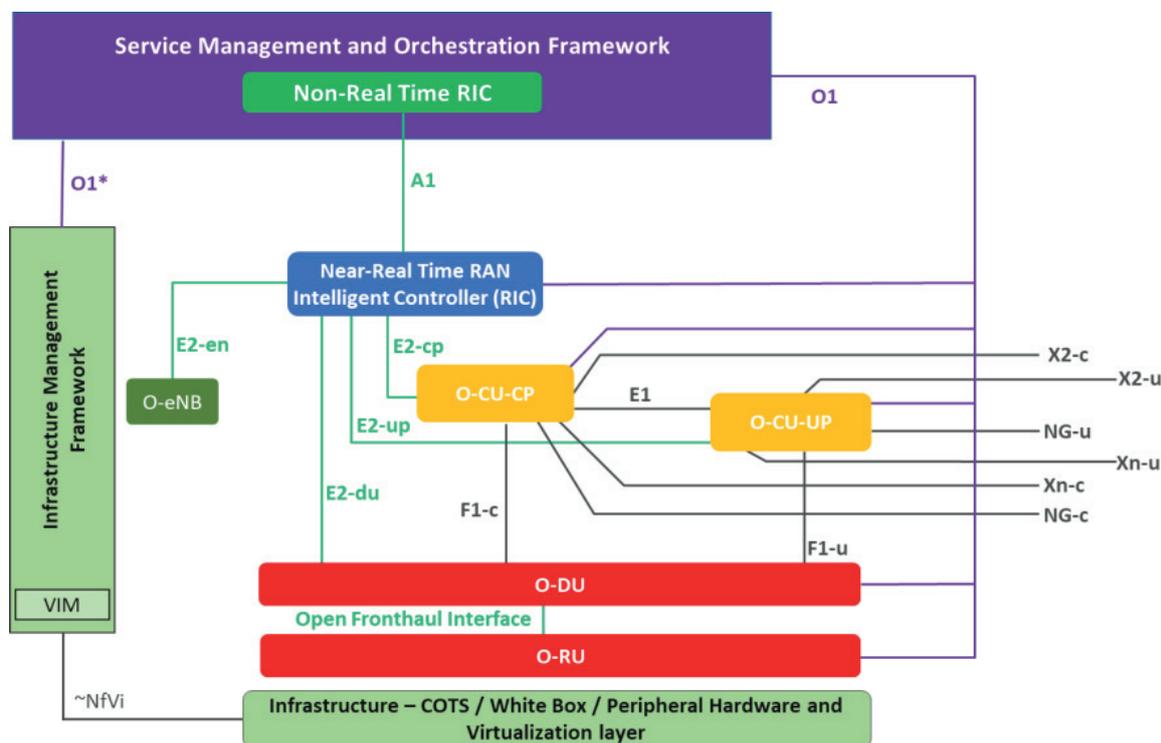


Рис. 1. Архитектура O-RAN SC

котором размещается часть пользовательского уровня протокола PDCP и протокола SDAP;

- **O-DU**: O-RAN Distributed Unit – логический узел, содержащий уровни RLC/MAC/High-PHY на основе функционального разделения нижнего уровня;

- **O-RU**: O-RAN Radio Unit – логический узел, на котором размещается уровень Low-PHY и обработка RF на основе функционального разделения нижнего уровня. Это похоже на «TRP» или «RRH» у 3GPP, но более конкретно включает в себя уровень Low-PHY (FFT/iFFT, извлечение PRACH);

- **O1**: интерфейс между объектами управления в Service Management and Orchestration Framework и управляемыми элементами O-RAN для работы и управления, с помощью которого должно осуществляться управление FCAPS, программным обеспечением, файлами;

- **O1 \***: интерфейс между Service Management and Orchestration Framework и Infrastructure Management Framework, поддерживающий функции виртуальной сети O-RAN;

- **xAPP**: независимый программный плагин к платформе Near-RT RIC для обеспечения функционального расширения сети RAN третьими сторонами.

В существующем проекте следует отметить платформы, их особенности и взаимосвязи. Основной платформой является Near-Realtime RIC, на ее основе разворачиваются приложения RICAPP. Таким образом, пользователь может влиять на работу развернутых приложений с помощью политик, создавая их экземпляры, которые являются взаимно однозначным отображением ключ-значения. В роли SMO выступает платформа Non-Realtime RIC.

### Особенности интеллектуального контроллера RAN Near-Realtime RIC

1. A1 Mediator прослушивает запросы типа политики и экземпляра политики, отправляемые через HTTP, и публикует их для запущенных xApps через сообщения RMR.

2. DBAAS является необходимым элементом для развертывания базы данных как службы (DbaaS) в kubernetes. Сервис DbaaS реализован в едином контейнере с базой данных Redis, которая настроена как непостоянная (non-persistent) и избыточная (non-redundant).

3. Golang представляет собой реализацию библиотеки структурированного ведения журнала с поддержкой сопоставленного контекста диагностики (MDC).

4. Jaegeradapter содержит файлы конфигурации jaeger. Первая версия поддерживает конфигурацию только для развертывания jaeger-all-in-one.

5. LOG представляет собой поточно-ориентированную библиотеку C API для ведения журналов с поддержкой сопоставленного контекста диагностики (MDC).

6. PYLOG реализует библиотеку структурированного ведения журнала с сопоставленным диагностическим контекстом (MDC).

7. Уровень общих данных, который обеспечивает легкий и высокоскоростной интерфейс для доступа к общему хранилищу данных.

8. Streaming Protobufs предоставляет схему Protobuf для выбранного набора сообщений протокола приложений X2.

9. Библиотека Tracelibcpp реализует функцию для создания настроенного экземпляра трассировщика.

10. Менеджер VESPA, который использует агент VES для адаптации сбора внутренней статистики near-RT RIC, с помощью Prometheus (xApps и контейнеры платформы) к ONAP VES (потоковая передача событий VNF).

11. xapp-frame – простая структура для быстрой разработки xapps RIC. Поддерживает различные службы, необходимые для xapps RIC, такие как RESTful API, RMR (маршрутизация сообщений RIC), серверные службы базы данных, а также отслеживание и заполнение изменений config-map в среде K8S.

### Особенности интеллектуального контроллера RAN (RICAPP)

1. AC xAPP поддерживает полное управление с обратной связью, а также работу в режиме отчета для управления доступом для запросов добавления SgNB, создание отчетов о метриках через VES и настройку политик одного экземпляра через интерфейс A1.

2. GS-lite – инструмент обработки потоков с открытым исходным кодом, работающий в реальном времени, с малой задержкой и высокой пропускной способностью.

3. Репозиторий HelloWorld (HW) xAPP содержит открытый исходный код для прототипа xAPP для near real-time RAN Intelligent Controller.

4. KPI Mon xAPP поддерживает полное управление с обратной связью для CuCpResourceStatusReport с нескольких gNB и хранит метрики в Redis DB.

5. QoE Predictor (QP) – приложение Xapp в сценарии использования O-RAN для управления трафиком.

6. Адаптер Asimos xAPP содержит код, необходимый для использования существующего микросервиса Asimos в качестве O-RAN xAPP, предоставляя «соединение», которое прослушивает, передает протокол RMR, преобразует их в вызовы микросервиса Asimos, который совместно развертывается в тот же контейнер, что и адаптер.

7. MC xAPP поддерживает вычисление ряда метрик и KPI на основе сообщений X2, полученных от UEES.

### Особенности интеллектуального контроллера RAN Non-Realtime RIC (NONRTRIC)

1. Non-RT RIC содержит Policy Agent, Control Panel и A1 Simulator.

#### Функции эксплуатации и обслуживания (ОАМ)

1. ОАМ обеспечивает эталонную реализацию в соответствии с документами O-RAN OAM (WG1).

2. O-RAN SC RIC Dashboard предоставляет административные и операторские функции для контроллера сети радиодоступа (RAN). Веб-приложение построено как одностраничное приложение с использованием внешнего интерфейса Angular (версия 8) и внутреннего интерфейса Java (версия 11) Spring-Boot (версия 2.1).

### Практическая частичная реализация архитектуры O-RAN

Было принято решение практически реализовать основной блок технологии, а именно развернуть на виртуальных машинах блоки Оркестратора управления услугами (SMO), блок Near Realtime RIC, а также развернуть и запустить Hello World xApp на машине Near Realtime RAN Intelligent Controller (RIC).

Для развертывания кластера SMO и RIC были созданы две виртуальные машины с следующими характеристиками:

- ОС – Ubuntu 18.04 LTS (Bionic Beaver);
- CPU – 8;
- ОЗУ – 32 Гб;
- ПЗУ – 160 Гб.

Установка кластера SMO была проделана в несколько шагов, а именно:

1. Получение сценариев развертывания

```
sudo-i
git clone http://gerrit.o-ran-sc.org/r/it/dep-b bronze
cd dep
git submodule update--init--recursive -- remote
```

2. Генерация скрипта облачной инициализации

На этом шаге сгенерирован скрипт, который настраивает одноузловой кластер Kubernetes для установки компонентов SMO. Результирующий сценарий может запускаться как сценарий cloud-init при запуске виртуальной машины или запускаться в корневой оболочке после запуска виртуальной машины:

```
$ cd tools/k8s/etc
```

В файл Infra.rc указываются версии docker, kubernetes и helm. Комментируются строки под заголовком «RIC tested» и раскомментируются строки после заголовка «ONAP Frankfurt».

```
$ cd ../bin
```

```
$ ./gen-cloud-init.sh
```

Генерируется скрипт установки стека для того, что нужно RIC. Полученный сценарий будет использоваться для подготовки кластера K8 для развертывания RIC в файл «k8s-1node-cloud-init-k\_1\_15-h\_2\_16-d\_18\_09.sh»

3. Установка Kubernetes, Helm, Docker и другого

```
./k8s-1node-cloud-init-k_1_15-h_2_16-d_18_09.sh
```

Данная команда требует много времени для установки. В зависимости от мощности исполь-

```

# modify below for RIC infrastructure (docker-k8s-helm) component versions
# RIC tested
#INFRA_DOCKER_VERSION=""
#INFRA_HELM_VERSION="2.12.3"
#INFRA_K8S_VERSION="1.16.0"
#INFRA_CNI_VERSION="0.7.5"
# older RIC tested
#INFRA_DOCKER_VERSION=""
#INFRA_HELM_VERSION="2.12.3"
#INFRA_K8S_VERSION="1.13.3"
#INFRA_CNI_VERSION="0.6.0"
# ONAP Frankfurt
INFRA_DOCKER_VERSION=""
INFRA_K8S_VERSION="1.15.9"
INFRA_CNI_VERSION="0.7.5"
INFRA_HELM_VERSION="2.16.6"

```

Рис. 2. Файл Infra.rc.

зубею оборудования это может занять от 1 до нескольких часов.

```
$ sudo-i
```

```
$ kubectl get pods--all-namespaces
```

В пространстве имен kube-system должно быть запущено 9 подов.

#### 4. Развертывание SMO

O-RAN Bronze SMO состоит из компонентов трех отдельных групп: ONAP, Non RT RIC и RIC-AUX. Он развертывается путем запуска сценария в sm0/bin.

```
$ cd sm0/bin
```

```
$ ./install
```

При первой установке SMO на виртуальную машину, нужно запустить «./install initlocalrepo». Дополнительный аргумент также инициализирует локальный репозиторий Helm. После

успешного развертывания команда «kubectl get pods --all-namespaces» должна показать 8 модулей в пространстве имен nonrttric, 27 модулей в пространстве имен onap и 2 модуля в пространстве имен ricaux, все в состоянии Running или Completed.

Установка кластера RIC была проделана в несколько шагов, а именно:

#### 1. Получение сценариев развертывания

```
$ sudo-i
```

```
$ git clone http://gerrit.o-ran-sc.org/r/it/dep-b bronze
```

```
$ cd dep
```

```
$ git submodule update--init--recursive--remote
```

#### 2. Генерация скрипта облачной инициализации

```
$ cd tools/k8s/bin
```

```
$ ./gen-cloud-init.sh
```

```
root@ric:~# kubectl get pods --all-namespaces
NAMESPACE      NAME                                                    READY   STATUS    RESTARTS   AGE
kube-system     coredns-5644d7b6d9-qjd7r                               1/1     Running   4           33d
kube-system     coredns-5644d7b6d9-zsx7l                               1/1     Running   4           33d
kube-system     etcd-ric                                                1/1     Running   4           33d
kube-system     kube-apiserver-ric                                       1/1     Running   4           33d
kube-system     kube-controller-manager-ric                             1/1     Running   6           33d
kube-system     kube-flannel-ds-rvbtz                                    1/1     Running   4           33d
kube-system     kube-proxy-trtbq                                         1/1     Running   4           33d
kube-system     kube-scheduler-ric                                      1/1     Running   7           33d
kube-system     tiller-deploy-68bf6dff8f-jhlzx                          1/1     Running   4           33d
ricinfra        deployment-tiller-ricxapp-d4f98ff65-69bhb                1/1     Running   3           31d
ricinfra        tiller-secret-generator-478fw                           0/1     Completed 0           31d
ricplt          deployment-ricplt-a1mediator-66fcf76c66-rsf2f            1/1     Running   6           31d
ricplt          deployment-ricplt-alarmadapter-64d559f769-5r5hv          1/1     Running   3           31d
ricplt          deployment-ricplt-appmgr-6fd6664755-8xf17               1/1     Running   3           31d
ricplt          deployment-ricplt-e2mgr-8479fb5ff8-pvcd6                1/1     Running   3           31d
ricplt          deployment-ricplt-e2term-alpha-bcb457df4-cw7nw          1/1     Running   3           31d
ricplt          deployment-ricplt-jaegeradapter-84558d855b-45ltg        1/1     Running   4           31d
ricplt          deployment-ricplt-o1mediator-d8b9fcdf-kjm9d              1/1     Running   3           31d
ricplt          deployment-ricplt-rtmgr-9d4847788-bktnx                 1/1     Running   5           31d
ricplt          deployment-ricplt-submgr-65dc9f4995-9lsbd                1/1     Running   3           31d
ricplt          deployment-ricplt-vespamgr-7458d9b5d-2xmhk              1/1     Running   4           31d
ricplt          deployment-ricplt-xapp-onboarder-546b86b5c4-tx4sh       2/2     Running   6           31d
ricplt          r4-infrastructure-kong-6c7f6db759-pn9v7                 2/2     Running   11          31d
ricplt          r4-infrastructure-prometheus-alertmanager-75dff54776-4s7xz 2/2     Running   6           31d
ricplt          r4-infrastructure-prometheus-server-5fd7695-zpdtg       1/1     Running   4           31d
ricplt          statefulset-ricplt-dbaas-server-0                       1/1     Running   3           31d
ricxapp         ricxapp-my-hwxapp-576445f849-q2v8z                      1/1     Running   0           13d
root@ric:~#
```

Рис. 3. Запущенные поды

```
NAME                                                    READY   STATUS    RESTARTS   AGE
deployment-ricplt-a1mediator-66fcf76c66-rsf2f            1/1     Running   6           31d
deployment-ricplt-alarmadapter-64d559f769-5r5hv          1/1     Running   3           31d
deployment-ricplt-appmgr-6fd6664755-8xf17               1/1     Running   3           31d
deployment-ricplt-e2mgr-8479fb5ff8-pvcd6                1/1     Running   3           31d
deployment-ricplt-e2term-alpha-bcb457df4-cw7nw          1/1     Running   3           31d
deployment-ricplt-jaegeradapter-84558d855b-45ltg        1/1     Running   4           31d
deployment-ricplt-o1mediator-d8b9fcdf-kjm9d              1/1     Running   3           31d
deployment-ricplt-rtmgr-9d4847788-bktnx                 1/1     Running   5           31d
deployment-ricplt-submgr-65dc9f4995-9lsbd                1/1     Running   3           31d
deployment-ricplt-vespamgr-7458d9b5d-2xmhk              1/1     Running   4           31d
deployment-ricplt-xapp-onboarder-546b86b5c4-tx4sh       2/2     Running   6           31d
r4-infrastructure-kong-6c7f6db759-pn9v7                 2/2     Running   11          31d
r4-infrastructure-prometheus-alertmanager-75dff54776-4s7xz 2/2     Running   6           31d
r4-infrastructure-prometheus-server-5fd7695-zpdtg       1/1     Running   4           31d
statefulset-ricplt-dbaas-server-0                       1/1     Running   3           31d
```

Рис. 4. Запущенные модули

Генерируется скрипт установки стека для того, что нужно RIC. Полученный сценарий будет использоваться для подготовки кластера K8 для развертывания RIC (k8s-1node-cloud-init-k\_1\_16-h\_2\_12-d\_cur.sh)

3. Установка Kubernetes, Helm, Docker и другого

```
$. /k8s-1node-cloud-init-k_1_16-h_2_12-d_cur.sh
$ sudo-i
$ kubectl get pods--all-namespaces
```

В пространстве имен kube-system должно быть запущено 9 подов.

4. Развертывание RIC

```
$ cd dep/bin
$. /deploy-ric-platform-f./RECIPE_EXAMPLE/PLATFORM/example_recipe.yaml
$ kubectl get pods -n ricplt
```

В пространстве имен ricplt должно быть около 16 модулей.

5. Установка тестового приложения на примере HelloWorld xApp

```
$ cd dep
```

Необходимо создать файл, который будет содержать URL-адрес, используемый для запуска процесса установки.

```
$ echo { "config-file.json_url": "https://gitlab.iotfox.ru/o-ran/my-hello-world/-/raw/dev-my-app/init/config-file.json?inline=false" } > onboard.hw.url
```

Запуск процесса установки

```
$ curl-location-request POST "http://$(hostname):32080/onboard/api/v1/onboard/download" --header 'Content-Type: application/json'--data-binary "@./onboard.hw.url"
```

Проверка списка установленных приложений  
curl-location-request GET «http://\$(hostname):32080/onboard/api/v1/charts»

6. Развертывание тестового приложения на примере HelloWorld xApp

```
$ kubectl get pods-n ricxapp
```

Вызов xApp Manager, для развертывания HelloWorld xApp.

```
GNU nano 2.9.3 onboard.hw.url
{"config-file.json_url": "https://gitlab.iotfox.ru/o-ran/my-hello-world/-/raw/dev-my-app/init/config-file.json?inline=false" }
```

Рис. 5. Созданный файл onboard.hw.url

```
{
  "my-hwxapp": [
    {
      "name": "my-hwxapp",
      "version": "1.0.0",
      "description": "Standard xApp Helm Chart",
      "apiVersion": "v1",
      "appVersion": "1.0",
      "urls": [
        "charts/my-hwxapp-1.0.0.tgz"
      ],
      "created": "2020-12-07T11:58:16.104368025Z",
      "digest": "6acbc6725be7441a623b31307c80a94205ba21ba96fbfb994ecff94b4778b059"
    }
  ]
}
```

Рис. 6. Результат проверки установки приложения

```
root@ric:~# kubectl get pods -n ricxapp
NAME                                READY   STATUS    RESTARTS   AGE
ricxapp-my-hwxapp-576445f849-q2v8z  1/1     Running   0           13d
```

Рис. 7. Проверка запущенного HelloWorld xApp

```
1688490340 7/RMR [INFO] sends: ts=1688490340 src=service-ricxapp-my-hwxapp-rmr.ricxapp:4560 target=service-ricplt-e2term-rmr-alpha.ricplt:3800 open=0 succ=0 fail=0 (hard=0 soft=0)
1688490340 7/RMR [INFO] sends: ts=1688490340 src=service-ricxapp-my-hwxapp-rmr.ricxapp:4560 target=service-ricplt-e2mgr-rmr.ricplt:3801 open=0 succ=0 fail=0 (hard=0 soft=0)
1688490641 7/RMR [INFO] sends: ts=1688490641 src=service-ricxapp-my-hwxapp-rmr.ricxapp:4560 target=service-ricplt-a1mediator-rmr.ricplt:4562 open=1 succ=1 fail=0 (hard=0 soft=0)
1688490641 7/RMR [INFO] sends: ts=1688490641 src=service-ricxapp-my-hwxapp-rmr.ricxapp:4560 target=service-ricplt-submgr-rmr.ricplt:4560 open=0 succ=0 fail=0 (hard=0 soft=0)
1688490641 7/RMR [INFO] sends: ts=1688490641 src=service-ricxapp-my-hwxapp-rmr.ricxapp:4560 target=service-ricplt-e2term-rmr-alpha.ricplt:3800 open=0 succ=0 fail=0 (hard=0 soft=0)
1688490641 7/RMR [INFO] sends: ts=1688490641 src=service-ricxapp-my-hwxapp-rmr.ricxapp:4560 target=service-ricplt-e2mgr-rmr.ricplt:3801 open=0 succ=0 fail=0 (hard=0 soft=0)
1688490942 7/RMR [INFO] sends: ts=1688490942 src=service-ricxapp-my-hwxapp-rmr.ricxapp:4560 target=service-ricplt-a1mediator-rmr.ricplt:4562 open=1 succ=1 fail=0 (hard=0 soft=0)
1688490942 7/RMR [INFO] sends: ts=1688490942 src=service-ricxapp-my-hwxapp-rmr.ricxapp:4560 target=service-ricplt-submgr-rmr.ricplt:4560 open=0 succ=0 fail=0 (hard=0 soft=0)
1688490942 7/RMR [INFO] sends: ts=1688490942 src=service-ricxapp-my-hwxapp-rmr.ricxapp:4560 target=service-ricplt-e2term-rmr-alpha.ricplt:3800 open=0 succ=0 fail=0 (hard=0 soft=0)
```

Рис. 8. Просмотр логов

```
$ curl -location --request POST "http://$(hostname):32080/appmgr/ric/v1/xapps" --header 'Content-Type: application/json' --data-raw '{"xappName": "hwxapp"}'
$ kubectl get pods -n ricxapp
Просмотр логов
$ kubectl logs -n ricxapp <имя POD, полученное из инструкции выше>
```

### Запуск приложений RICApps

В данном частном примере (hostname) был ip адресом kong проху 10.228.0.58.

#### 1. Подготовка приложений к запуску

Каждое приложение xApp должно представлять «дескриптор». Дескриптор используется встроенным приложением xApp Near RT RIC для создания диаграммы Helm и других артефактов, связанных с развертыванием для хapp. На этом этапе происходит подготовка к вызовам API в xApp On-Boarder, предоставляя три расположения дескрипторов xApp.

```
$ sudo -i
Рабочий каталог будет находиться в том месте, где развернут ric.
$ cd dep
$ echo '{«config-file.json_url»: «https://gerrit.oran-sc.org/r/gitweb?p=ric-app/qp.git;a=blob_plain;f=xapp-descriptor/config.json;hb=HEAD» }' > onboard.qp.url
```

```
$ echo '{«config-file.json_url»: «https://gerrit.oran-sc.org/r/gitweb?p=ric-app/qp-driver.git;a=blob_plain;f=xapp-descriptor/config.json;hb=HEAD» }' > onboard.qpd.url
```

```
$ echo '{«config-file.json_url»: «https://gerrit.oran-sc.org/r/gitweb?p=ric-app/ts.git;a=blob_plain;f=xapp-descriptor/config.json;hb=HEAD» }' > onboard.ts.url
```

#### 2. Добавление приложений

Теперь мы вызываем вызовы API в xApp On-Boarder, сообщая ему расположение дескрипторов xApp.

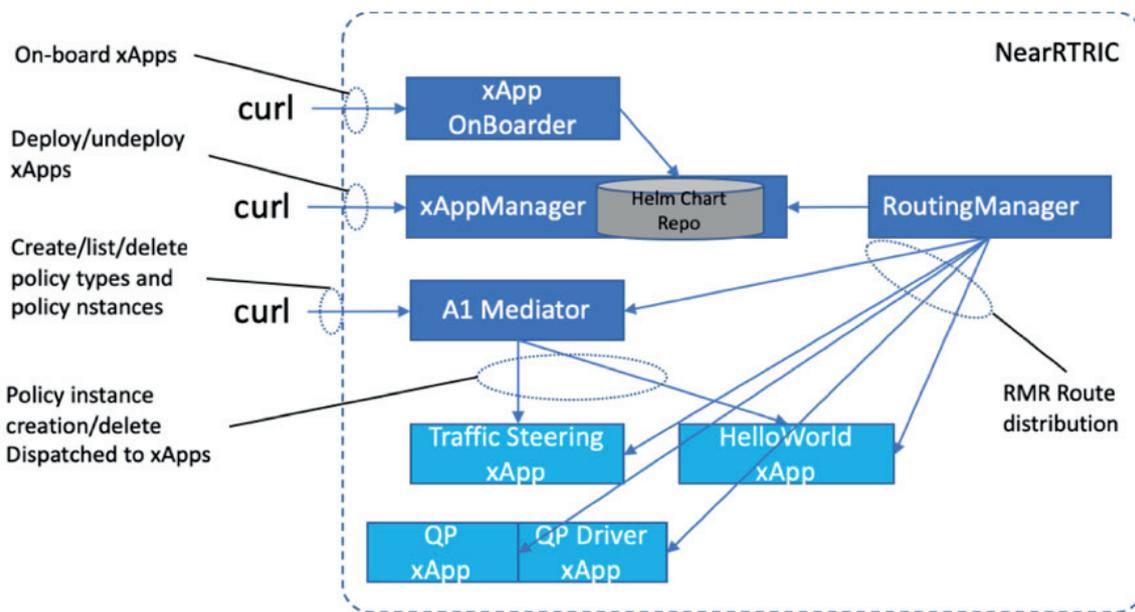
```
$ curl -location --request POST "http://$(hostname): 32080/onboard/api/v1/onboard/download" --header 'Content-Type: application/json' --data-binary "@./onboard.ts.url"
```

```
$ curl -location --request POST "http://$(hostname):32080/onboard/api/v1/onboard/download" --header 'Content-Type: application/json' --data-binary "@./onboard.qp.url"
```

```
$ curl -location --request POST "http://$(hostname):32080/onboard/api/v1/onboard/download" --header 'Content-Type: application/json' --data-binary "@./onboard.qpd.url"
```

Далее следует проверка, добавились ли приложения

```
$ curl -location --request GET http://$(hostname):32080/onboard/api/v1/charts
```



### xApp Flows

Рис. 9. Сценарии использования приложений NearRT RIC

### 3. Развертывание приложений

На этом этапе разворачивается xApps, вызывая API xApp Manager. Следует отметить, что имена разворачиваемых приложений xApp должны совпадать с именами локальных пользователей. После получения вызова API развертывания xApp Manager выполнит вызов API в Helm / Kubernetes для развертывания диаграммы Helm xApp.

```
$ curl-location--request POST "http://$(hostname):32080/appmgr/ric/v1/xapps"--header 'Content-Type: application/json'--data-raw '{"xappName": "qp"}
```

```
$ curl-location--request POST "http://$(hostname):32080/appmgr/ric/v1/xapps"--header 'Content-Type: application/json'--data-raw '{"xappName": "qpdriver"}
```

```
$ curl-location--request POST "http://$(hostname):32080/appmgr/ric/v1/xapps"--header 'Content-Type: application/json'--data-raw '{"xappName": "trafficxapp"}
```

Далее происходит проверка, работают ли приложения

```
$ kubectl get pods-n ricxapp
```

### 4. Заполнение базы данных тестовыми данными RAN

Этот шаг необходим для первого этапа сценария использования Traffic Steering. На первом этапе данные RAN являются искусственными, и точки данных необходимо ввести в базу данных RNIB. После того как эти искусственные точки данных введены, можно увидеть, как приложение xApp управления трафиком начинает обрабатывать эти данные, используя порог по умолчанию, равный 0.

```
$ git clone http://gerrit.o-ran-sc.org/r/ric-app/ts-b-bronze
```

```
$ cd ts/test/populatedb
```

```
$ ./populate_db.sh
```

### 5. Создание типа политики

Здесь определяется новый тип политики и вызывается A1 mediator для создания такого типа политики.

```
$ cd ~/dep/
```

```
$ POLICY_TYPE_ID="20008"
```

```
$ echo { "name": "tsapolicy", "description": "tsa parameters", "policy_type_id": 20008, "create_schema": { "$schema": "http://json-schema.org/draft-07/schema#", "title": "TS Policy", "description": "TS policy type", "type": "object", "properties": { "threshold": { "type": "integer", "default": 0 } }, "additionalProperties": false } } > ts-policy-type-20008.json
```

```
$ curl-v -X PUT "http://$(hostname):32080/a1mediator/a1-p/policytypes/${POLICY_TYPE_ID}"-H "accept: application/json"-H "Content-Type:
```

```
application/json"-d @./ts-policy-type-${POLICY_TYPE_ID}.json
```

### 6. Список типов политики

Теперь можно увидеть вновь созданный тип политики при запросе A1 mediator.

```
$ curl-X GET--header "Content-Type: application/json"--header "accept: application/json" http://$(hostname):32080/a1mediator/a1-p/policytypes
```

### 7. Создание экземпляра политики

Тип политики – это просто объявление. Теперь создается м экземпляр политики, заполняя свойства фактическими значениями. Это выполняется с помощью A1 mediator. A1 mediator отправит новый экземпляр политики в приложение xApp управления трафиком. Затем можно увидеть, что TS xApp получает этот экземпляр политики и его поведение «фильтрация данных RAN по пороговому значению» меняется на использование нового порогового значения.

```
$ POLICY_ID="tsapolicy145"
```

```
$ curl-X PUT--header "Content-Type: application/json"--data '{"threshold": 5}' http://$(hostname):32080/a1mediator/a1-p/policytypes/${POLICY_TYPE_ID}/policies/${POLICY_ID}
```

## Заключение

В настоящей статье была рассмотрена процедура развертывания платформы Open RAN в рамках развертывания двух компонентов платформы, а именно near real time RIC, а также non real time RIC. Важным результатом настоящей работы является процедура развертывания и отображения опыта, приобретенного в рамках него. Результаты настоящей работы могут быть представлены в рамках развития концепции Open RAN в России.

*Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента Российской Федерации МК-1326.2021.1.6 «Исследование алгоритмов доступа к ресурсам радиоканала для систем индустриального интернета вещей»*

## Библиографический список

1. O-RAN alliance URL: <https://www.o-ran.org/> (дата обращения: 01.12.2020).
2. O-RAN Software Community // URL: <https://wiki.o-ran-sc.org/> (дата обращения: 01.12.2020).
3. Linux Foundation URL: <https://www.linuxfoundation.org/> (дата обращения: 01.12.2020).

4. AT&T URL: <https://www.att.com/> (дата обращения: 01.12.2020).
5. China Telecom URL: <http://www.chinatelecom.com.cn/> (дата обращения: 01.12.2020).
6. Nokia URL: <https://www.nokia.com/networks/technologies/open-ran/> (дата обращения: 01.12.2020).
7. Bell URL: <https://www.bell.ca/> (дата обращения: 01.12.2020).
8. Участники Альянса URL <https://www.o-ran.org/membership/> (дата обращения: 01.12.2020).
9. *Chih-Lin I., Sachin K.* O-RAN: Towards an Open and Smart RAN // O-RAN Alliance white paper, URL: <https://static1.squarespace.com/static/5ad774cce74940d7115044b0/t/5bc79b371905f4197055e8c6/1539808057078/O-RAN+WP+Final+181017.pdf> (дата обращения: 01.12.2020).
10. *Li C., Akman A.* O-RAN Use Cases and Deployment Scenarios // O-RAN Alliance white paper, URL: <https://static1.squarespace.com/static/5ad774cce74940d7115044b0/t/5e95a0a306c6ab2d1cbca4d3/1586864301196/O-RAN+Use+Cases+and+Deployment+Scenarios+Whitepaper+February+2020.pdf> (дата обращения: 01.12.2020).

УДК 681.325

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-156-162

**С. Ю. Гуков\***

аспирант

**А. М. Тюрликов\***

доктор технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ КАРТЫ ГЛУБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАДЕРЖКИ СВЕТОВОГО СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ ПРИ МУЛЬТИКАМЕРНОЙ СЪЕМКЕ

Рассматриваются методы построения карт глубины, используя временную задержку инфракрасного света технологии «Time of Flight» в 3D-сенсорах. Предлагается вариант решения проблемы, возникающей при мультикамерной съемке.

**Ключевые слова:** карта глубины, световой сигнал, 3D-сенсор, ToF, LiDAR.

**S. Y. Gukov\***

Postgraduate Student

**A. M. Turlikov\***

Dr. Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## THE PROBLEM OF FORMING A DEPTH MAP USING THE LIGHT SIGNAL DELAY IN CONDITIONS OF MUTUAL INTERFERENCE IN MULTI-CAMERA SHOOTING

Methods for constructing depth maps using the time delay of infrared light of the «Time of Flight» technology in 3D-sensors are considered. We offer a solution to the problem that occurs when multi-camera shooting.

**Keywords:** depth map, light signal, 3D-sensor, ToF, LiDAR.

Трехмерная графика становится все более востребованной услугой в различных сферах науки и творчества. Но помимо создания виртуальных 3D-объектов и сцен, необходимо иметь объемное представление реально существующих предметов, реальных окружающих сцен.

Одним из основных принципов всех современных 3D-технологий является метод пространственного разделения – разнесение изображений отдельно для каждого глаза. Для создания иллюзии трехмерности каждую сцену необходимо снимать одновременно двумя камерами с разных ракурсов, что не всегда является удобным и возможным.

Главное, что требуется для создания 3D-изображения, – это информация о глубине сцены. Для хранения такой информации обычно создается карта глубины.

Карта глубины (*depth map*) – это изображение, на котором для каждого пикселя вместо цвета хранится его расстояние до камеры (рис. 1). Идея, лежащая в основе построения карты гл-

бины по стереопаре, очень проста. Для каждой точки на одном изображении выполняется поиск парной ей точки на другом изображении. А по паре соответствующих точек можно выполнить триангуляцию и определить координаты их прообраза в трехмерном пространстве. Зная трехмерные координаты прообраза, глубина вычисляется как расстояние до плоскости камеры.

Расстояние между глазами человека в среднем составляет 6,5 см. Мы прекрасно определяем объем и глубину, если посмотреть на объект на небольшом расстоянии (до полуметра), так как при попеременном закрывании правого и левого глаза картинка меняется. Но если посмотреть на этот же объект с расстояния в несколько метров, разницы практически не будет, то есть картинка становится практически плоской. Именно поэтому, например, при съемке фильма «Хоббит» операторы разносили камеры на несколько метров, когда снимали актеров на дистанции до 10 м до объектива, – просто, чтобы получить больший угол и объем изображения.



Рис. 1. Типичная стереопара и ее карта глубины

Несколько лет назад крупные компании выпускали 3D-телевизоры и всячески их рекламировали. Однако по ряду факторов особого взрыва популярности так и не произошло, и на данный момент выпуск 3D-телевизоров остановился.

Разумеется, на волне всеобщего интереса к 3D эту тему не могли обойти стороной и производители смартфонов. Некоторые из них несколько лет назад попытались использовать эту технологию и в камерах своих смартфонов, позволяя снимать 3D-контент прямо на мобильный телефон. Одними из нескольких смартфонов были LG Optimus 3D и HTC Evo 3D (рис. 2), которые, как и остальные подобные модели, не вызвали популярности.

Для получения стереоизображений использовалась пара объективов на задней панели, с расстоянием между камерами в два раза меньше, чем расстояние между глазами человека. Однако такой подход тоже далек от совершенства. Самый очевидный недостаток – снижение

разрешения картинки на экране вдвое в режиме стерео, поскольку дисплей должен демонстрировать два изображения сразу. Второй по значимости – небольшая область комфортного просмотра: отклонение взгляда чуть в сторону приводит к исчезновению эффекта 3D. Третий – стереоэффект доступен только в альбомном режиме работы смартфона. Не стоит забывать и о субъективных недостатках – впечатления от 3D-экрана с параллаксной решеткой сильно зависят от восприятия конкретного человека.

Казалось бы, с тех пор про идею съемки 3D-сцен прямо со смартфона забыли. Однако такое предположение будет неверным. Последние годы все чаще можно наблюдать в смартфонах так называемые 3D-сенсоры, или сенсоры глубины.

Если в первых попытках реализации большинство телефонов полагались на стереовидение, которое использовало две камеры для расчета глубины, которая, к слову сказать, была дале-



Рис. 2. Две задних камеры смартфона HTC Evo 3D

ко не точной, так как этот метод не работает при слабом освещении или в темноте, то 3D-сенсоры имеют другой подход. Здесь камеры состоят из датчика, который использует крошечный лазер для «стрельбы» инфракрасным светом, производя тем самым 3D-зондирование окружающих объектов. Похожая идея с использованием инфракрасного излучения применяется, например, на фронтальных камерах смартфонов для распознавания лиц, используя структурированное световое освещение, когда точечный узор проецируется на лицо, а датчик измеряет расстояние между точками и смотрит на искажение в узоре, чтобы вычислить глубину (рис. 3) [1].

Большинство таких сенсоров называют ToF-сенсорами (*Time of Flight*, сенсорами времени полета) аналогично одноименной технологии [2]. Инфракрасный свет, испускаемый камерами, отражается от чего-либо или кого-либо перед камерой и возвращается обратно в ресивер. Однако, в отличие от технологии, используемой в распознавании лиц, здесь не используется узор из точек. Поскольку метод основан на инфракрасном свете, он хорошо работает в условиях низкой освещенности и даже в темноте.

Учитывая, что скорость света – величина неизменная, считывая разницу в скорости полета луча до объекта и обратно, можно определить расстояние и составить глубинную 3D-карту местности, улицы или комнаты. Масштаб и точность такой карты зависят от размера датчиков,

количества лучей, их яркости и множества других факторов. Идейно это очень похоже на эхо в пещере, оно тоже после отражения от стенок возвращается к нам с запозданием.

Хотя идея этой технологии и звучит довольно просто, здесь возникает проблема – слишком маленькие промежутки времени. Есть 2 основных подхода для ее решения: dToF (*direct ToF*) и iToF (*indirect ToF*) [3], [4].

В сенсорах iToF излучатель отправляет высокочастотный модулированный свет, то есть этот свет постоянно включается и выключается с частотой десятки миллионов раз в секунду. За счет того, что свету нужно время для полета до объекта и обратно, фаза, то есть вот это состояние где-то между включенностью и выключенностью, света, вернувшегося в камеру, немного отличается от фазы света в момент отправки. На сенсоре исходный и отраженный обратно от объекта сигналы накладываются друг на друга, за счет чего определяется сдвиг фаз, который и позволяет понять расстояние до каждой точки объекта (рис. 4) [5], [6].

Сенсор dToF работает немного иначе [6]. В таких сенсорах напрямую измеряется разница во времени между отправкой света и детектированием его отражения на сенсоре. Для этого используются так называемые SPAD (*single photon avalanche diodes*, однофотонный лавинный диод). Они могут детектировать крайне маленькие импульсы света, фактически даже ловить



Рис. 3. Технология распознавания лиц

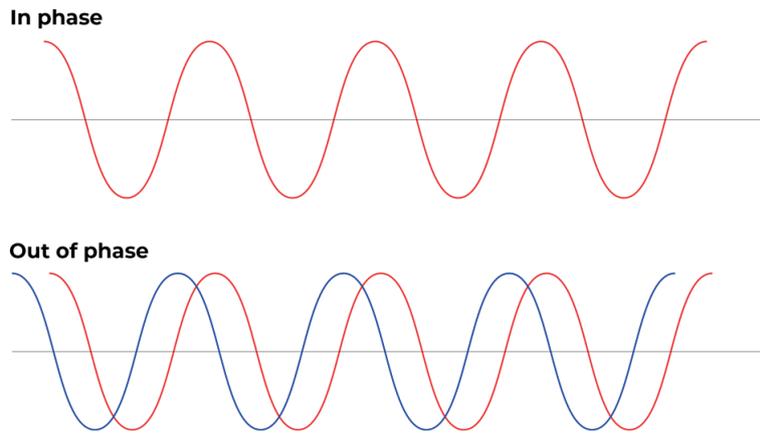


Рис. 4. Сенсор iToF

единичные фотоны. Такие SPAD расположены в каждом пикселе сенсора. А в качестве излучателя в таких сенсорах используются, как правило, так называемые VCSEL (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*, поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором) (рис. 5). Это лазерный излучатель, подобен тем, что используются в лазерных мышках. Сенсор LiDAR (*Light Detection and Ranging*, обнаружение и определение дальности с помощью света) разработан совместно с Sony и является первым массовым коммерческим dToF-сенсором.

Android-смартфоны, имеющие такие сенсоры, используют iToF-сенсоры (например, LG G8 ThinQ и Honor View 20). Сенсоры dToF на данный момент используются только в технике компании Apple – iPad Pro (2020) и iPhone 12 Pro [7].

Скорее всего, Apple остановили на нем свой выбор по следующим причинам. Во-первых, в отличие от iToF-сенсора, излучатель в dToF ис-

пускает не сплошную стену света, а лишь светит в отдельных направлениях, что позволяет экономить батарейку. Во-вторых, dToF-сенсор меньше подвержен ошибкам в измерении глубины из-за так называемой *multipath interference*. Это типичная проблема iToF-сенсоров. Она возникает из-за переотражения света между объектами перед попаданием обратно в сенсор и искажает измерения сенсора.

В зависимости от размера и точности сенсора можно получить следующие данные: дальность и высоту, температуру, диффузию и плотность газа, степень облачности, скорость ветра, форму и размер ландшафта, высоту и плотность лесов, шероховатость морской поверхности и т. п. [8].

Таким образом, 3D-сенсоры уже применимы в таких сферах, как безопасность (распознавание лиц и т. п.), виртуальная реальность, качественно улучшение фотографий, образование и искусство и т. д.

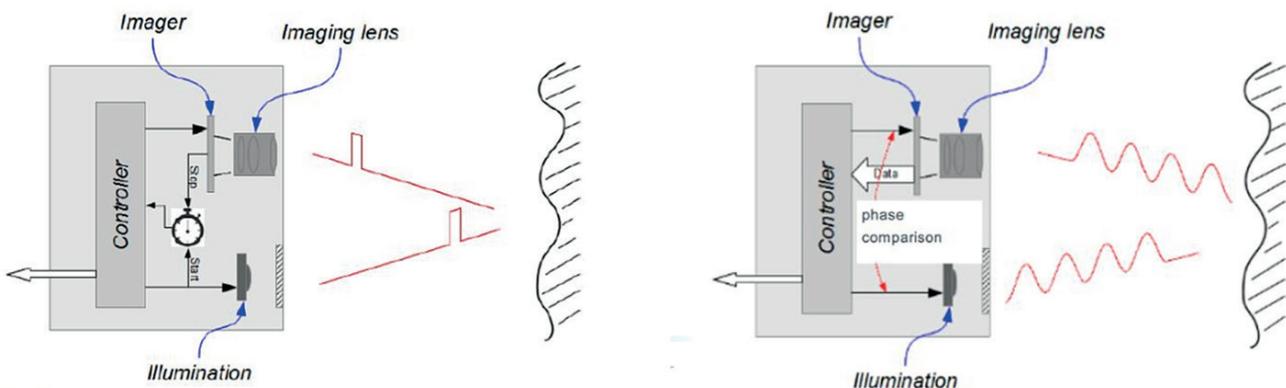


Рис. 5. Сенсор dToF

Самые заметные улучшения пользователь сможет заметить в дополненной реальности. Например, приложение «Рулетка» становится более быстрым и точным, когда подключается LiDAR. Теперь его можно использовать как полноценный инструмент измерения, а не просто как пример использования AR.

Доступ к данным сенсоров у некоторых смартфонов открыт, поэтому появляется все больше приложений, предлагающих новые применения.

Согласно данным Apple сканер LiDAR внутри iPad Pro (2020) может работать на уровне отдельных фотонов света, на расстоянии до пяти метров и на скоростях, которые обозначаются в наносекундах (т. е. кадр может быть захвачен моментально). Однако такие сенсоры пока что весьма дорогостоящи, поэтому в ближайшее время не стоит ждать LiDAR на бюджетных смартфонах.

За счет регистрации не только времени, которое требуется лазерному лучу для возврата, но и угла, под которым он отражается, данные LiDAR можно комбинировать с другой информацией для получения очень точных трехмерных карт. Профессиональные системы LiDAR часто объединяются с устройствами GPS. Стоит отметить, что датчики LiDAR стали популярны

не прямо сейчас, а с появлением первых беспилотных автомобилей. Например, LiDAR установлен в беспилотных авто «Яндекса», датчик помогает ориентироваться машине в пространстве (рис. 6).

Учитывая, что 3D-сенсоры могут работать в любых условиях освещения, очень быстро и очень точно, есть все предпосылки к тому, что подобные сенсоры за следующее десятилетие взлетят до ключевой технологии.

Важной проблемой является следующее. На данный момент всех устройств с такими 3D-сенсорами не так много, на рынке представлены единичные смартфоны, на дороге тестируются единичные автопилотируемые автомобили. На сигналы, отправляемые и получаемые излучателем, действует минимальное количество помех. Однако вполне очевидно, что при ситуации, когда по городу в час пик будет ехать огромное количество машин с сенсорами, на концертах огромное количество людей захотят одновременно снимать сцену (рис. 7), используя устройства с 3D-сенсорами, начнут возникать помехи.

Посылающихся и отражающихся сигналов будет так много, что они начнут друг другу мешать, и устройства будут строить неверные кар-

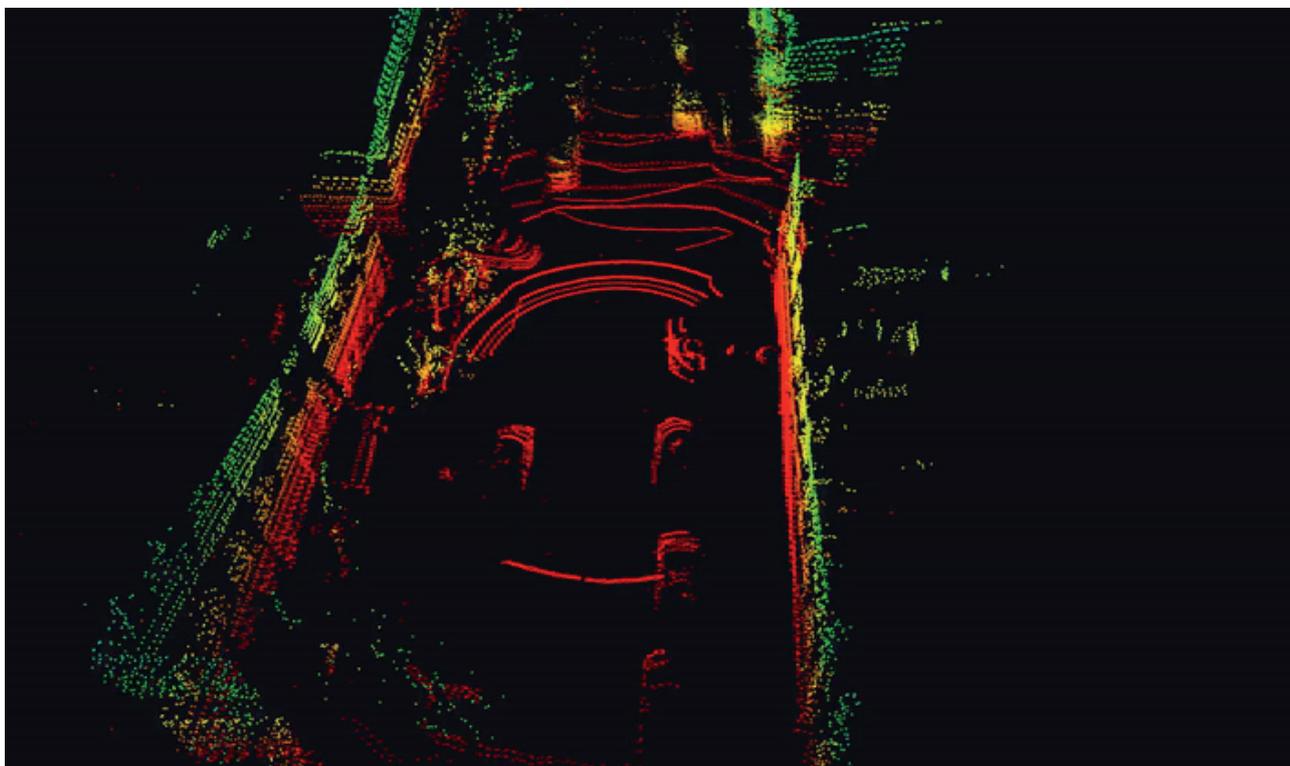


Рис. 6. Работа LiDAR датчика в беспилотных авто «Яндекса»



Рис. 7. Стандартная ситуация на концертах с огромным количеством смартфонов

ты глубин. К сожалению, работ, в которых предлагалось бы решение этой проблемы, пока не опубликовано ни в русскоязычном сегменте, ни в иностранном.

На наш взгляд, наиболее простым решением этой проблемы будет следующий способ. Необходимо каким-либо способом (например, по радиоканалу) синхронизировать все находящиеся рядом в некотором радиусе устройства и тем самым создать своеобразную очередь, с учетом которой будет происходить последовательная съемка каждого из этих устройств, не мешая в этот момент другим.

Учитывая достаточно высокую скорость съемки, измеряемую в миллисекундах, и предположив, что в радиусе полутора метров теоретически может находиться не более пары десятков устройств, можно сделать предварительные выводы, что время, затраченное на съемку для каждого устройства, увеличится незначительно и незаметно для пользователя.

Однако для реализации этого решения необходимо, чтобы все разработчики устройств договорились о возможности синхронизации своих устройств между собой. Скорее всего, для этого потребуется создать единый стандарт, на разработку которого может уйти еще несколько лет, тогда как потребность в решении этой проблемы наблюдается уже сейчас.

Актуальной задачей является найти решение описанной выше проблемы без необходимости разрабатывать единый стандарт для синхронизации находящихся рядом устройств.

#### Библиографический список

1. MixIn3D: 3D Mixed Reality with ToF-Camera / R. Koch, I. Schiller, B. Bartzak et al. Dynamic 3D Imaging. Dyn3D 2009, Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5742. Springer, Berlin, Heidelberg.

2. *Fuchs S., Hirzinger G.* Extrinsic and depth calibration of ToF-cameras // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Anchorage, AK, 2008. P. 1–6.

3. Generation of a high-resolution 3D-printed free-form collimator for VCSEL-based 3D-depth sensing / *B. Chen, D. Claus, D. Russ, M. Nizami.*

4. *Bergh M., Gool L.* Combining RGB and ToF cameras for real-time 3D hand gesture interaction // *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, Kona, HI, 2011. P. 66–72.

5. *Holger R.* Experimental and Theoretical Investigation of Correlating TOF-Camera Systems, 2007, Interdisciplinary Center for Scientific Computing.

6. Что делают 3D-сенсоры в смартфонах? URL: <https://habr.com/ru/company/droider/blog/519740> (дата обращения: 14.12.2020).

7. iPhone 12 What Apple's 3D-sensing camera means for the future of photography. URL: <https://www.inverse.com/innovation/iphone-12-what-apples-3d-sensing-camera-means-for-the-future-of-photography> (дата обращения: 14.12.2020).

8. The newest phones use a time-of-flight camera, but what is it? We ask an expert. URL: <https://www.digitaltrends.com/mobile/what-is-a-time-of-flight-camera-we-asked-an-expert> (дата обращения: 14.12. 2020).

УДК 004.8

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-163-170

**А. Д. Драношук\***

студент

**А. И. Веселов\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРЬ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Описан анализ влияния нейросетевых признаков изображений на качество восстановления. Предложена и реализована модель ошибок, основанная на ошибках, которые могут возникать при передаче сообщений с помощью UDP-протокола. В результате работы была выявлена сильная зависимость качества восстановления от параметров сети, а также представлены графики и примеры восстановленных изображений.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, нейросеть, сжатие изображений, UDP-протокол.

**A. D. Dranoschuk\***

Student

**A. I. Veselov\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF LOSSES OF NEURAL NETWORK FEATURES OF IMAGES ON THE QUALITY OF RESTORATION

This paper describes the analysis of the influence of neural network features of images on the quality of restoration. An error model based on errors that may occur when messages are transmitted using the UDP protocol is proposed and implemented. As a result of the work, a strong dependence of the recovery quality on the network parameters was revealed, and graphs and examples of the recovered images were presented.

**Keywords:** computer vision, neural network, image compression, UDP protocol.

В настоящее время активно развиваются нейросетевые методы обработки изображений. Применение нейронных сетей уже позволило добиться значительного прогресса в таких областях, как классификация изображений, детектирование и сегментация объектов. В ряде недавних работ демонстрируется также возможность применения нейронных сетей в задачах сжатия изображений и показывается, что современные архитектуры нейронных сетей позволяют достигать существенно более высоких степеней сжатия при приемлемом визуальном качестве. Однако необходимо отметить, что при передаче данных, особенно в критичных к задержке приложениях, могут возникать потери пакетов. Степень влияния подобных потерь на качество восстановления до сих пор находится под большим вопросом. В открытых источниках не удалось найти результатов подобных исследований. В связи с этим целью данной работы является исследование влияния искажения или потери нейросетевых признаков на визуальное ка-

чество декодирования изображений в современных нейросетевых кодеках.

### Обзор работ по тематике исследования

Рассматривается передача сжатых нейросетевых признаков\* по сетевому каналу с возможными потерями пакетов. Необходимость передавать сжатые нейросетевые признаки возникает, например, при распределенном вычислении на устройствах типа edge/cloud, когда для решения сложной задачи группа слабых вычислительных устройств (*edge*) объединяется в один вычислительный кластер на определенном сервере (*cloud*). В настоящее время данную задачу хорошо решают с помощью подходов CI (*collaborative intelligences*). В ряде недавних работ [1],

\* Нейросетевые признаки – некоторые скрытые особенности, присутствующие во входных данных нейросети, которые она выделила и представила в виде матрицы коэффициентов.

[2] демонстрируется, что при правильном использовании СИ подходы действительно позволяют решать сложные задачи машинного обучения на группе слабых вычислительных устройств, но для их применения необходима надежная связь между устройствами и сервером, которую не всегда возможно настроить. Поэтому важно понять, как частичная потеря и/или искажение передаваемых данных может повлиять на результат работы нейросети. Частично исследуемая тема рассматривалась в указанных статьях:

1. В статье [2] представлен глубокий теоретически обоснованный анализ важности нейросетевых описательных признаков для задач классификации в зависимости от их глубины расположения в архитектуре нейросети.
2. В статье [3] рассматривается случай решения задач классификации по частично потерянным/поврежденным признакам.
3. В статье [4] рассматривается модель, симулирующая передачу нейросетевых описательных признаков по каналу с возможными потерями.

### Теоретическое обоснование

В данном разделе представлено описание модели источника шумов и источника сжатой информации.

#### Модель HiFiC

В качестве источника сжатой информации был взят сжатый арифметическим кодированием поток нейросетевых признаков модели HiFiC. Модель HiFiC – это особая состязательная нейросеть, которая предназначена для качественного сжатия изображений с потерями [5]. Авторы HiFiC утверждают, что подобный метод предпочтительнее предыдущих подходов сжатия изображений, даже если используется в два раза меньше памяти на кодирование одного пикселя (рис. 1).

HiFiC имеет в своей архитектуре четыре нейросети (рис. 2):

1. E-нейросеть.
2. P-нейросеть.
3. G-нейросеть.
4. D-нейросеть.

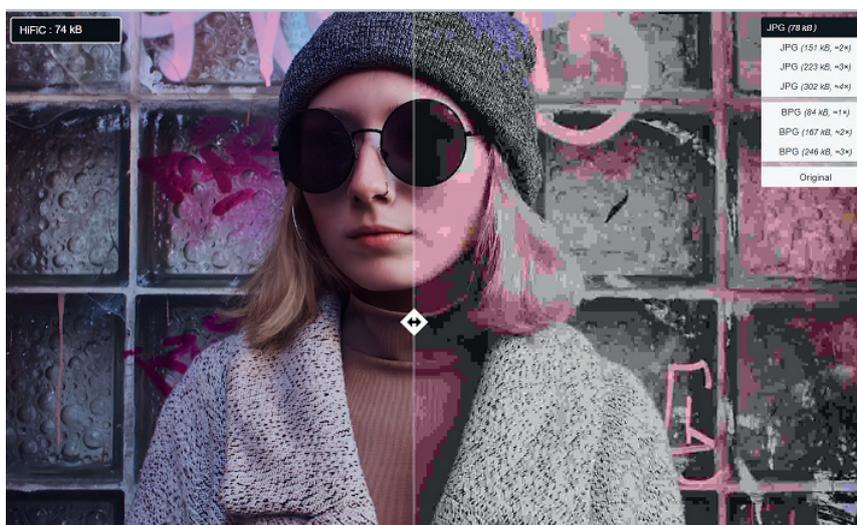


Рис. 1. Сравнение результатов работы HiFiC и JPG

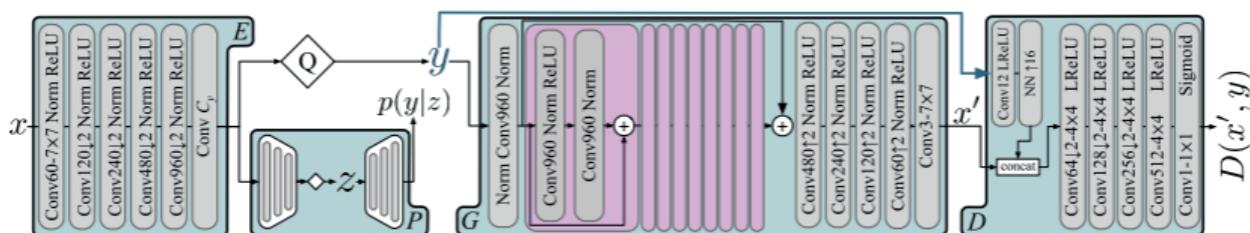


Рис. 2. Архитектура HiFiC

E-нейросеть предназначена для генерации числового вектора нейросетевых описательных признаков сжимаемого изображения.

R-нейросеть предназначена для оценки распределения векторов, которые получаются в результате работы E-нейросети. Данное распределение необходимо для арифметического кодирования [6], с помощью которого будет осуществляться основное сжатие изображения.

G-нейросеть предназначена для генерации восстановленного изображения из сжатых признаков E-нейросети.

D-нейросеть предназначена для критики восстановленного изображения и используется только во время обучения G-нейросети. Данная нейросеть в качестве оптимизационной функции потерь использует формулу (1)

$$d = k_M \text{MSE} + k_P d_p, \quad (1)$$

где MSE – среднеквадратическая ошибка между восстановленным и исходным изображением;  $d_p$  – метрика для оценки перцептуального качества изображения: LPIPS [7], NIQE [8], FID [9]; KID [10] и др,  $k_M$  и  $k_P$  – балансирующие коэффициенты. Как утверждают авторы NIFIC, данное сочетание оценок перцептуального качества и среднеквадратической ошибки позволяет достаточно точно оценить качество восстановленного изображения.

*Примечания:*

1. ConvC свертка с C-каналами и фильтрами  $3 \times 3$ .

2.  $\downarrow 2$ ,  $\uparrow 2$  обозначают, будет ли расширяться или сужаться входные данные после применения свертки (за исключением случаев, когда обозначено иначе).

3. Norm – нормализация, описанная в [5] как ChannelNorm.

4. LReLU – активационная функция [11] с  $\alpha = 0,2$ .

5. NN  $\uparrow 16$  – интерполяция с помощью метода «ближайших соседей».

6. Q – квантование.

*UDP-модель источника искажений*

В данном разделе представлена модель ошибок, которые могут возникать при передаче с помощью UDP-протокола: потеря дейтаграмм\* (пакетов). Дейтаграмма будет состоять из массива сжатых описательных нейросетевых признаков изображения в формате битовой последовательности, которые представляют сжатую информацию о передаваемом изображении.

Этапы формирования переданной дейтаграммы:

1. Массив коэффициентов разбивается на дейтаграммы (пакеты) заданной длины.

2. Если произошла ошибка, то пакет обнуляется. Если ошибки не было, то пакет остается нетронутым.

### Особенности реализации

1. Для точности результатов было проведено имитационное моделирование: 1000 результатов симуляций передачи описательных признаков NIFIC были получены, а затем усреднены.

2. Для наглядности графиков значения количества передаваемых бит были конвертированы в количество поврежденных нейросетевых признаков изображения.

*Результаты*

В данном разделе представлены результаты имитационного моделирования, которые показали важность защиты передаваемых нейросетевых признаков. Для тестов была использована база данных Kodak\*\*. Эта база данных состоит из 25 несжатых изображений (24 бит на пиксель) в .png формате в разрешении 768 x 512. Пример изображения из базы данных Kodak представлен на рис. 3.

Анализ восстановленных изображений показал, что:

1) увеличение вероятности потери пакета приводит к увеличению глобального искажения на изображении;

2) увеличение длины потерянного пакета приводит к увеличению длины локального искажения на изображении;

3) характер искажений является случайным.

Таким образом, если пакеты теряются с большой вероятностью, то все изображение будет испорчено искажениями (рис. 6), если был потерян только один пакет, то пострадает только рецептивная область восстановленного изображения утерянных признаков (рис. 7). Случайный характер искажений объясняется тем, что вид искажений зависит от случайного расположения блока потерянных признаков, поэтому не факт, что в разные моменты времени при одних и тех же параметрах вероятности ошибки и длины пакета будут восстановлены одинаковые изображения (рис. 9, 10). Данные наблюдения также подтверждаются имитационным моделированием и графиками (рис. 4, 5).

\* Дейтаграмма – блок информации, передаваемый протоколом через сеть связи без предварительного установления соединения и создания виртуального канала.

\*\* Сайт авторов базы данных Kodak <http://r0k.us/graphics/kodak/>



Рис. 3. Передаваемое изображение

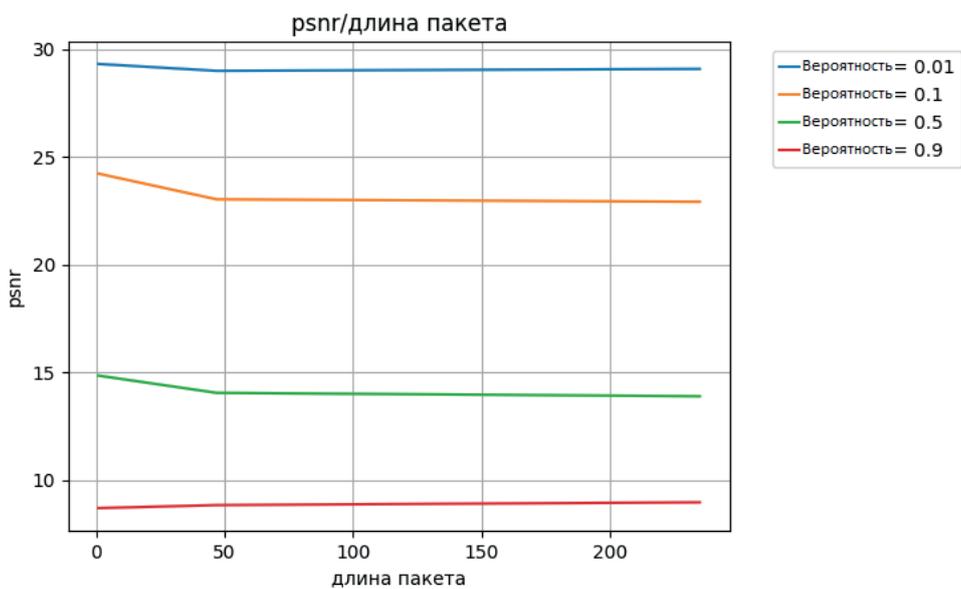


Рис. 4. График psnr от длины пакета

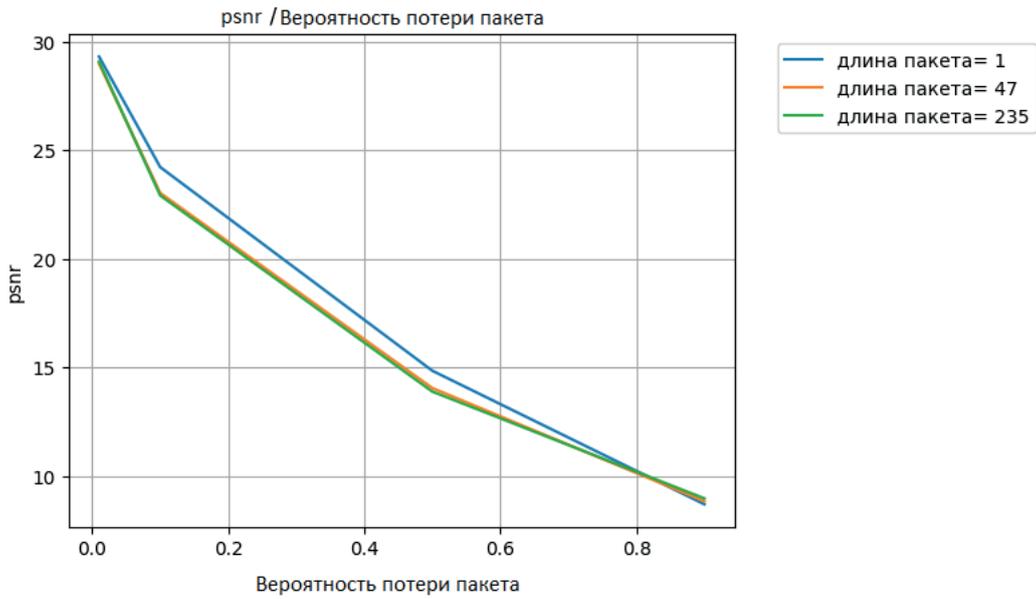


Рис. 5. График psnr от вероятности потери пакета\*

**Примеры восстановленных изображений**

Длина = 1, Вероятность = 10 %

Длина = 1, Вероятность = 50 %

Длина = 1, Вероятность = 99 %

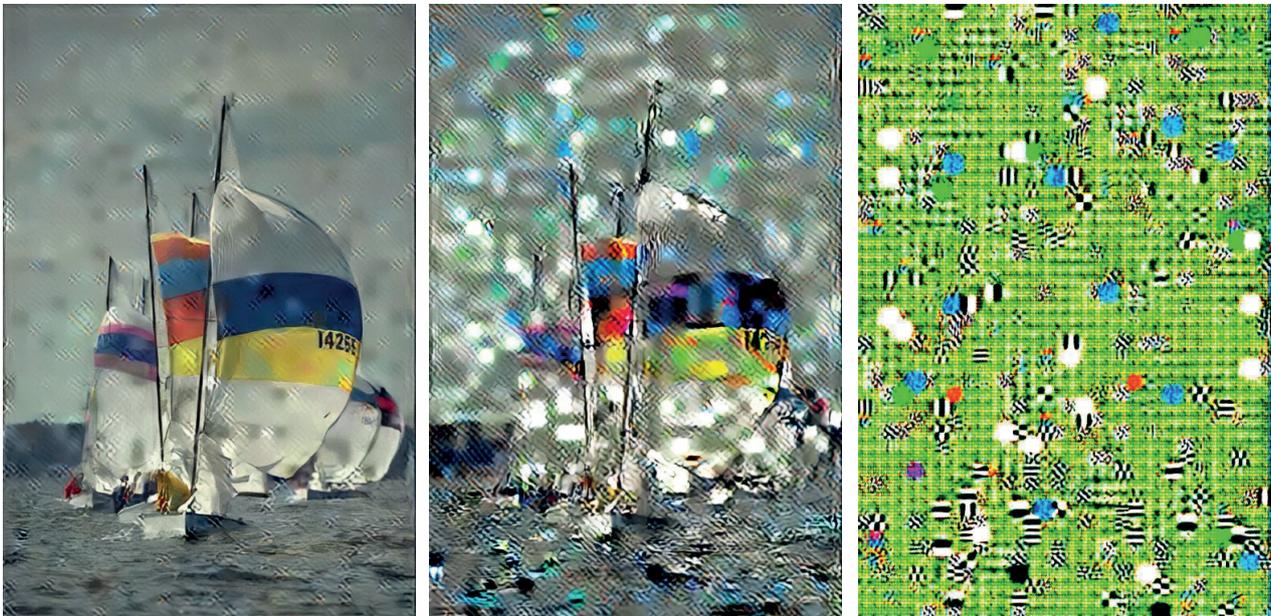
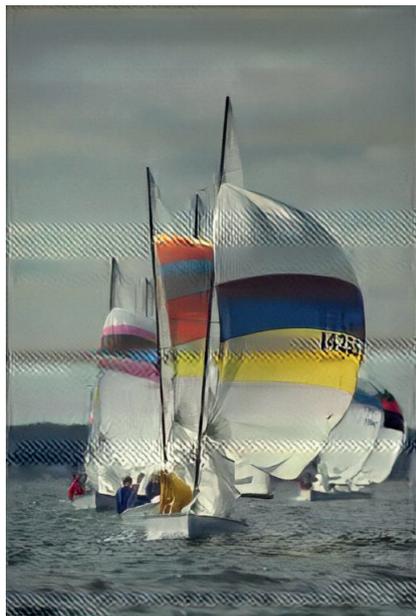


Рис. 6. Примеры восстановленного изображения

\* Вероятность потери дейтаграммы (пакета) – вероятность появления ошибки, которая приведет к обнулению передаваемой дейтаграммы (пакета).

Длина = 47, Вероятность = 10 %



Длина = 47, Вероятность = 50 %



Длина = 47, Вероятность = 99 %

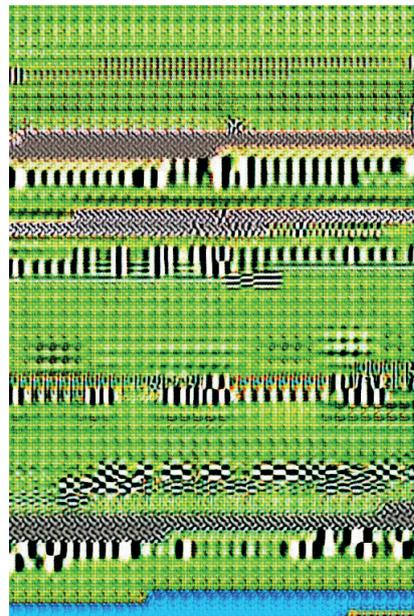


Рис. 7. Примеры восстановленного изображения

Длина = 470, Вероятность = 10 %



Длина = 470, Вероятность = 50 %



Длина = 470, Вероятность = 99 %



Рис. 8. Примеры восстановленного изображения

Длина = 470, Вероятность = 10 %



Длина = 470, Вероятность = 10 %



Длина = 470, Вероятность = 10 %

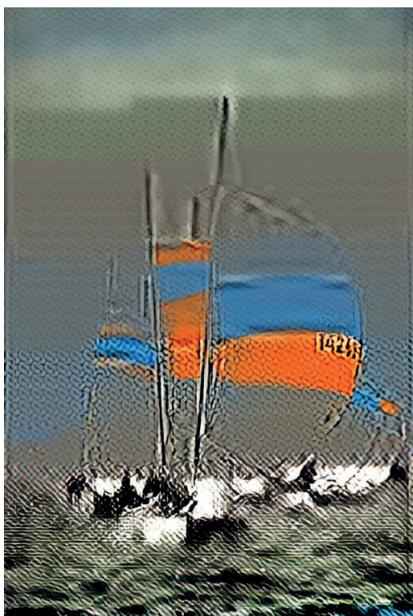


Рис. 9. Примеры восстановленного изображения

Длина = 470, Вероятность = 50 %



Длина = 470, Вероятность = 50 %



Длина = 470, Вероятность = 50 %

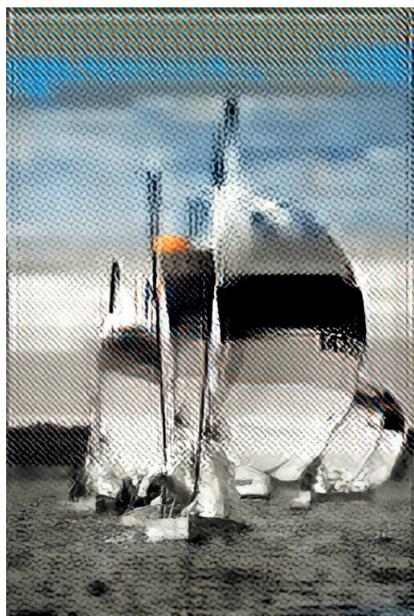


Рис. 10. Примеры восстановленного изображения

## Заключение

В ряде недавних работ демонстрируется возможность применения нейронных сетей в задачах сжатия изображений и показывается, что современные архитектуры нейронных сетей позволяют достигать существенно более высоких степеней сжатия при приемлемом визуальном качестве. Однако необходимо отметить, что при передаче данных, особенно в критичных к задержке приложениях, могут возникать потери пакетов. В статье была выявлена сильная чувствительность к искажениям, возникающим при передаче пакетов по протоколу UDP: чем выше вероятность потерять пакет, тем хуже восстановленное изображение.

Таким образом, после имитационного моделирования и визуализации восстановленных изображений были подтверждены следующие факты:

- 1) сильного влияния исследуемых искажений на результаты восстановления изображения из поврежденных сжатых нейросетевых признаков;
- 2) случайной природы характера искажений на восстановленном изображении;
- 3) зависимости характера искажений на восстановленном изображении от места и объема поврежденных передаваемых данных.

## Библиографический список

1. *Huang Y.* Task scheduling with optimized transmission time in collaborative cloud-edge learning. 27<sup>th</sup> International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), 2018.

2. *Alvar S., Bajic I.* Pareto-Optimal Bit Allocation for Collaborative Intelligence arXiv:2009.12430v1 25 Sep. 2020.

3. *Milošević N., Racković M.* Classification Based On Missing features // Deep Convolutional neural Networks. Neural Network World 29. 2019. P. 221–234.

4. DFTS: Deep feature transmission simulator / H. Unnibhavi, H. Choi, S. Alvar, I. Bajić. Demo paper at IEEE MMSP'18.

5. High-Fidelity Generative Image Compression / F. Mentzer, G. Toderici, M. Tschannen E. Agustsson. arXiv preprint arXiv:2006.09965, 2020.

6. *Marpe D., Schwarz H., Wiegand T.* Context-based adaptive binary arithmetic coding in the h. 264/avc video compression standard // IEEE Transactions on circuits and systems for video technology, 13(7):620–636, 2003.

7. The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric / R. Zhang, P. Isola, A. Efros, E. Shechtman, O. Wang // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 586–595.

8. *Simonyan K., Zisserman A.* Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint arXiv:1409.1556, 2014.

9. Gans trained by a two time-scale update rule converge to a local nash equilibrium / M. Heusel, H. Ramsauer, T. Unterthiner, B. Nessler, S. Hochreiter // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. P. 6626–6637.

10. Demystifying mmd gans / M. Bińkowski, D. Sutherland, M. Arbel, A. Gretton // International Conference on Learning Representations, 2018.

11. Empirical evaluation of rectified activations in convolutional network / B. Xu, N. Wang, T. Chen, M. Li. // arXiv preprint arXiv:1505.00853, 2015.

УДК 004-93

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-171-174

**А. Д. Дранощук\***

студент

**И. А. Пастушок\***

кандидат технических наук, доцент

**М. С. Савинов\***

студент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОСЕТИТЕЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Описан метод позиционирования людей в помещении при помощи нейронных сетей. Предложен способ определения местоположения человека в помещении с использованием стереокамеры с картой глубины. В результате работы была создана система идентификации и трекинга посетителей в пространстве на основе облачных технологий и компьютерного зрения.

Исследована точность предложенной модели, а также выявлены направления дальнейших исследований в данной сфере.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, идентификация, трекинг, облачные технологии, позиционирование в пространстве, детектирование людей, нейросеть.

**A. D. Dranoschuk\***

Student

**I. A. Pastushok\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**M. S. Savinov\***

Student

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## CREATING A SYSTEM FOR POSITIONING VISITORS IN SPACE BASED ON CLOUD TECHNOLOGIES AND COMPUTER VISION

This paper describes a method for positioning people in a room using neural networks. A method for determining a person's location in a room using a stereo camera with a depth map is proposed. As a result of the work, a system for identifying and tracking visitors in the space was created based on cloud technologies and computer vision.

The proposed model's accuracy is investigated, and the directions for further research in this area are identified.

**Keywords:** computer vision, identification, tracking, cloud technologies, positioning in space, detecting people, neural network.

Системы видеонаблюдения, где основной задачей является обнаружение людей, имеют большое значение для обеспечения общественной безопасности. Потребность в автоматизированном видеоанализе растет, и этой задаче уделяется все большее внимание. Однако задача является сложной из-за больших вариаций освещения, поз и фона.

Уже существует множество решений проблемы обнаружения людей, многие из них основаны на использовании нейросетей. Например, в работе [1] задача отслеживания решается при помощи алгоритма многокликковой оптимизации. Учитывается как межкамерная, так и

межкадровая корреляция данных, чтобы вычислить хорошие оценки сходства, извлекаются признаки как внешнего вида, так движения. Для характеристики внешнего вида используется алгоритм повторной идентификации. Недостаток [1] в том, что алгоритм не работает в режиме реального времени, в отличие от предложенного метода.

В алгоритме, предложенном в [2], для идентификации человека используются телосложение и лицо. Лица и внешний вид людей записываются в базу данных. Камеры используются для обнаружения, отслеживания и идентификации людей путем сопоставления ранее захва-

ченных и захваченных в текущий момент лиц и образов людей. Экспериментальные результаты показывают эффективность слежения за человеком с помощью нескольких сенсоров и идентификации человека с учетом информации о лицах и внешнего вида. Недостатком является то, что для реализации данного метода требуется большое количество камер в помещении.

В работе [3] вводится подход для обнаружения и отслеживания человека с использованием сверточной нейронной сети (CNN) и венгерского алгоритма. CNN используется для локализации людей от кадра к кадру в видеопотоке. В процессе отслеживания решается проблема ассоциации данных в визуальном отслеживании с помощью венгерского алгоритма. Обнаруженный человек назначается треклету (фрагмент трека, за которым следует движущийся объект, сконструированный системой распознавания изображений) на основе распределения данных в видеокадре. Экспериментальные результаты показывают, что система может работать с видеозаписями, снятыми по различным сценариям, но не в реальном времени.

В предложенном методе для решения задачи идентификации человека по лицу используется `face_recognition` [4] – программный интерфейс (API) для реализации распознавания лиц на языке Python, – которой позволяет достичь большой точности, обладает высокой скоростью работы и удобством интеграции.

Повторная идентификация является процедурой идентификации человека на каждом кадре при помощи вектора его признаков из предыдущих кадров. Она используется, например, для трекинга (отслеживания пути) человека в помещении. Одна из популярных библиотек для реализации повторной идентификации, используемая в реализации системы, – `Torchreid` [5].

Для детектирования используется нейронная сеть `Mask RCNN` [6]. С помощью этой нейросети можно выделить силуэт каждого человека отдельно, не зависимо от того, попадет ли другой человек в ограничивающий прямоугольник или нет. Это позволяет безошибочно идентифицировать человека с помощью повторной идентификации. Для реализации комплекса используется предобученная модель из библиотеки `Detectron2` [7].

Для отслеживания передвижения объектов применяется алгоритм `Tractor++` [8]. В нем предлагается использовать регрессор для решения задачи слежения. Это имеет два ключевых преимущества: (1) не требуется никакого специального обучения отслеживанию и (2) не выполняется никакой сложной оптимизации во время

тестирования, следовательно, трекинг происходит в режиме онлайн. Кроме того, `Tractor++` обеспечивает самую современную производительность в нескольких сложных сценариях отслеживания.

Для полноценной работы данного комплекса был реализован алгоритм определения местоположения человека в помещении с использованием стереокамеры с картой глубины. Нужно знать горизонтальное поле зрения камеры (FOV) (угол  $\beta$ ) и ширину датчика изображения ( $w_{sensor}$ ). Эти данные можно узнать в технических характеристиках камеры. Имея изображение RGB, карту глубины, горизонтальный FOV и ширину RGB картинки, можно вычислить координаты всех объектов, находящихся на изображении.

Например, имеется RGB кадр с камеры и карта глубины для него. RGB кадр обрабатывается с помощью `Detectron2`, который возвращает ограничивающий прямоугольник и маску объекта. Информация о прямоугольнике имеет вид:  $[x_{left}, y_{top}, x_{right}, y_{bottom}]$ , где  $x_{left}$  и  $y_{top}$  – координаты левого верхнего угла;  $x_{right}$  и  $y_{bottom}$  – координаты правого нижнего угла. Также он возвращает маску объекта, она понадобится для вычисления расстояния до объекта. Для вычисления выпишем все числа из карты глубины, координаты которых на маске равны 1, в отдельный вектор  $[x_1, x_2, x_3 \dots x_n]$ . Затем вычисляем расстояние до объекта, вычислив среднее значение вектора. Теперь, чтобы найти координаты человека, нужно узнать его угол отклонения от центра камеры. Рассмотрим, как сверху выглядит обзор камеры для данной ситуации (рис. 1).

Здесь  $\beta$  – угол обзора камеры;  $\gamma$  – угол отклонения человека от центра камеры;  $dist$  – расстояние до человека. Значения  $\beta$  и  $dist$  известны. Чтобы найти  $\gamma$ , воспользуемся формулой

$$\gamma = \frac{\beta}{w_{sensor}} \cdot \left( \frac{x_{left} + x_{right}}{2} - \frac{w_{sensor}}{2} \right),$$

где  $x_{left}$  и  $x_{right}$  – координаты краев ограничивающего прямоугольника;  $w_{sensor}$  – ширина изображения.

Посчитав угол  $\gamma$ , можно с легкостью найти координату  $x$  с помощью формулы (4) и координату  $y$  с помощью формулы (5):

$$x = \cos(\gamma) \cdot dist.$$

$$y = \sin(\gamma) \cdot dist.$$

Общая схема реализованного программного комплекса представлена на рис. 2.

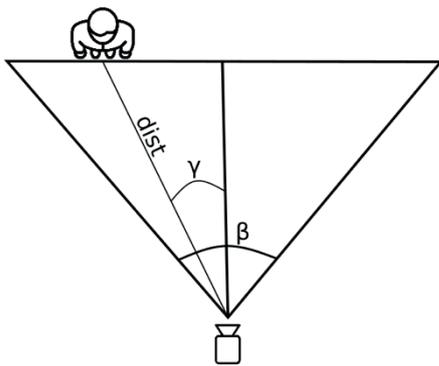


Рис. 1. Обзор камеры. Вид сверху

Программный комплекс состоит из 5 модулей. Каждый модуль программного комплекса является Docker-контейнером, и все они передают информацию между собой с помощью Redis. Это позволяет с легкостью развернуть программный комплекс на любом сервере.

Далее рассмотрена схема работы каждого модуля по отдельности.

Модуль распознавания лиц развернут на микрокомпьютере Jetson Nano. Вся информация из модуля записывается в базу данных, которая расположена на сервере. Работа модуля основана на библиотеке Face Recognition (FR). Программа получает информацию с камеры, подключенной к микрокомпьютеру. С помощью библиотеки FR ищутся лица на кадре, затем для каждого лица вычисляется вектор признаков, ищутся совпадения с векторами из базы данных. Если есть совпадение, то лицо распознано. Если нет, то человек считается нераспознанным. Информация о вошедших людях записывается в базу данных.

Модуль детектирования объектов развернут на главном сервере. Для него требуется наличие видеокарты. Модуль детектирования объектов получает на вход кадр, на котором с помощью библиотеки Detectron2 детектируются объекты. Информация о каждом объекте записывается в

Redis, и отправляется сообщение о завершения работы модуля.

Модуль определения местоположения объектов принимает на вход RGB изображение, карту глубины и информацию о каждом объекте, найденном в модуле детектирования. Для каждого объекта вычисляются координаты местоположения в помещении с помощью алгоритма. Вся информация, полученная на входе и вычисленная в данном модуле, отправляется в следующий модуль с помощью Redis.

Модуль отслеживания объектов отслеживает передвижение объектов на двух кадрах, предыдущем и текущем. Для каждого объекта вычисляется вероятность его точного определения. Вся полученная информация отправляется в следующий модуль.

Модуль повторной идентификации вычисляет вектор признаков для каждого объекта, у которого вероятность, полученная на шаге отслеживания объектов, ниже определенного порога. Все векторы и полученная информация отправляются на финальную обработку.

Пример работы программного комплекса показан на рис. 3.

Вычислена точность работы программного комплекса. Для этого был создан датасет, в котором были размечены люди. Каждому человеку присвоен идентификационный номер. Перед прогоном через программный комплекс было подсчитано общее количество объектов (человек) на всех кадрах. После прогона через датасет подсчитывалось количество правильно распознанных людей. Для определения точности количество правильно распознанных людей делилось на общее количество людей на всех кадрах и умножалось на 100. В итоге точность программного комплекса достигла 86 %.

В ходе научной работы был реализован программный комплекс для идентификации людей в помещении.

Для этого были изучены существующие решения в данной области. Проведен ряд экспери-

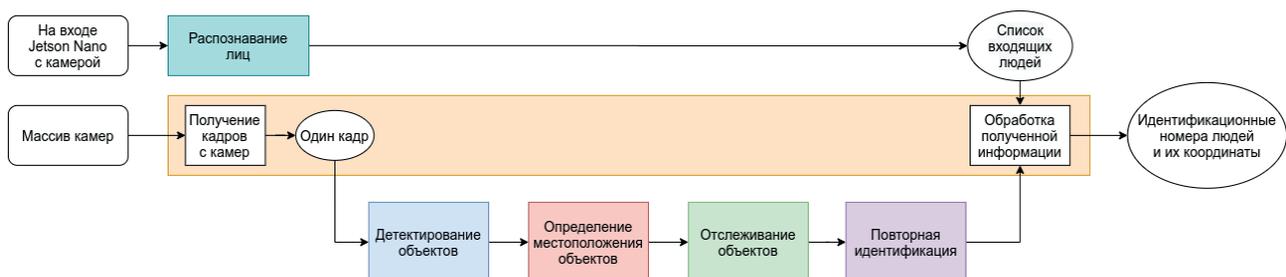


Рис. 2. Схема программного комплекса

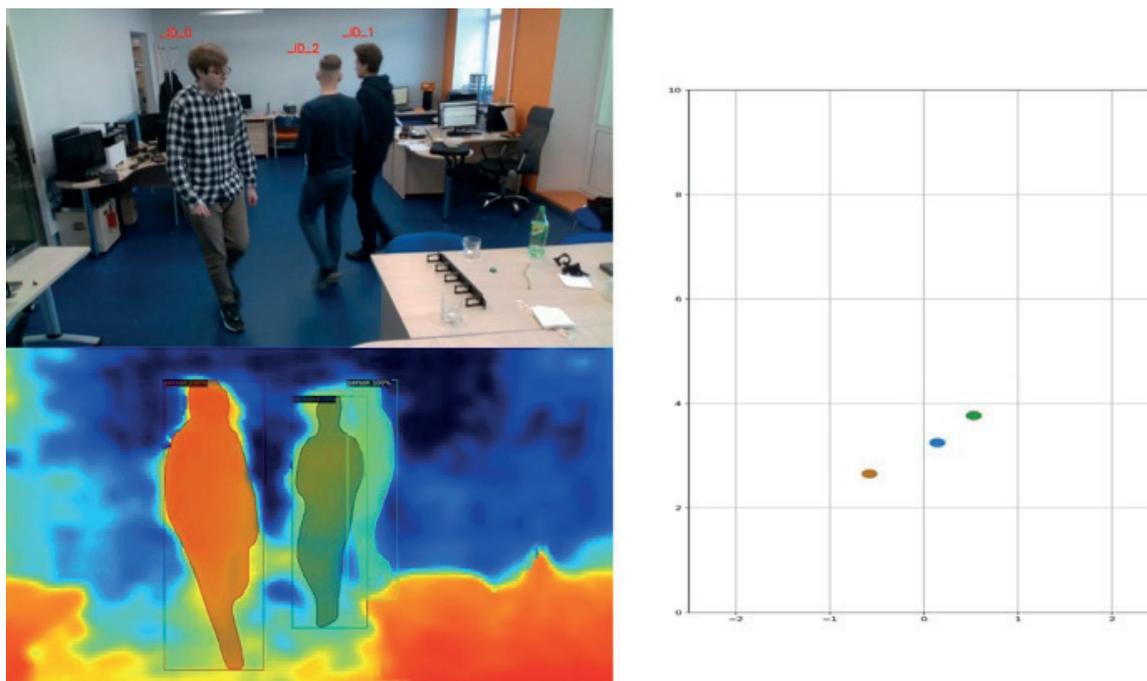


Рис. 3. Результат работы программного комплекса

ментов для выявления наиболее точных алгоритмов идентификации, после чего спроектирована и реализована многокомпонентная система отслеживания местоположения человека с помощью стереокамер.

Разработаны основные элементы комплекса: детектирование объектов, определение местоположения объектов, отслеживание объектов, повторная идентификация. Самостоятельно был реализован модуль определения местоположения людей в помещении с помощью RGBD камеры.

Получены следующие результаты: а) точность работы системы определения местоположения людей в помещении составила 99 %; б) точность работы всего программного комплекса составила 86 %.

*Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента Российской Федерации МК-1326.2021.1.6 «Исследование алгоритмов доступа к ресурсам радиоканала для систем индустриального интернета вещей»*

### Библиографический список

1. Liu W., Camps O., Sznajder M. Multicamera Multi object Tracking. // CoRR. 2017. abs/1709.07065.
2. Yang M., Huang S. AppearanceBased Multimodal Human Tracking and Identification for Healthcare in

the Digital Home // dblp computer science bibliography. Sensors. 2014. N 14. P.14253–14277.

3. Multiple human tracking in drone image / H. Kim, G. Lee, Hyung J. et al. // Multim. Tools Appl. 2019. N 78. P. 4563–4577.

4. Geitgey A. URL: [https://github.com/ageitgey/face\\_recognition](https://github.com/ageitgey/face_recognition) (дата обращения: 25.05.2020).

5. Zhou K., Xiang T. Torchreid: A Library for Deep Learning Person ReIdentification in Pytorch // CoRR. 2019. abs/1910.10093.

6. He K., Gkioxari G., Dollar P. Mask R CNN. // IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2017, Venice, Italy, October 2229, 2017. P. 2980–2988.

7. Detectron2 / Y. Wu, A. Kirillov, F. Massa et al. URL: <https://github.com/facebookresearch/detectron2> (дата обращения: 11.06.2020).

8. Bergmann P., Meinhardt T., Leal-Taixe L. Tracking Without Bells and Whistles. // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, ICCV 2019, Seoul, Korea (South), October 27 November 2, 2019. P. 941–951.

УДК 621.391.1

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-175-179

**В. Г. Ерышов\***

кандидат технических наук, доцент

**Д. В. Ильина\***

старший преподаватель

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НЕГЛАСНОГО ДОБЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТАХ ИНФОРМАТИЗАЦИИ

Рассматривается алгоритм динамического обнаружения не санкционированно установленных на подвижном объекте информатизации специальных технических средств. Данный метод может быть использован при подготовке бакалавров направления 10.03.01 «Информационная безопасность».

**Ключевые слова:** информационная безопасность, специальные технические средства, конфиденциальная информация, радиоэлектронные средства, подвижные объекты информатизации.

**V. G. Eryshov\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**D. V. Ilina\***

Senior Lecturer

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## ALGORITHM FOR DYNAMIC DETECTION OF SPECIAL TECHNICAL MEANS OF SURREPTITIOUS OBTAINING OF INFORMATION ON A MOVING OBJECT OF INFORMATIZATION

The article describes an algorithm for dynamic detection of special technical means which installed without authorization on a moving object of Informatization. This method can be used for training bachelors in the direction 10.03.01 "Information security".

**Keywords:** information security, special technical means, confidential information, radio-electronic means, mobile objects of Informatization.

В современных условиях развития новейших технологий и методов негласного добывания конфиденциальной информации (КИ), обрабатываемой на защищаемых объектах информатизации (ОИ), нарушителями информационной безопасности (ИБ), представителями криминальных структур, промышленного шпионажа все чаще и чаще применяются специальные технические средства (СТС) негласного добывания информации.

В средних и крупных организациях, как правило, обрабатывается достаточно много разнообразной конфиденциальной информации, активов, в качестве которых выступают сведения конфиденциального характера: о структуре, составе, финансовой, экономической, производственной деятельности организации, о структуре, составе, состоянии ОИ, информационных систем, систем комплексной защиты информации, персональных данных сотрудников,

информационных, материальных и финансовых активов организации.

В связи с этим одной из важнейших задач обеспечения комплексной безопасности информации на защищаемых ОИ организаций является задача предотвращения утечки конфиденциальной информации по техническим каналам и применения нарушителем ИБ различного рода СТС. Важнейшей подзадачей при решении вышеозвученной задачи является оперативное, достоверное обнаружение, идентификация и локализация потенциально внедренных на защищаемые ОИ СТС.

Факторы и условия, приводящие к появлению различных угроз ИБ, проявляются в нарушении таких свойств информации, как: целостность, конфиденциальность и доступность информации, составляющей сведения конфиденциального характера.

Внутренними и внешними источниками угроз ИБ при этом могут быть представители конкурирующих организаций, преступных сообществ, коррумпированные сотрудники (внутренние нарушители ИБ), которые могут преследовать различные цели: ознакомление с КИ, кража, хищение, модификация, уничтожение КИ в целях нанесения максимального материального, экономического и других видов ущерба организации.

Незаконный, несанкционированный доступ нарушителя ИБ к КИ возможен за счет получения прямого доступа к КИ, разглашения внутренними нарушителями ИБ, допущенными к КИ, охраняемых сведений, за счет использования технических каналов утечки информации, через технические средства обработки КИ, за счет внедрения и применения СТС на ОИ.

Потенциальными источниками КИ являются внутренний персонал, различного рода документация, открытые публикации, технические (бумажные), магнитные носители информации, побочные электромагнитные излучения и наводки, акустические и виброакустические каналы утечки информации, основные и вспомогательные технические средства обработки информации КИ, автоматизированные и информационные системы, средства обеспечения производственной деятельности, а также продукция и отходы производства организации.

Наиболее распространенным способом добытия КИ нарушителем ИБ является использование на защищаемых ОИ специальных технических средств негласного добывания КИ (радиомикрофонов, телефонных радиоретрансляторов, скрытых видеокамер с радиоканалом и других подслушивающих излучающих устройств). Данные СТС могут применяться нарушителем ИБ, в том числе и на подвижных ОИ, таких как: автомобили «первых» должностных лиц организации, специальные автомобили, аппаратные связи и управления.

В настоящее время широко известен ряд алгоритмов и способов обнаружения и идентификации такого рода СТС [1], [2]. На ряду с известными преимуществами этих алгоритмов к их основным недостаткам можно отнести: ограниченность использования для подвижных ОИ и высокую вероятность ложных обнаружений других радиоэлектронных средств (РЭС) [3].

К существенным недостаткам существующих алгоритмов можно также отнести их алгоритмическую сложность, значительное увеличение количества ложных срабатываний из-за динамически меняющейся радиоэлектронной

обстановки при изменении местоположения мобильных ОИ (специальных автомобилей, автомобилей «первых» должностных лиц, аппаратных управления, связи) по маршруту перемещения и появления новых радиочастотных сигналов других излучающих средств, не являющихся СТС [3].

В предлагаемой статье рассматривается алгоритм динамического обнаружения не санкционированно установленных на мобильном ОИ СТС (НУОИСТС) или НУОСЭУ – не санкционированно установленных на подвижном объекте специальных электронных устройств. Данный алгоритм динамического обнаружения НУОИСТС позволяет обеспечить устранение известных недостатков, повысить вероятности обнаружения не санкционированно установленных на ОИ СТС. Также выигрышным преимуществом рассматриваемого алгоритма является увеличение области применения алгоритма в целях обнаружения НУОИСТС на различных типах как подвижных, так и стационарных защищаемых ОИ.

Рассматриваемый в статье алгоритм, представленный на рис. 1 [3], можно описать следующей последовательностью действий: сначала операторами радиомониторинга службы безопасности защищаемого ОИ в ПЭВМ комплексе радиомониторинга формируется база данных о радиочастотных спектрах известных установленных на ОИ электронных излучающих средств. Затем задаются исходные данные по частотам контролируемого диапазона, а также данные по расстоянию (радиусу контролируемой зоны), за пределами которой исключен уверенный прием сигналов НУОИСТС. Далее задается требуемое количество вспомогательных средств обнаружения СТС.

На защищаемом ОИ должностными лицами службы безопасности устанавливается основное средство обнаружения (комплекс радиомониторинга) и развертываются вспомогательные средства обнаружения (вспомогательные комплексы радиомониторинга) по маршруту передвижения мобильного ОИ, с таким требованием, что расстояние от маршрута передвижения до вспомогательного средства обнаружения должно быть больше радиуса зоны уверенного приема сигналов от СТС (рис. 2) [3].

В процессе движения мобильного ОИ синхронно измеряются радиочастотные сигналы основным комплексом радиомониторинга и вспомогательными средствами обнаружения излучений от СТС и передаются данные об обнаруженных сигналах со вспомогательного средства обнаружения по специальному каналу дистан-

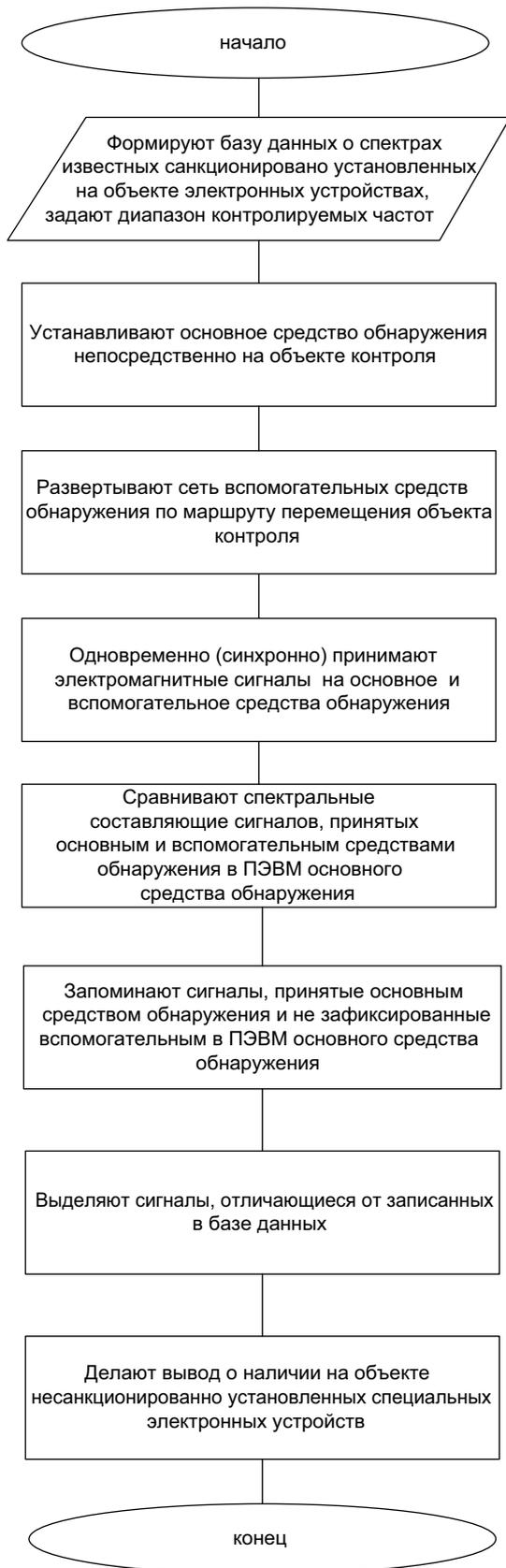


Рис. 1. Обобщенная блок-схема алгоритма реализации динамического обнаружения НУОИСТС

ционного управления и синхронизации на основной комплекс радиомониторинга (рис. 4) [3].

В основном комплексе радиомониторинга операторами радиомониторинга осуществляется сравнение последовательно принятых радиочастотных спектральных составляющих сигналов, основным и вспомогательным средствами обнаружения СТС.

В случае обнаружения ранее неизвестного сигнала, принятого основным комплексом радиомониторинга и не пропущенного вспомогательным, операторы осуществляют запоминание сигнала в базу данных ПЭВМ основного средства обнаружения радиоизлучений.

Если происходит совпадение радиочастотных спектральных составляющих принятого основным комплексом радиомониторинга и вспомогательным средствами обнаружения сигнала, тогда этот сигнал исключается оператором из дальнейшей обработки. После этого программный модуль осуществляет сравнение радиочастотных спектральных составляющих сигналов, выбранных на первом этапе сравнения, со радиочастотными спектральными составляющими сигналов, хранящимися в базе данных ПЭВМ санкционированно установленных на ОИ излучающих средств.

Далее программным модулем ПЭВМ комплекса радиомониторинга выбираются сигналы, которые отличаются от записанных в базе данных ПЭВМ комплекса радиомониторинга, исключаются из рассмотрения сигналы в случае совпадения выбранных радиочастотных спектральных составляющих сигналов со спектральными составляющими сигналов, хранящимися в базе данных ПЭВМ комплекса радиомониторинга санкционированно установленных на ОИ излучающих электронных средств. В этом случае выбранные радиочастотные сигналы и будут являться сигналами НУОИСТС, обнаруженными на защищаемом ОИ, локализацией которых далее и будут заниматься поисковые группы службы безопасности защищаемого ОИ.

В заключение можно отметить, что рассмотренный алгоритм по сравнению с существующими предоставляет возможность должностным лицам службы безопасности защищаемых ОИ, обеспечивающих защиту ОИ от применения нарушителем ИБ СТС, обнаруживать, идентифицировать и локализовывать обнаруженные устройства негласного добывания КИ с высокой вероятностью и оперативностью, что позволяет утверждать о повышении эффективности обеспечения комплексной безопасности ОИ в целом.

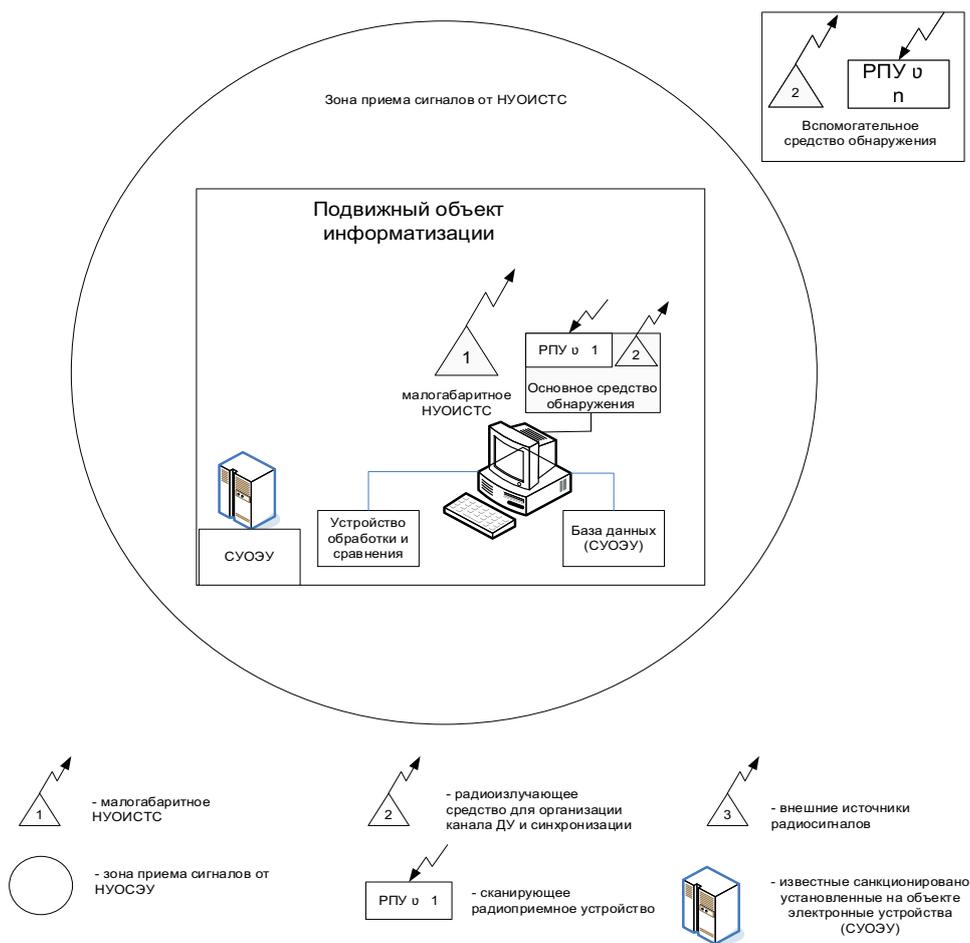


Рис. 2. Обобщенная блок-схема расположения основного и вспомогательного средств обнаружения излучений

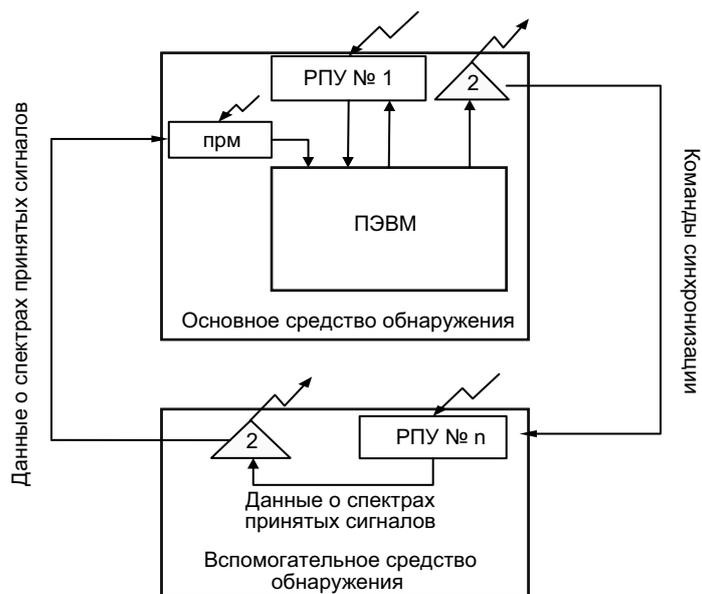


Рис. 3. Обобщенная схема дистанционного и синхронного управления основным и вспомогательным комплексами радиомониторинга на защищаемом ОИ

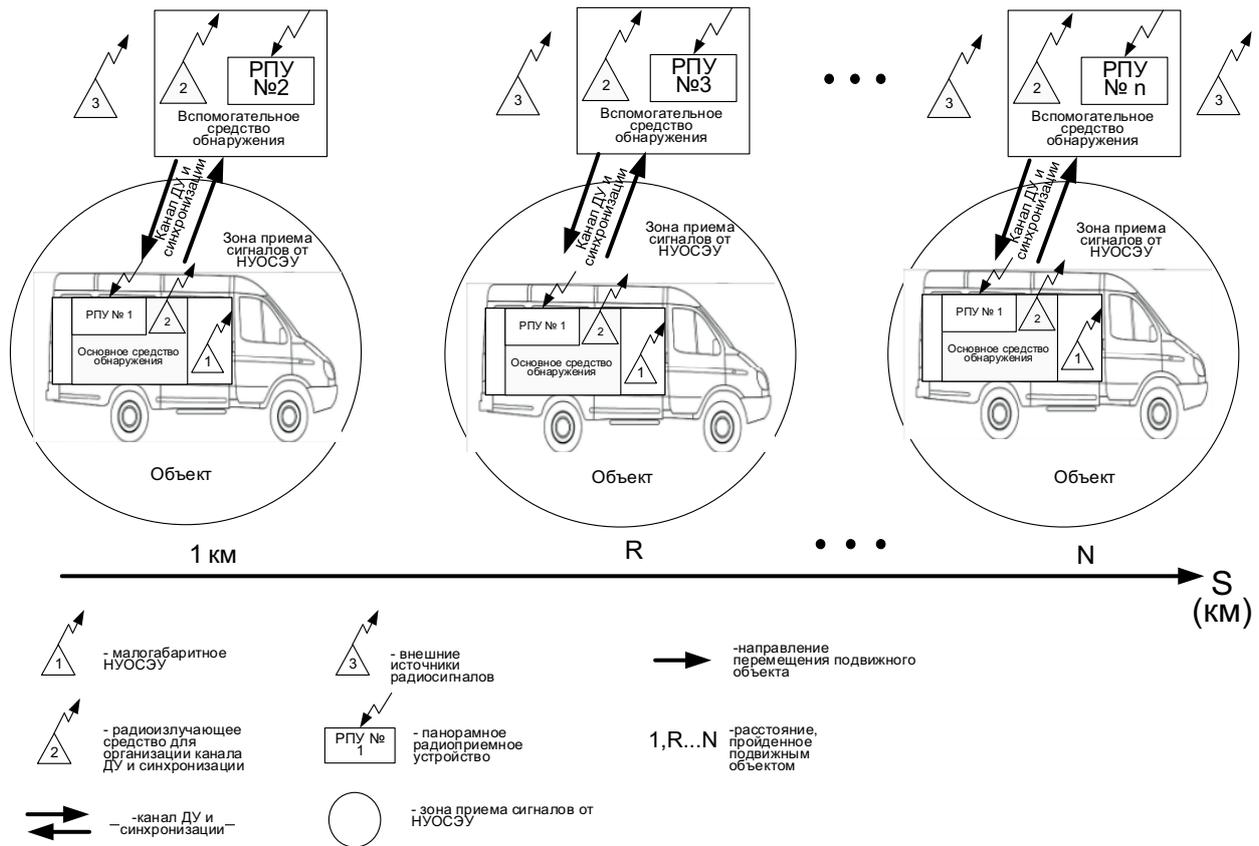


Рис. 4. Обобщенная блок-схема практической реализации алгоритма динамического обнаружения не санкционированно установленных на ОИ СТС

**Библиографический список**

1. Патент № 2392746. Алисевич Е. А., Ерышов В. Г., Милая И. В. Способ обнаружения не санкционированно установленных на объекте электронных устройств. 20.06.2010.
2. Патент № 2397501. Алисевич Е. А. Алашеев В. В., Ерышов В. Г., Ровчак Ю. М. Способ обнаруже-

ния не санкционированно установленных на объекте электронных устройств. 20.08.2010.

3. Гречишников Е. В., Ерышов В. Г., Панкин А. А. Способ обнаружения специальных электронных устройств на объектах связи // Телекоммуникации. 2011. Вып. 7.

УДК 621.391

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-180-185

**М. Н. Исаева\***

ассистент

**А. А. Овчинников\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОШИБОК ПРИ ИТЕРАТИВНОМ ДЕКОДИРОВАНИИ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ

Рассматриваются вероятностные характеристики сообщений при передаче их по каналам связи и декодировании итеративным способом с разным количеством итераций. Рассматриваются низкоплотностные LDPC-коды, на которые накладываются ошибки, затем строится график их распределения, позволяющий оценить распределение ошибок в зависимости от количества итераций декодирования или алгоритма декодирования.

**Ключевые слова:** низкоплотностные коды, кодирование, итеративный декодер.

**M. N. Isaeva\***

Assistant

**A. A. Ovchinnikov\***

PhD Sc. Tech., Assistant Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## THE DISTRIBUTION OF ERRORS IN ITERATIVE DECODING OF LOW-DENSITY CODES

In this paper discusses the probabilistic characteristics of messages when they are transmitted over communication channels and decoded in an iterative way with a different number of iterations. Low-density LDPC codes that are overlaid with errors are considered, then a graph of the distribution of these errors is constructed, this allows to estimate the distribution of errors depending on the number of decoding iterations or the decoding algorithm.

**Keywords:** low density codes, coding, iterative decoder.

### Введение

На сегодняшний день активно используются различные стандарты мобильной связи: 3G, 4G, 5G, актуальна разработка систем умного дома и интернета вещей. Большой поток информации передается по каналам связи, в которых могут возникать различные помехи. Для борьбы с ними прибегают к помехоустойчивым кодам. Для этого в современных и перспективных стандартах используются низкоплотностные коды, которые обеспечивают низкую вероятность ошибки при малых сложностях кодирования и декодирования.

Для данных кодов применяются итеративные посимвольные декодеры, которые обеспечивают малую вероятность ошибки, но в отличие от классических подходов к задаче декодирования, способность этих декодеров исправлять ошибки проверяется с помощью моделирова-

ния, исходя из чего актуальной задачей является анализ работы этих декодеров.

### Декодирование низкоплотностных кодов в дискретных каналах

LDPC-коды (*low-density parity-check code*), низкоплотностные коды (коды с малой плотностью проверок на четность) были предложены Р. Галлагером в 1962 году [1]. Данные коды задаются проверочной матрицей  $H$ , которая содержит в себе малое количество единиц (для двоичных кодов). Обычно данные коды задаются с помощью блочно-перестановочной конструкции, в частности, такие конструкции используются в стандарте 802.11 (Wi-Fi). Также, чтобы задать код, может быть использован граф Таннера, для которого проверочная матрица представляет собой матрицу инциденций.

Передача информации может осуществляться по дискретному каналу связи и непрерывному. Первый представляет собой двоично-симметричный канал (ДСК), в котором задана определенная вероятность  $p$ . В зависимости от ней каждый символ искажается или не искажается. Таким образом, принятое слово может быть смоделировано:  $b=a+e$ , где  $a$  – исходное слово;  $e$  – вектор ошибки.

Для кодов существует такое понятие, как минимальное расстояние  $d_0$ , где  $d_0=2t+1$ , где  $t$  – число ошибок. Соответственно, задача декодирования может быть рассмотрена как декодирование по минимуму расстояния – нахождение кодового слова, ближайшего к  $b$ , в какой-либо метрике (например, метрике Хэмминга):

$$\hat{a} = \arg \min_a d_H(b, a).$$

Стоит отметить, что для LDPC-кодов минимальное расстояние  $d_0$  мало.

Для классических кодов рассматривается декодирование в сфере:  $W(e) \leq t$ , существуют полиномиальные процедуры декодирования циклических кодов (БЧХ, Рида-Соломона), но если  $W(e) > t$ , то эти декодеры ошибаются либо приводят к отказу от декодирования.

Для декодирования LDPC-кодов [2] в дискретном канале используются итеративные по-символьные декодеры, для «жестких» каналов чаще всего используется алгоритм инвертирования бит – Bit Flip. При декодировании с помощью данного алгоритма необходимо выполнить следующие действия:

1. Вычислить синдром  $S = bH^T$  (в поле  $GF(2)$ ), где  $b$  – последовательность на выходе канала. Если синдром  $S = 0$ , то  $b$  является кодовым словом, выполняется выход из алгоритма.

2. Вычислить вектор  $f = SH$  (в кольце целых чисел). Вектор  $f$  представляет собой последовательность, где для каждого элемента последовательности  $b$ , посчитано количество общих ненулевых позиций между  $S$  и соответствующим столбцом матрицы  $H$ .

3. Найти элементы вектора  $f$ , которые являются наибольшими, инвертировать соответствующие элементы в последовательности  $b$ .

Данный алгоритм не принимает решения о кодовом слове, а принимает решение об отдельных символах, при этом возможна ситуация, когда кодовое слово не получено, но число ошибок уменьшилось, по сравнению с тем, как было на выходе канала. Несмотря на то, что  $d_0$  для LDPC мало, итеративный декодер позволяет достичь малой вероятности ошибки на бит, так и вероятности ошибки на слово. Но актуальной

является задача анализа этих декодеров, для лучшего понимания происходящих в них процессов. В частности, интерес представляет оценка изменения среднего количества ошибок после каждой итерации декодирования, а также разброс (дисперсия) этих ошибок [3].

### Декодирование низкоплотностных кодов в полунепрерывных каналах

Модель дискретного канала очень простая, поэтому позволяет проводить более простой анализ. Однако в реальности передача информации лучше описывается полунепрерывными каналами, например, каналом с АБГШ (аддитивным белым гауссовским шумом)  $y = x + \eta$ , где  $x \in \pm 1$  (для BPSK),  $\eta \in N(0, \sigma^2)$  – нормально распределенная случайная величина.

Для исправления ошибок в таких каналах Галлагером был предложен алгоритм распространения доверия (*Belief propagation или sum-product algorithm*), который основан на графе Таннера. Ниже представлено описание данного алгоритма.

1. На первом шаге происходит инициализация, при которой необходимо приписать каждой символьной вершине  $j$  графа Таннера величину  $L_j$ , равную логарифму отношения правдоподобия  $j$ -го символа. Кроме того, установить  $L_{i \rightarrow j} = L_j$  для всех ненулевых элементов  $h_{ij}$  проверочной матрицы  $H$ , то есть для всех  $i, j$ , для которых  $h_{ij} = 1$ .

2. На «горизонтальной» фазе для всех ребер графа Таннера  $i \rightarrow j$  вычисляется:

$$L_{i \rightarrow j} = 2 \tanh^{-1} \left( \prod_{j' \in N(i) \setminus \{j\}} \tanh \left( \frac{1}{2} L_{j' \rightarrow i} \right) \right).$$

3. На «вертикальной» фазе для всех ребер графа Таннера  $j \rightarrow i$  вычислить

$$L_{j \rightarrow i} = L_j + \sum_{i' \in N(j) \setminus \{i\}} L_{i' \rightarrow j}.$$

4. Обновление надежности. Для всех символьных вершин  $j = 0, n-1$  вычислить

$$L_j = L_j + \sum_{i \in N(j)} L_{i \rightarrow j}.$$

5. Критерий остановки. Для всех символьных вершин  $j = 0, n-1$  принять «жесткое» решение, исходя из знака величин  $L_j$ . Если для полученного в результате двоичного вектора  $\hat{a}$  вы-

полняется  $\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{0}$  или достигнут лимит количества итераций, алгоритм возвращает  $\hat{\mathbf{a}}$ , в противном случае вернуться к шагу 2.

Данный декодер также итеративный и посимвольный, обеспечивает меньшую вероятность ошибки, чем «жесткие» декодеры (Bit Flip), но обладает схожей природой. Поэтому возникают аналогичные задачи анализа вероятностных характеристик входа и выхода данного декодера.

### Результаты моделирования

Для оценки вероятностных характеристик было проведено моделирование в канале ДСК. Был выбран (1524,762)-код из стандарта Wi-Fi с помощью программы Matlab.

На вход подается нулевое кодовое слово  $b$ , на которое при передаче по каналу накладывается фиксированное количество ошибок  $t$  (в зависимости от  $t$  изменяется вероятность ошибки  $p$  в ДСК и  $SNR$  при передаче по каналу с АБГШ). Таким образом, было проведено  $N = 100\,000$  экспериментов.

Для начала сравним выход из канала и графики распределения ошибок после итераций декодирования (рис. 1). При таком входном числе ошибок среднее уменьшается, то есть декодер приближает принятое слово к переданному.

Рассмотрим ситуацию передачи по каналу с плохими условиями. В таком канале среднее количество ошибок начинает увеличиваться, декодирование не становится правильным.

При малом количестве ошибок среднее количество ошибок начинает уменьшаться, при большем количестве ошибок среднее увеличивается. Возможно найти такое число ошибок, при котором среднее количество ошибок при разном количестве итераций не изменяется.

Проведем три этапа декодирования по одной итерации, когда на каждом последующем этапе, кроме первого, на вход подается фиксированное количество ошибок, вычисленное как среднее число ошибок на выходе предыдущего этапа, а также проведем отдельное декодирование с тремя итерациями.

Если делать три итерации, то реальный выход получается хуже, чем если проводить раз-

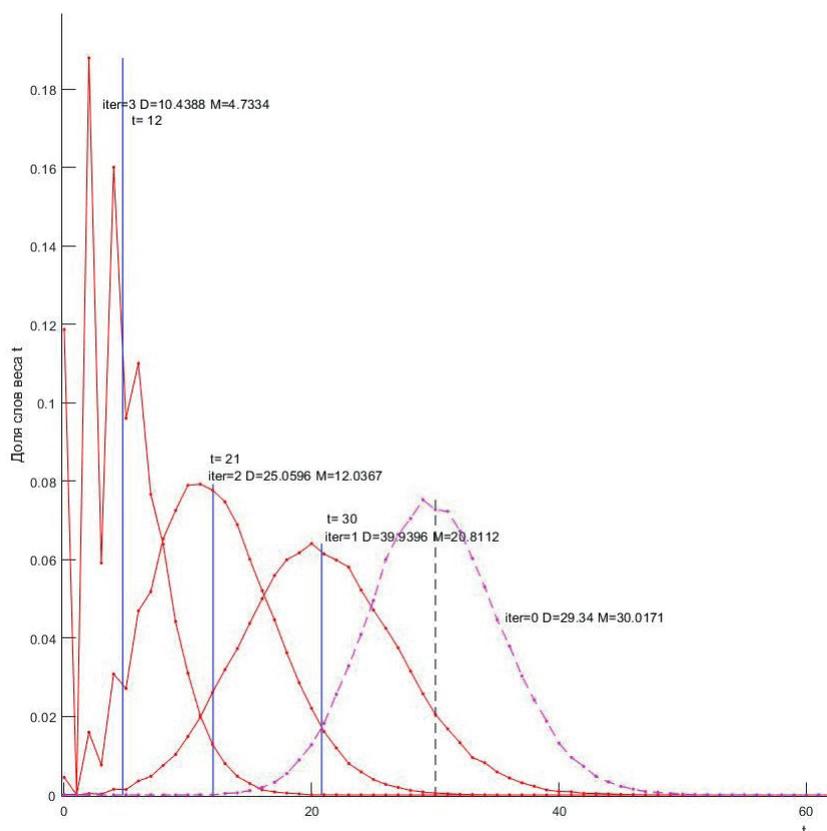


Рис. 1. Выход из канала ( $iter = 0, t = 30$ ) и распределение ошибок в словах после 1, 2 и 3 этапа декодирования с помощью Bit Flip (число ошибок  $t_1 = 30, t_2 = 21, t_3 = 12$ )

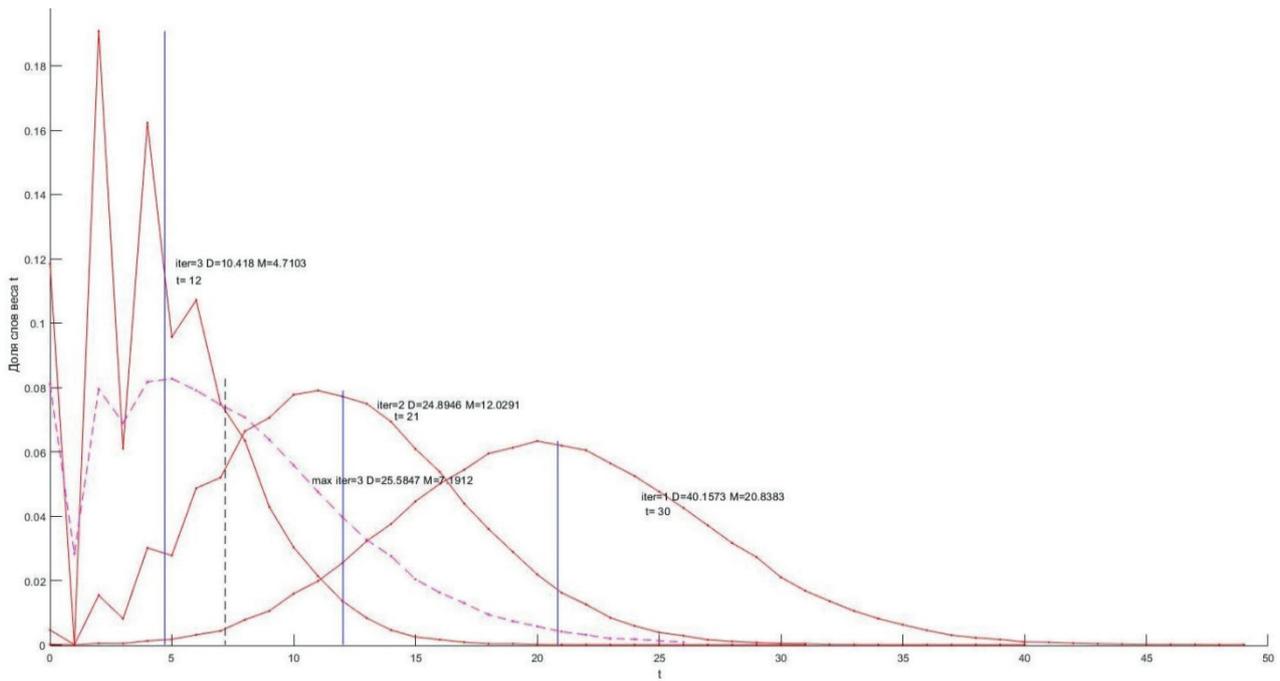


Рис. 2. Распределение ошибок при трех итерациях и зафиксированном числе ошибок  $t = 30$  и графики распределения ошибок в словах после 1, 2 и 3 этапа декодирования с помощью Bit Flip (число ошибок  $t_1 = 30, t_2 = 21, t_3 = 12$ )

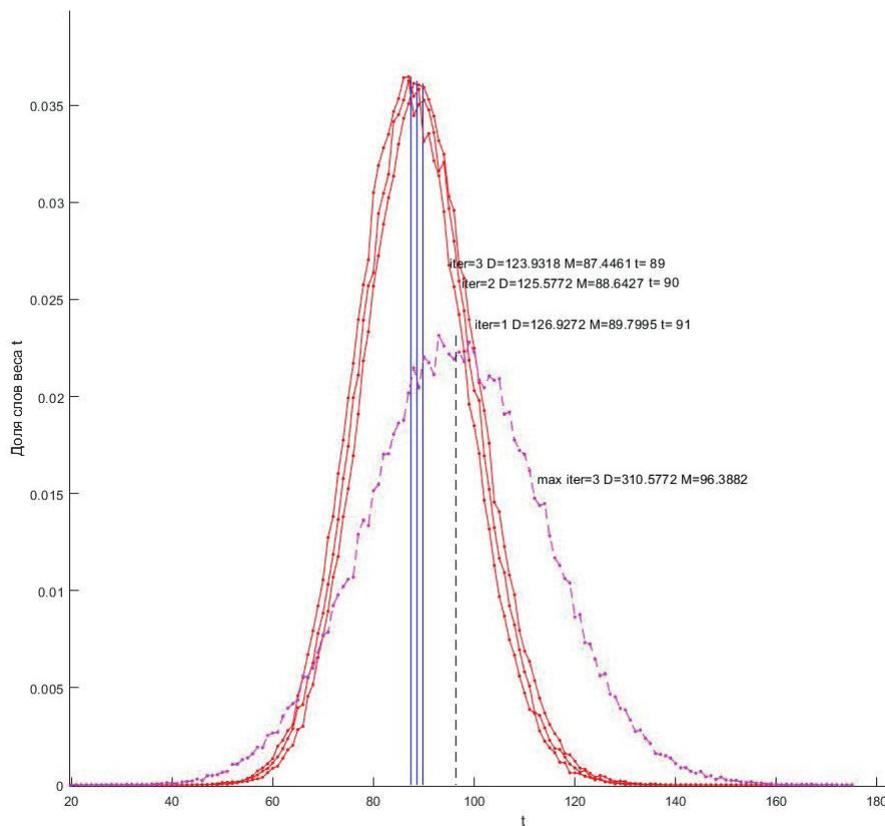


Рис. 3. Распределение ошибок при трех итерациях и зафиксированном числе ошибок  $t = 91$  и графики распределения ошибок в словах после 1, 2 и 3 этапа декодирования с помощью Bit Flip (число ошибок  $t_1 = 91, t_2 = 90, t_3 = 89$ )

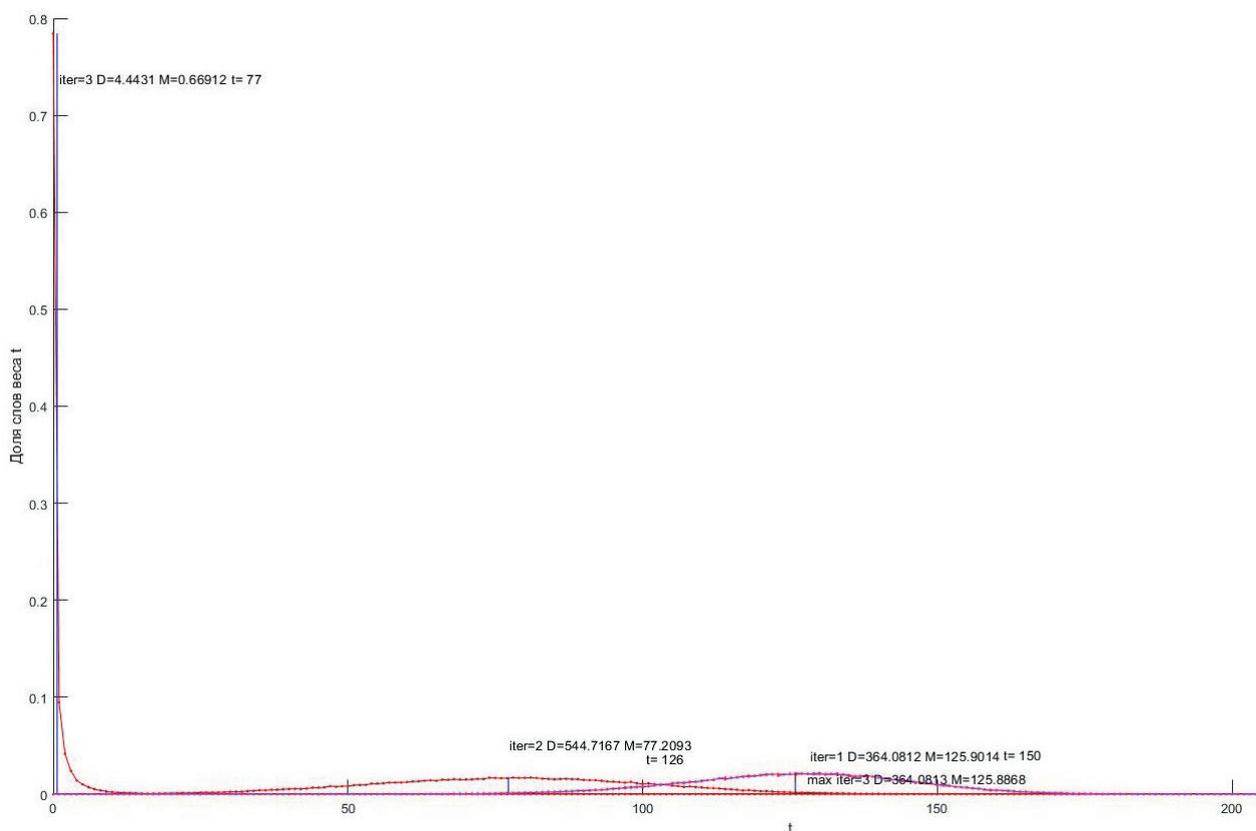


Рис. 4. Выход из канала ( $iter = 0, t = 150$ ) и распределение ошибок в словах после 1, 2 и 3 этапа декодирования с помощью Belief propagation (число ошибок  $t_1 = 150, t_2 = 126, t_3 = 77$ )

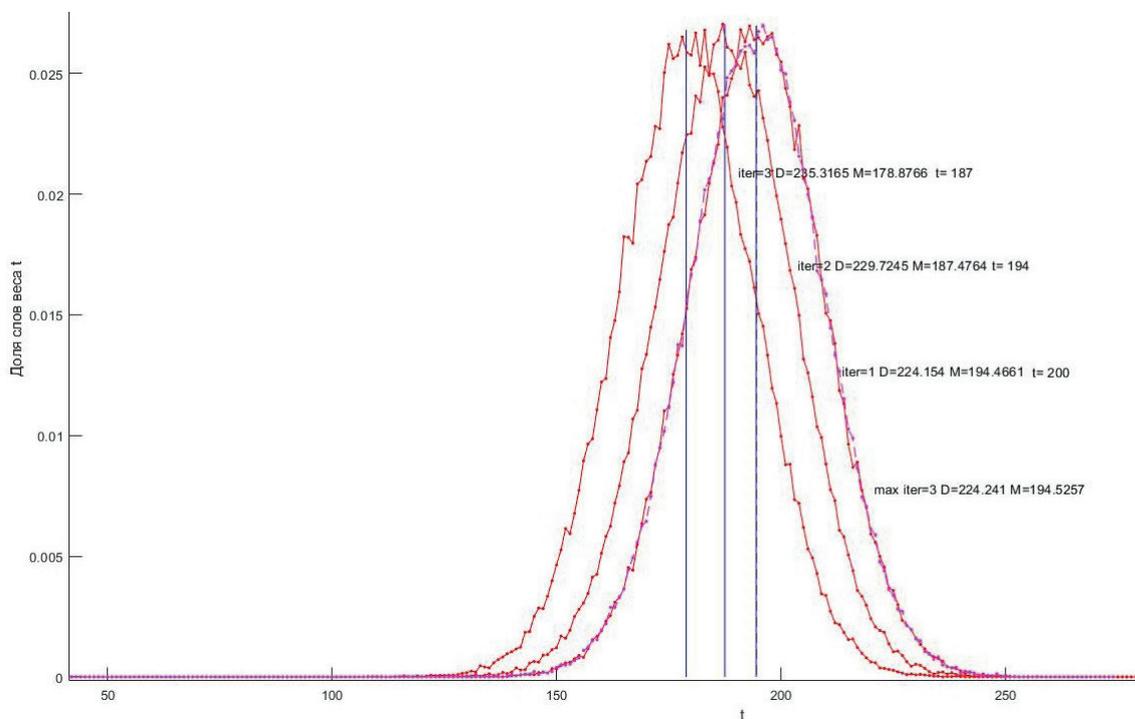


Рис. 5. Распределение ошибок при трех итерациях и зафиксированном числе ошибок  $t = 200$  и графики распределения ошибок в словах после 1, 2 и 3 этапа декодирования с помощью Belief propagation (число ошибок  $t_1 = 200, t_2 = 194, t_3 = 187$ )

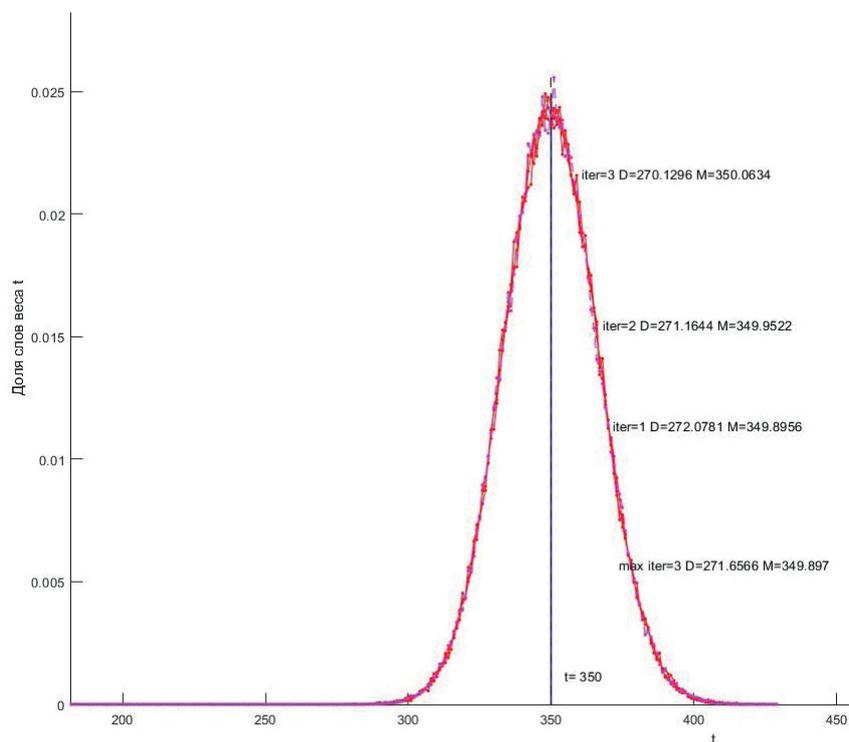


Рис. 6. Распределение ошибок при трех итерациях и зафиксированном числе ошибок  $t = 350$  и графики распределения ошибок в словах после 1, 2 и 3 этапа декодирования с помощью Belief propagation (число ошибок  $t_1 = 350$ ,  $t_2 = 350$ ,  $t_3 = 350$ )

дельный анализ только с учетом среднего числа ошибок на предыдущей итерации.

На рис. 3 среднее число ошибок не уменьшается, но при реальном декодировании ошибки «размножаются».

Для декодера Belief propagation получается аналогичная картина, как и для Bit Flip. Однако, как можно заметить из рис. 5, графики для первого этапа при отдельном декодировании и для трех итераций декодирования накладываются друг на друга. Также можно подобрать такое число ошибок, при котором все этапы отдельного декодирования дают одинаковый результат с тремя итерациями декодирования (рис. 6).

## Заключение

В данной статье было рассмотрено распределение ошибок при итеративном декодировании разными способами, проведено моделирование передачи кодовых слов по ДСК и каналу с АБГШ. Полученные результаты могут быть использованы для анализа и улучшения работы итеративных декодеров.

## Библиографический список

1. Gallager R. Low-Density Parity-Check Codes // IRE Transactions on Information Theory. Jan. 1962. Vol. 8. N 1. P. 21–28.
2. Gallager R. Low Density Parity Check Codes. Cambridge, MA: MIT Press, 1963. 90 p.
3. Lin S., Ryan W. Channel Codes: Classical and Modern. Cambridge University Press, 2009. 710 p.

УДК 004.056

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-186-189

**В. С. Коломойцев\***

кандидат технических наук, доцент

**К. Р. Коломойцева\*\***

магистр

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

\*\*Университет ИТМО

## МЕТОД ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СЦЕНАРИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Предложен метод подтверждения сценария работы системы защиты информации. Он основывается на вычислении хэш-сумм после прохождения данными каждого требуемого элемента защиты, используя уникальный идентификатор, присвоенный каждому элементу защиты. После получения данных на конечном узле проводится повторный расчет хэш-суммы всего маршрута следования данных по автоматизированной системе, что позволяет подтвердить или опровергнуть правильность выполнения сценария обеспечения информационной безопасности для конкретного оконечного узла системы.

**Ключевые слова:** вычислительная система, система защиты информации, методы защиты информации, межсетевое экранирование, контроль эффективности работы.

**V. S. Kolomoitcev\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

**K. R. Kolomoitseva\*\***

Master

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

\*\*ITMO University

## A METHOD FOR CONFIRMING THE PATTERN OF INFORMATION SECURITY SYSTEM FUNCTIONING

The paper suggests a method for confirming the pattern of information security system functioning. The method is based on calculating hash sums after the data passes through each required security element. A unique identifier is used for this purpose, assigned to each security element. Re-calculation of the hash sum of the entire data route for the automated system is performed after receiving data at the end-node. This allows you to confirm or deny the correctness of the information security pattern for a particular end node of the system.

**Keywords:** computing system, information security system, ways of information protection, firewall protection, effectiveness monitoring.

Современные автоматизированные системы имеют сложную архитектуру, выполняют большое количество задач разного вида и рода и, как следствие, подвержены различным видам угроз информационной безопасности. Перед тем как информация (набор данных) попадет на требуемый узел автоматизированной системы, она должна пройти через некоторый набор средств и мер по защите информации, которые используются в рамках построенной системы защиты информации. От того, в какой последовательности будут использованы методы по защите информации и какие средства или меры были использованы вообще, зависит степень безопасности данных, получаемых оконечным узлом системы (в них отсутствуют какие-либо угрозы информационной безопасности) [1].

Помимо широко известных угроз информационной безопасности, которым подвержены автоматизированные системы (не санкционированный доступ, кража/порча информации и т. д.), существуют не менее значимые и опасные угрозы, напрямую зависящие от квалификации нарушителя информационной безопасности – угрозы обхода (игнорирования) применяемых в системе решений по защите информации [2], [3]. Если нарушителю удастся реализовать такие угрозы, то даже несмотря на применение наиболее совершенных и современных средств и мер по защите информации их эффективность сведется к минимуму. Таким образом, при построении эффективной системы защиты информации необходимо не только использовать наиболее эффективные решения в области защиты

информации (с точки зрения вносимых задержек обслуживания, надежности, обеспечиваемого уровня информационной безопасности и т. д.), но и осуществлять контроль над тем, что данные решения действительно применяются при работе системы защиты информации.

При построении современных систем защиты информации наиболее часто используют одну из следующих двух схем – «Прямое соединение» или «Связующий узел».

Схема построения «Прямое соединение» представляет собой последовательное подключение всех узлов автоматизированной системы между собой (оконечных узлов, коммутирующего оборудования, средств защиты и т. д.). Такой подход позволяет наиболее быстро и просто осуществить взаимное подключение всех элементов автоматизированной системы без какого-либо специализированного оборудования и создать многоярусную систему защиты информации. Схема «Прямое соединение» представлена на рис. 1, где *C-1, C-2, ... C-n* – порядковый номер элемента защиты.

Схема построения «Связующий узел» имеет более сложную структуру, чем схема «Прямое соединение», однако в последнее время находит все большее распространение [4]. В отличие от предыдущей схемы, в данном случае осуществляется взаимная коммутация не всех элементов системы между собой, а внешних информационных ресурсов с вычислительной системой (связующим узлом), на которой располагаются все (или большая часть) средств защиты информации и этой вычислительной системы с оконечными узлами автоматизированной системы. Связующих узлов (в зависимости от сложности автоматизированной системы) может быть несколько, и они могут использоваться как параллельно, так и последовательно (тем самым используя разные средства и меры по защите информации). Также внешние ресурсы и связующий узел могут быть разделены специализированным аппаратно-программным средством защиты информации. Схема «Связующий узел» представлена на рис. 2.

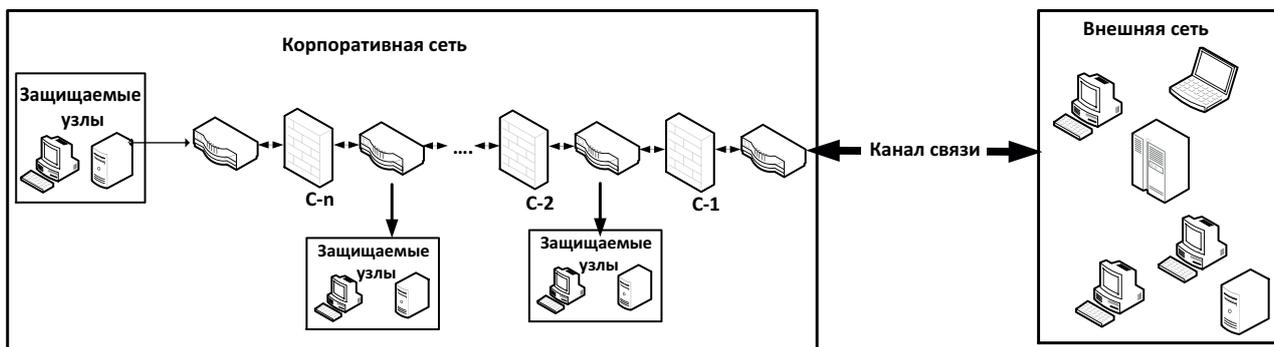


Рис. 1. Построение системы защиты информации по схеме «Прямое соединение»

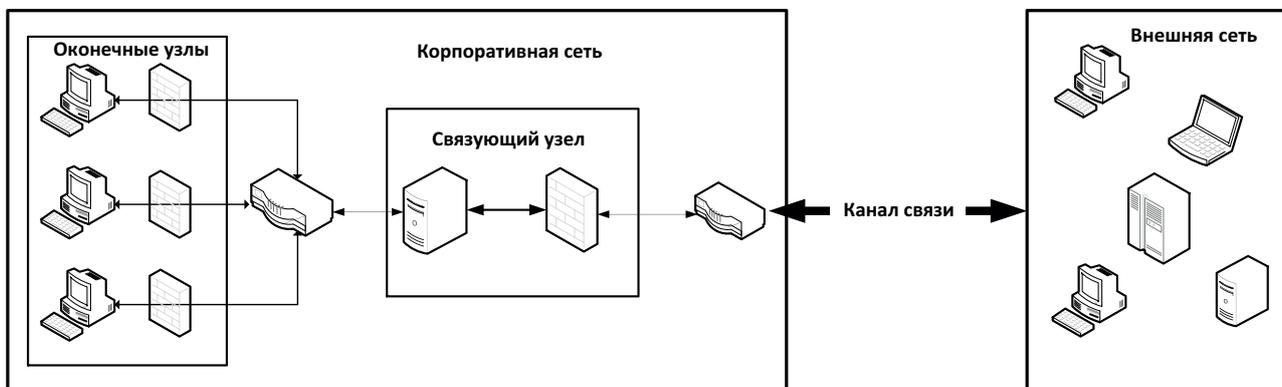


Рис. 2. Построение системы защиты информации по схеме «Связующий узел»

Для того чтобы владелец автоматизированной системы мог быть уверен, что все средства и меры защиты информации, которыми располагает система защиты информации, используются ей корректно и строго по тому сценарию, который заявлен для каждого защищаемого оконечного узла системы, необходимо разработать и в дальнейшем применять метод «подтверждения» используемых элементов защиты. Предложим, такой метод контроля над корректностью выполнения требуемого сценария работы системы защиты информации основывается на широко известных и используемых криптографических методах, а именно хэш-функций с ключом.

Алгоритм применения метода выглядит следующим образом:

1) на первом этапе данные при попадании в автоматизированную систему из внешней сети обрабатываются элементом системы защиты информации, располагающимся на первом эшелоне безопасности системы защиты информации (например, межсетевой экран). После выполнения всех требуемых процедур и задач (в вопросе информационной безопасности) по полученным данным вычисляется хэш-функция с ключом, в роли которого выступает идентификатор средства защиты (например, серийный номер, порядковый номер элемента защиты, специальное код-слово и т. д.). Данные вместе с рассчитанной хэш-суммой передаются на следующий элемент защиты информации;

2) после того как данные прошли второй элемент защиты информации системы, производится повторное вычисление хэш-функции. Однако в этом случае в роли исходных данных для хэш-функции выступает хэш-сумма, полученная на предыдущем шаге, а в роли ключа – аналогичный идентификатор, но уже конкретного элемента системы защиты информации;

3) шаг два повторяется до тех пор, пока данные не пройдут все требуемые для конкретного оконечного узла проверки (элементы защиты информации);

4) после прохождения всех необходимых элементов защиты информации данные попадают на оконечный узел системы, имеющий информацию об идентификаторах элементов защиты (и порядке их применения), которые должны были быть применены по отношению к полученным данным. Он производит вычисление хэш-функции по исходным данным и в случае совпадения принимает их. В противном случае системе защиты информации отправляется сообщение о том, что полученные данные не прошли

требуемые проверки на наличие угроз информационной безопасности (или проверка проведена не в требуемом порядке, или они были повреждены (искажены) в ходе проверки) и, таким образом, необходимо их обработать (системой защиты информации) повторно.

Заметим, что не в каждом современном средстве защиты информации может быть реализован модуль вычисления хэш-функции. Таким образом, более приемлемой схемой для реализации этого метода является схема «Связующий узел», поскольку используемые в системе защиты информации средства и меры защиты реализованы на базе связующего узла и можно вызвать модуль вычисления хэш-функции, установленный в нем, что не составит особой сложности. Более того, так как в типовом варианте схемы построения «Связующий узел» все элементы защиты (кроме локальных – предназначенных и настроенных строго для оконечного узла системы) располагаются на связующем узле, то в качестве первого (и, вероятно, единственного) эшелона безопасности системы будет выступать сам связующий узел.

В ином случае при использовании схемы «Прямое соединение» после прохождения каждого из элементов защиты системы можно вызывать отдельное средство (элемент системы), осуществляющее вычисление хэш-функций, которое будет получать данные о том, какое средство защиты информации закончило свою работу и над какими данными [5]. Однако в этом случае существует опасность того, что злоумышленник может перехватить такой запрос и подделать его. Необходимо, чтобы указанное средство было подключено ко всем элементам защиты системы защиты информации и осуществляло контроль над работой данных элементов защиты [1].

Одним из вероятных способов совершенствования подобного метода может стать использование вместо алгоритмов хэширования алгоритмов ассиметричного шифрования, что, например, позволит осуществлять подтверждение выполнения более сложных сценариев работы системы защиты информации и точнее оценивать, какой из элементов системы работает некорректно [6].

#### Библиографический список

1. Коломойцев В. С. Построение эшелонированных систем защиты информации // Обработка, передача и защита информации в компьютерных систе-

мах: Первая Всерос. науч. конф. (СПб., 14–22 апреля 2020 г.). 2020. С. 190–192.

2. Рытов М. Ю., Горлов А. П., Лысов Д. А. Автоматизация процесса оценки эффективности комплексных систем защиты информации промышленных предприятий при одновременной реализации угроз // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 4 (52). С. 199–206.

3. Дроботун Е. Б., Цветков О. В. Построение модели угроз информационной безопасности в автоматизированной системе управления критически важными объектами на основе сценариев действия нарушителя // Программные продукты и системы. 2016. № 3 (29). С. 42–50.

4. Kolomoitcev V. Effectiveness of Options for Designing a Pattern of Secure Access 'Connecting Node'.

2020. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2020. P. 1–5.

5. Михайлюк Т. Е., Жернаков С. В. К вопросу об аппаратной реализации модуля потокового шифрования для комплексной системы защиты информации // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. № 4 (70). С. 138–148.

6. Иванов Ю. С. Программная реализация метода асимметричного шифрования // Вестник научного общества студентов, аспирантов и молодых ученых. 2014. № 1. С. 145–154.

УДК 004.49

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-190-194

**И. Д. Попов\***

ассистент

**В. В. Комашинский\***

кандидат технических наук, доцент

*\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СЕТЕВЫХ АТАК НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА

*Приведено обоснование необходимости использования нейросетевых методов в области обнаружения сетевых атак. Построена модель системы обнаружения сетевых атак на основе многослойного перцептрона. Приведены результаты применения данного метода.*

**Ключевые слова:** информационная безопасность, система обнаружения атак, многослойный перцептрон.

**I. D. Popov\***

Assistant

**V. V. Komashinsky\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

*\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

## RESEARCH OF THE NEURAL NETWORK METHOD APPLICATION FOR DETECTING NETWORK ATTACKS BASED ON THE MULTILAYER PERCEPTRON

*The substantiation of the necessity of using neural network methods in the field of network attacks detection is given. A model of a network attack detection system based on a multilayer perceptron is built. The results of the application of this method are presented.*

**Keywords:** information security, intrusion detection system, neural network, multilayer perceptron.

### Введение

В настоящее время в области обнаружения сетевых атак большое распространение получили системы обнаружения атак (СОА или IDS), в основном использующие сигнатурный метод. Использование данного метода не позволяет обнаруживать атаки с неизвестной сигнатурой. В отчете лаборатории Касперского [1] представлен обзор наиболее популярных угроз в сети, среди которых есть те, которые нельзя обнаружить сигнатурным методом.

Популярным решением в задачах классификации является использование методов искусственного интеллекта (ИИ), например, искусственная нейронная сеть (ИНС). Необходимость методов, основанных на применении ИНС, подтверждается Целевой программой [2], утвержденной Президентом в 2019 году. Преимущество таких методов в том, что они позволяют обнаруживать скрытые зависимости внутри данных.

Этот подход имеет ряд проблем, таких как выбор типа ИНС, ее параметров, данные для обучения и тестирования.

При работе с ИНС часто используются специальные наборы данных, так называемые датасеты. В области обнаружения сетевых атак также существуют такие выборки (KDD CUP '99 [3], NSL-KDD [4] и KYOTO 2006+ [5]), но большим недостатком наиболее популярных и проверенных наборов является то, что они созданы искусственно. Также данные в этих наборах имеют определенный формат, включающий в себя ограниченный перечень параметров исходных данных. Результаты существующих исследований [6]–[9] показывают эффективность обнаружения от 85 до 98 %, используя при этом данные из указанных ранее «датасетов».

В большинстве исследований архитектура ИНС подбирается вручную, что является трудоемким процессом. Чтобы упростить задачу,

можно использовать специальные программные средства, например Keras Tuner (библиотека для Python). Она позволяет автоматически подбирать гиперпараметры ИНС (например, количество слоев, размеры слоев, функции активации нейронов и т. д.).

Таким образом, задачей является построение модели системы обнаружения сетевых атак на основе многослойного персептрона, способной анализировать сетевой трафик «как есть» (т. е. без преобразования в специальный формат) на наличие сетевых атак.

**Построение модели многослойного персептрона для анализа сетевого трафика**

В работе используется классический многослойный персептрон [10]. Этот тип в настоящее время является наиболее универсальным и хорошо изученным [11], [12].

Входной слой ИНС должен иметь 1500 нейронов, так как чаще всего размер передаваемого кадра (MTU) не превышает 1500 байт. На рис. 1 показана примерная модель ИНС, на которой указаны известные параметры. Размер выходного слоя определяется количеством обнаруживаемых сетевых атак.

Для эффективной работы ИНС входные данные (в виде сетевого трафика) необходимо нормализовать:

$$y = \frac{(x - x_{\min})(b - a)}{x_{\max} - x_{\min}} + a, \tag{1}$$

где:  $y$  – нормализованное значение  $x$ ;  $x$  – нормализуемое значение (в данном случае байт данных);  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  – минимальное и максимальное значения интервала нормализуемого значения соответственно;  $a$  и  $b$  – минимальное и мак-

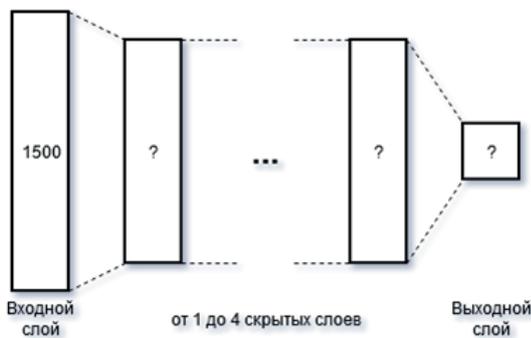


Рис. 1. Модель многослойного персептрона

симальное значения интервала нормализованного значения соответственно.

Исходные данные – поток байт с интервалом допустимых значений [0; 255]. Интервал, к которому приводятся значения, – [0; 1]. Подставив эти значения в (1), получим:

$$y = \frac{(x - 0)(1 - 0)}{255 - 0} + 0 = \frac{x}{255}. \tag{2}$$

Таким образом, каждое значение байта в потоке трафика необходимо разделить на его максимальное значение, то есть на 255.

Используемые обычно «датасеты» уже содержат в себе информацию об атаках в виде меток, которые обозначают тип атаки. В работе исходные данные представлены в виде рсар-файлов, полученные путем захвата сетевого трафика с помощью специальных программ, поэтому никаких меток об атаках в них не содержится. Для каждого сетевого пакета или рсар-файла можно вручную назначить такую метку, сформировав тем самым таблицу, в которой каждому пакету или файлу будет соответствовать определенная метка с типом атаки. Результат работы СОА также отображается в виде таблицы с названием проанализированного файла и типом предполагаемой атаки, которая в нем обнаружена.

**Алгоритм применения модели для анализа сетевого трафика**

На рис. 2 показан алгоритм применения СОА. Процесс начинается с формирования обучающей выборки ИНС. Входящий сетевой трафик на основе списка выбранных атак формирует «датасет». На основе полученной выборки и выбранного множества допустимых гиперпараметров ИНС с помощью библиотек TensorFlow и Keras Tuner выполняется поиск подходящей модели ИНС. После того как она найдена, необходимо обучить ее. Обученная модель готова анализировать другие предварительно нормализованные данные, выдавая на выходе некоторые предсказания. Используя стандартные общеизвестные параметры протоколов, можно откорректировать полученные предсказания, получив итоговый результат. Процедура поиска оптимальной модели запущена несколько раз – для разного количества скрытых слоев, то есть для разного количества скрытых слоев выполнялся поиск подходящей модели.

Оценка эффективности обнаружения производилась по двум параметрам: чувствительность и специфичность.

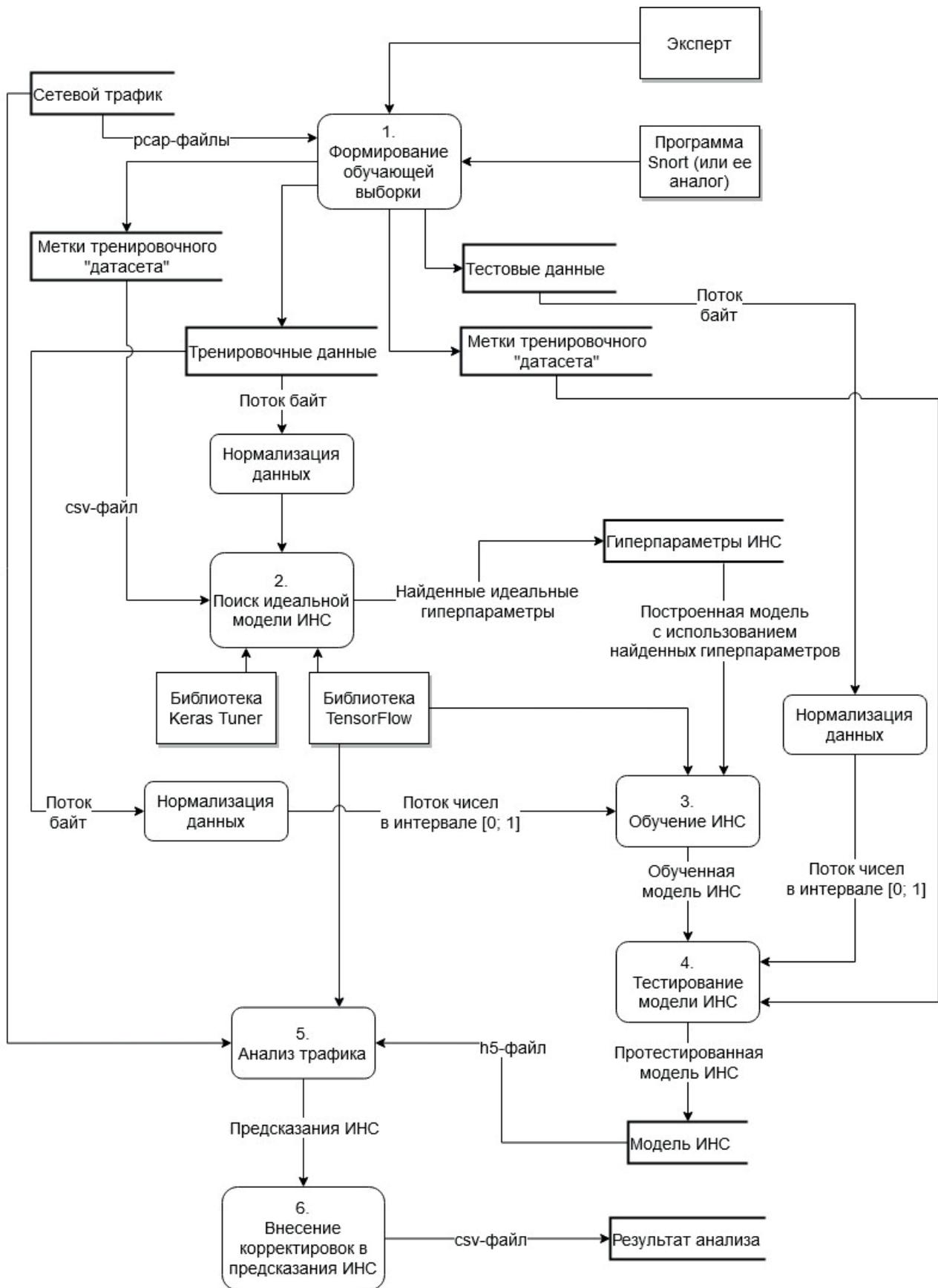


Рис. 2. Алгоритм СОА на основе нейросетевого метода

Чувствительность определяется как

$$Sens = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $N$  – количество сетевых пакетов; TP (*True Positive*) – истинный положительный результат, FN (*False Negative*) – ложный отрицательный результат. Специфичность определяется как

$$Spec = \left( 1 - \frac{N_{FP}}{N_{FP} + N_{TN}} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $N$  – количество сетевых пакетов; FP (*False Positive*) – ложный положительный результат; TN (*True Negative*) – истинный отрицательный результат. Названия использованных терминов можно объяснить следующим образом:

- TP – атака была, и она обнаружена;
- TN – атаки не было, и она не обнаружена;
- FP – атаки не было, но она обнаружена;
- FN – атака была, и она не обнаружена.

### Результаты экспериментов

Эксперименты проведены в виртуальной машине, запущенной в VMware. Характеристики виртуальной машины: OS – Linux Ubuntu, RAM – 8 Гб, CPU – 2 x 8.

В табл. 1 приведены результаты вычисления значений *Sens* и *Spec* для всех найденных подхо-

дящих моделей ИНС, применяя формулы (3) и (4). В эксперименте используется примерно 5000 сетевых пакетов, из них примерно 3500 пакетов содержат угрозу.

Результаты показывают, что все найденные наилучшие модели обнаруживают больше 98 % сетевых атак, при этом большинство из них не вызывают ложных срабатываний. Тем не менее есть модели, которые все же выдают ложные срабатывания.

### Заключение

Классическим методом обнаружения сетевых атак является сигнатурный, но он не способен обнаруживать неизвестные атаки. На данный момент широкое распространение получили методы, основанные на ИНС. Многослойный перцептрон – универсальный хорошо изученный тип ИНС. Во многих исследованиях использованы готовые «датасеты» определенного формата, но в этом исследовании использован сетевой трафик «как есть». Сложность использования метода ИНС заключается в построении ее модели и подборе исходных данных, от чего зависит качество работы алгоритма. Для удобства и простоты работы (построения, обучения и тестирования модели) с ИНС использованы библиотеки TensorFlow и Keras Tuner. Получены несколько моделей ИНС, обладающие следующими показателями обнаружения сетевых атак – не менее 98 % обнаружения и не более 2 % ложных срабатываний.

Таблица 1

Оценка эффективности разных моделей

№	Модели ИНС (указано количество скрытых слоев и их размеры)	Sens, %	Spec, %
1	1 слой: 850	98,7	100
2	1 слой: 900	98,7	100
3	1 слой: 1200	98,7	100
4	1 слой: 1300, 2 слой: 1000	96,3	98,1
5	1 слой: 1400, 2 слой: 400	98,5	100
6	1 слой: 1400, 2 слой: 850	98,5	99,5
7	1 слой: 650, 2 слой: 750, 3 слой: 950	98,7	100
8	1 слой: 1000, 2 слой: 450, 3 слой: 400	98,8	100
9	1 слой: 1350, 2 слой: 400, 3 слой: 200	98,6	99,1

### Библиографический список

1. Ландшафт угроз для систем промышленной автоматизации // Kaspersky Lab ICS CERT. URL: [https://ics-cert.kaspersky.ru/reports/2018/03/26/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-in-h2-2017/#\\_Toc508825260](https://ics-cert.kaspersky.ru/reports/2018/03/26/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-in-h2-2017/#_Toc508825260) (дата обращения: 11.12.2020).
2. Указ Президента Российской Федерации «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» № 490 от 10.10.2019 // КонсультантПлюс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_335184](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184) (дата обращения: 11.12.2020).
3. KDD Cup 1999 Data // UCI KDD Archive. URL: <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html> (дата обращения: 11.12.2020).
4. NSL-KDD dataset // University of New Brunswick. URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/nsl.html> (дата обращения: 11.12.2020).

5. Traffic Data from Kyoto University's Honeypots. URL: [http://www.takakura.com/Kyoto\\_data/](http://www.takakura.com/Kyoto_data/) (дата обращения: 11.12.2020).
6. *Большев А. К., Яновский В. В.* Применение нейронных сетей для обнаружения вторжений в компьютерные сети // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2010. № 10. С. 129–135.
7. *Жигулин П. В., Подворчан Д. Э.* Анализ сетевого трафика с помощью нейронных сетей // Электронные средства и системы управления. 2013. №2. С. 44–48.
8. *Lei J., Ghorbani A.* Improved Competitive Learning Neural Networks for Network Intrusion and Fraud Detection // Neurocomputing. 2012. P. 13–145.
9. *Lei J., Ghorbani A.* Network Intrusion Detection Using an Improved Competitive Learning Neural Network // Proc. of Second Annual Conf. on Communication Networks and Services Research. 2004. P. 190–197.
10. *Розенблатт Ф.* Принципы нейродинамики: Перцептроны и теория механизмов мозга. М.: Мир, 1965. 480 с.
11. Нейронные сети // StatSoft Russia. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stneunet.html> (дата обращения: 11.12.2020).
12. *Новиков А. С., Ежов А. А.* Многослойная нейронная сеть Розенблатта и ее применение для решения задачи распознавания подписей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 2. С. 188–197.

УДК 004.056.055

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-195-196

**В. А. Рындюк\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ВОПРОСЫ УДАЛЕННОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ

Приведено описание алгоритма удаленной аутентификации объектов для незащищенных каналов связи, построенного на базе вероятностной модели криптографических преобразований. Проблема рассмотрена в приложении к изучению дисциплины «Основы информационной безопасности» для бакалавров направления 10.03.01 «Информационная безопасность».

**Ключевые слова:** алгоритм удаленной аутентификация, незащищенный канал связи, криптографическая защита информации, вероятностные модели криптографических преобразований.

**V. A. Ryndyuk\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## REMOTE AUTHENTICATION ISSUES

Description of the algorithm for remote identification of objects for insecure channels based on probabilistic models of cryptographic transformations. The problem is considered in the Appendix to the study of the discipline "Information security basics", for bachelor's direction 10.03.01 "Information security".

**Keywords:** algorithm for the remote authentication, unprotected communication channel, cryptographic protection of information, probabilistic models of cryptographic transformations.

В научной литературе, освещающей вопросы развития информационных технологий, большое внимание уделяется проблемам обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем и сервисов, а также процессов, которые осуществляются с их помощью.

В современных информационных системах часто недостаточно защитить сами хранимые и обрабатываемые данные, необходимо также обеспечить защиту их обмена.

Это может быть гарантировано только в случае, если используются новейшие методы и средства шифрования, которые обеспечат защиту информационной автоматизированной системы от направленных угроз со стороны нарушителя. Эти методы защиты находятся в зависимости от многих субъективных и объективных факторов: от типа угроз для данных, от возможностей нарушителя и т. п.

Поэтому весьма распространенным в настоящее время является электронное взаимодействие между пользователями информационных систем с функцией защищенного обмена информацией. Эту функцию обеспечивает, чаще всего, электронная подпись, которая представляет собой симулятор собственноручной подписи пользователя в электронном документе. Она подтверждает подлинность отправителя какого-ли-

бо сообщения, то есть его аутентичность, а также то, что сообщение не было перехвачено и изменено, то есть его целостность.

С развитием данных технологий на передний план выступает проблема удаленной аутентификации партнеров, передающих конфиденциальную информацию на большие расстояния по незащищенным каналам связи в режиме онлайн.

Иными словами, вопрос может стоять в проблеме защищенной передачи аутентификатора по незащищенным каналам связи через Интернет или локальную сеть. Для защиты подобной информации используют протоколы удаленной аутентификации. Это, например, протокол Kerberos либо ШАН, РАР или другие.

Мы предлагаем в качестве такого протокола использовать многосторонний протокол удаленной аутентификации, построенный на базе вероятностной модели криптопреобразований. Он имеет большие функциональные возможности, что позволяет существенно расширить область его практического применения.

Как известно, при заключении многосторонних договоров, имеющих юридическую силу, в режиме онлайн есть свои нюансы. Во-первых, партнеры по переписке могут находиться на большом расстоянии относительно друг друга, поэтому возникает проблема их взаимной ау-

тентификации [1], [2]. Во-вторых, степень конфиденциальности передаваемой информации может сильно варьироваться.

Поэтому, по нашему мнению, наиболее эффективным способом защиты конфиденциальной информации в этих условиях станет применение алгоритма вероятностной гибридной модели (ГВМ) криптографических преобразований изначального документа [3], [4].

Специфика такого алгоритма – использование разового сеансового ключа симметричных криптопреобразований с целью зашифрования исходного текста. В свою очередь этот ключ будет зашифрован открытым асимметричным ключом получателя. При этом дополнительная генерация секретных ключей не нужна.

Следует отметить, что ГВМ обладает следующей отличительной чертой: если один и тот же документ зашифровывать несколько раз, то с каждым разом получаются разные шифротексты. Этот факт очень важен в борьбе со злоумышленниками-хакерами, стремящимися перехватить и расшифровать информацию.

Для того чтобы зашифровать гамма-шифр вектора инициализации, используем в составе ГВМ асимметричную систему криптопреобразований. В качестве ключа для шифрования возьмем открытый ключ получателя.

После того как к получателю по открытому каналу приходят шифр непосредственно документа и гамма-шифр вектора инициализации, он производит дешифрацию гамма-шифра своим секретным асимметричным ключом, затем, используя этот гамма-шифр, дешифрует сам документ.

Следующим этапом будет создание электронной подписи, которая подтвердит, что доставленный получателю электронный документ не содержит никаких изменений. Основные алгоритмы формирования электронной цифровой подписи описаны в работе [5].

Таким образом, мы рассмотрели ключевые составные части информационной системы, которая обеспечит надежность при передаче конфиденциальной информации в электронном виде, в частности – при заключении договоров, имеющих юридическую силу.

Тем самым решается задача улучшения надежности и криптостойкости процедуры удаленной аутентификации путем применения вероятностной модели криптопреобразований.

### Библиографический список

1. Алгоритм взаимной аутентификации партнеров на базе вероятностной модели криптографических преобразований / В. В. Иванько, В. С. Туманов, В. А. Козлов, В. А. Рындюк // Новая наука как результат инновационного развития общества: сб. статей Международной научно-практической конференции: в 17 ч. 2017. С. 129–135.
2. Модели и методы защиты от атак «man in the middle» (MITM) / В. А. Козлов., В. А. Рындюк, Г. А. Воробьев, А. Б. Чернышев // Современные фундаментальные и прикладные исследования. 2017. № 1 (24). С. 27–35.
3. Probabilistic models of cryptographic systems and their applications / V. A. Ryndjuk, G. A. Vorobyev, V. A. Kozlov, A. M. Makarov // IEEE Electronic Publication Agreement Receipt. The Third International Conference on Digital Information Processing, Data Mining and Wireless Communications (DIPDMWC 2016). July 06-08, 2016. Moscow, Russia. P. 160–163.
4. Воробьев Г. А., Козлов В. А., Рындюк В. А. Peculiarities of cryptographic model of the system of wireless remote control // Advances in intelligent systems and computing ISSN: 2194–5357. Vol. 726. 2019. P. 684–692.
5. Вероятностная модель электронной цифровой подписи / В. А. Козлов, А. Б. Чернышев, В. А. Рындюк, К. О. Бондаренко // Научное обозрение. 2015. № 11. С. 141–146.

УДК 004.728.3.057.4

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-197-200

**П. А. Сединкин\***

магистр

**Н. В. Матвеев\***

старший преподаватель

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## НЕСТАБИЛЬНОСТЬ АЛГОРИТМОВ СЛУЧАЙНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С НИЗКОЙ ЗАДЕРЖКОЙ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПОГАШЕНИЕМ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Рассматриваются модели системы случайного множественного доступа с последовательным погашением интерференции и случайным входным потоком. В рамках такой модели алгоритмы с оперативной доставкой данных являются нестабильными, что в статье показано с помощью имитационного моделирования. Предлагается обоснование невозможности строгого доказательства при использовании некоторых известных подходов.

**Ключевые слова:** случайный множественный доступ, погашение интерференции, стабильность.

**P. A. Sedinkin\***

Master

**N. V. Matveev\***

Senior Lecturer

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## INSTABILITY OF LOW LATENCY RANDOM ACCESS ALGORITHMS WITH SUCCESSIVE INTERFERENCE CANCELLATION

The article is devoted to the system models of random multiple access with successive interference cancellation and a random entrance stream. Instability of this kind of models is shown in this work by using simulation modeling. A substantiation of the impossibility of rigorous proof of instability using some known approaches is proposed.

**Keywords:** massive machine type communication, random multiple access, successive interference cancellation, stabilization.

### Введение

*Massive Machine Type Communication* (mMTC) является одним из ключевых сценариев при реализации сетей 5G. Он отвечает за полностью автоматизированный процесс генерации, изменения, передачи и обработки данных с минимальным участием человека. Одной из технологий, реализующих множественный доступ, является алгоритм ALOHA, представленный в [1]. Однако он не удовлетворяет стандартам, которые приняты в сетях 5G. С развитием сотовых технологий предлагались усовершенствования данного алгоритма, одним из которых является *Coded Slotted ALOHA* (CSA), который значительно увеличил скорость передачи данных в сравнении с предшественником. Но и у него есть недостатки, один из них – высокая задержка доставки сообщения в следствие вынужденного ожидания абонентами фрейма для передачи. Исходя из этого, было

предложено очередное улучшение, которое решило данную задачу и получило название *Frame Asynchronous Coded Slotted ALOHA* (FA-CSA).

Основными целями статьи являются демонстрация преимуществ FA-CSA в сценарии со случайным входным потоком над CSA, а также проверка данного алгоритма на стабильность.

### Модель системы CSA

В работе рассмотрена модель системы из статьи [2], которая получила название Кодовый слотовый алоха (CSA) и базируется на следующих допущениях:

*Допущение 1:* в эту систему входят множество абонентов и базовая станция. У абонентов появляются сообщения для передачи, которые они отправляют, используя общий канал множественного доступа. Базовая станция в свою очередь от-

правляет управляющую информацию всем абонентам, используя широкополосный канал.

*Допущение 2:* все сообщения имеют одинаковую длину, и все время разделено на слоты. Длительность одного слота равна времени передачи одного сообщения. Абонент не может начать передачу сообщения в том слоте, в котором он появился в системе. Каждый абонент отправляет один или несколько экземпляров своего сообщения на интервале, который состоит из  $n$  слотов и называется фреймом. Все абоненты знают точные границы всех слотов и фреймов. Абоненты, вошедшие в систему, могут начать передачу только в следующем фрейме.

*Допущение 3:* количество экземпляров сообщения от абонента выбирается с помощью некоторого алгоритма  $A$  из класса алгоритмов случайного множественного доступа СРА. Этот алгоритм известен всем абонентам. Каждый экземпляр сообщения содержит в себе информацию о том, в каких слотах лежат остальные копии. Благодаря этому базовая станция использует процедуру последовательного погашения интерференции.

*Допущение 4:* в слоте может произойти одна из трех возможных ситуаций:

- 1) успех – слот для передачи выбрал один абонент;
- 2) пусто – в слоте не передавал ни один абонент;
- 3) конфликт – слот выбрали более одного абонента.

*Допущение 5:* количество пришедших в систему абонентов регулируется посредством экспоненциального распределения с входным параметром  $\lambda$ . В случае если абоненты не смогли успешно покинуть систему во время фрейма, их сообщение считается потерянным.

Благодаря тому, что базовая станция использует процедуру погашения интерференции, некоторые конфликты становятся разрешимыми. Следствием этого является увеличение вероятности успешного выхода сообщения из системы. На рис. 1 изображен пример работы процедуры последовательного погашения интерференции (*Successive Interference Cancellation – SIC*).

Размер фрейма равен пяти слотам. Абоненты один, два и три вошли в систему в нулевом, третьем и четвертом слотах соответственно. Они ждут следующий фрейм и выбирают слоты, в которых будут отправлены экземпляры сообщения. Поскольку третий абонент успешно покинул систему из-за копии в девятом слоте, то мы можем избавиться от его копии в пятом слоте, что позволит первому абоненту также успешно покинуть систему. По аналогии ее покинет и второй абонент. Таким образом, на начало ново-

го фрейма у нас будет всего один активный абонент под номером четыре, который вошел в систему на восьмом слоте.

### Особенность работы асинхронной системы

Одним из ключевых недостатков работы CSA является фактор обязательного ожидания наступления нового фрейма для передачи экземпляров сообщения абонентами. По этой причине в работе [3] было предложено усовершенствование алгоритма – Кодовый слотовый алоха без синхронизации по фреймам (FA-CSA). Его основные отличия следующие:

1. Каждый абонент, вошедший в систему, теперь имеет свой собственный фрейм из  $n$  слотов, началом которого является первый доступный для передачи слот.

2. Ранее конфликты могли быть решены исключительно внутри фреймов, которые были синхронизированы у всех абонентов. Здесь же для решения данной задачи появляется новое понятие – «скользящее окно» (*Sliding Window – SW*) или же «суперфрейм» (*Super Frame – SF*), которое является аналогом фрейма, границы которого меняются динамически со временем работы системы. У всех абонентов синхронизированы слоты и SW. Впервые данное понятие фигурирует в статье [4].

3. Конфликт считается неразрешенным в том случае, если левая граница диапазона SW перешла слот с самым поздним экземпляром сообщения.

На рис. 2 наглядно продемонстрирован пример работы данной системы, при котором все абоненты успешно покинут систему на девятом слоте.

На рис. 3 показан пример, при котором абоненты один и два не смогли разрешить свои конфликты внутри диапазона SW. Скользящее окно в этот момент находится на интервале с четвертого по пятнадцатый слот, конфликт произошел в первом и третьем слотах, в результате чего их пакеты были утеряны, и они не смогли успешно покинуть систему.

### Моделирование и описание результата

FA-CSA была смоделирована в двух режимах, а именно:

1. Равномерный выбор слотов (*Uniform Slot Selection, U*) – слоты для всех экземпляров выбираются случайным образом на фрейме.

2. С фиксацией первого слота (*First Slot Fixed, F*) – один экземпляр передается непосред-

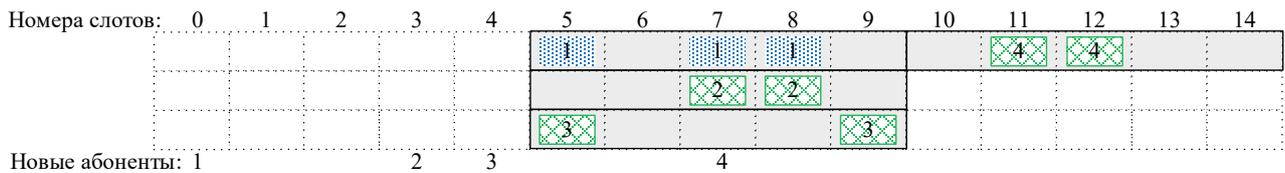


Рис. 1. Пример работы процедуры SIC в CSA

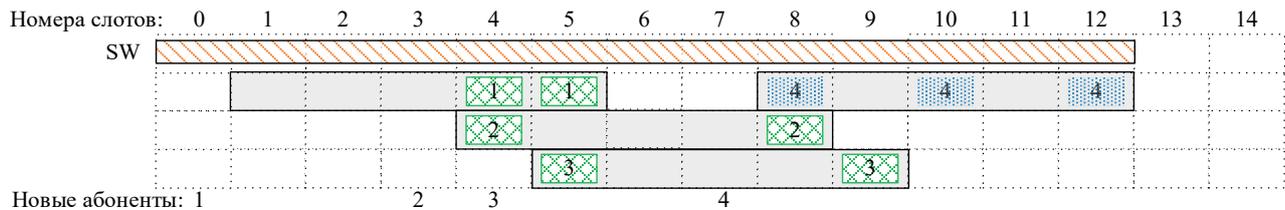


Рис. 2. Пример работы асинхронной модели системы при  $n = 5, SW = 12$

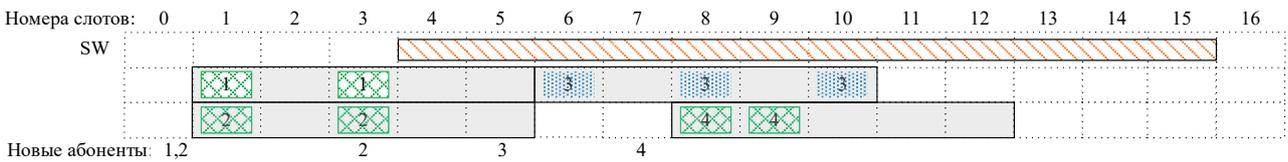


Рис. 3. Пример работы асинхронной модели системы при  $n = 5, SW = 12$

ственно в самом первом слоте фрейма, а остальные выбирают слоты случайным образом.

На рис. 4 приведен график, иллюстрирующий долю потерянных пакетов в зависимости от интенсивности входного потока абонентов.

Одной из важнейших характеристик системы является средняя задержка доставки сообщения (*Average Delay, AD*). Данный параметр свидетельствует о среднем значении интервала

времени с момента появления сообщения в системе до его успешного выхода из нее и рассчитывается следующим образом:

$$AD = \frac{d}{s},$$

где  $d$  – суммарная задержка доставки успешно переданных сообщений;  $s$  – количество успешно доставленных сообщений.

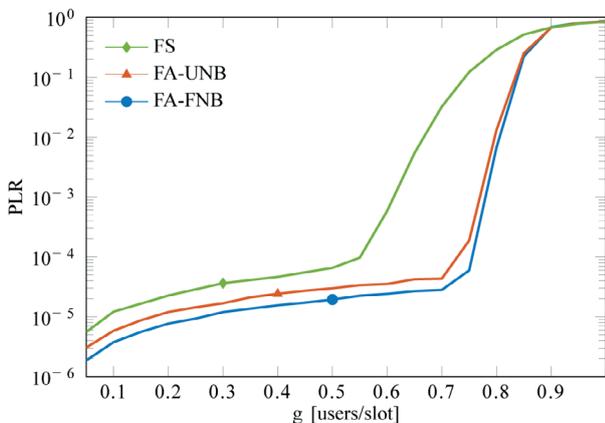


Рис. 4. Доля потерянных пакетов в зависимости от интенсивности входного потока абонентов при параметрах  $n = 200, SW = 1000$

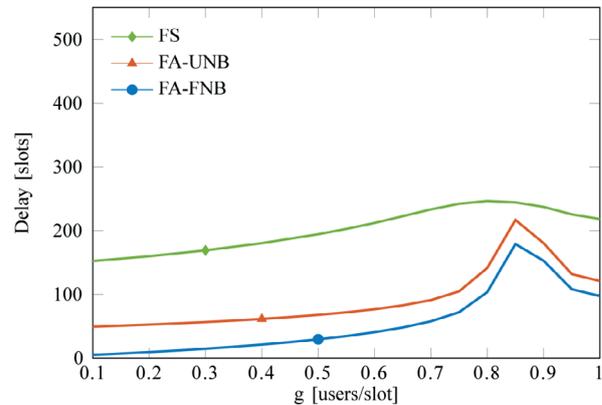


Рис. 5. Средняя задержка доставки сообщения в зависимости от интенсивности входного потока абонентов при параметрах  $n = 200, SW = 1000$

На рис. 5 представлен график, так же как и в случае с PLR, демонстрирующий преимущество алгоритма FA-CSA, только в этот раз – в аспекте скорости доставки сообщения.

### Проверка ACSA на стабильность

В работе выше рассматривается модель с потерями, если сообщение абонента не было успешно доставлено, то он оставляет попытки передать сообщение еще раз. Для синхронной системы в работе [5] рассмотрена модель, в которой после неудачной отправки сообщения абонент пытается передать его снова в следующем фрейме, и строго доказана нестабильность алгоритма без модификации. Изменим поведение абонента до асинхронной системы следующим образом: если абоненту не приходит подтверждающая квитанция о том, что его сообщение успешно доставлено, он организует повторную передачу. Тогда для такой системы можно построить имитационную модель, с помощью которой систему возможно проверить на стабильность.

В модели в 15 000 слоте в систему было искусственно добавлено 500 абонентов. Результат можно наблюдать на рис. 6. Видно, что добавленные абоненты повлияли на работоспособность системы, поскольку число абонентов после этого события стало стремиться к бесконечности.

Для доказательства нестабильности алгоритмов CRA использовались бесконечные Марковские цепи. В статьях [5], [6] через них описан процесс появления и ухода абонентов из системы. В результате без добавления механизма ограничения числа передающих абонентов си-

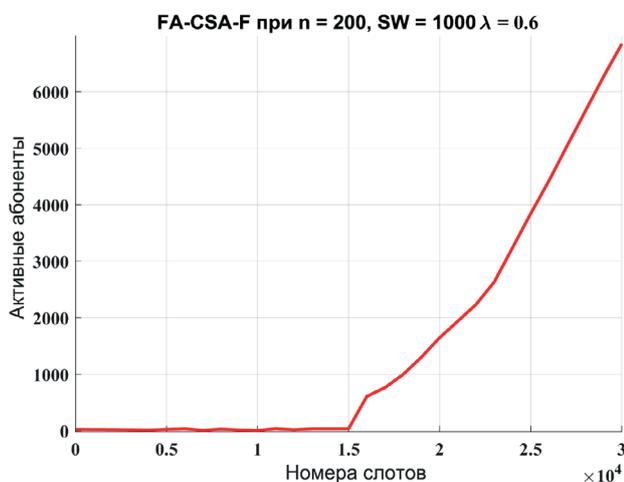


Рис. 6. Количество активных абонентов от времени моделирования

стема не будет стабильно работать. Использовать такой же подход для алгоритмов FA-CSA невозможно, поскольку нельзя описать работу системы с помощью рекуррентного соотношения в силу отсутствия рекурсивной связи у фреймов между появлением абонентов в системе и их уходом из нее, поскольку фреймы начинаются в разные моменты времени для каждого абонента. Провести аналогию с SW в данном случае также не представляется возможным по причине того, что фреймы были статичны, в то время как SW – это динамически меняющийся диапазон.

### Заключение

В статье было продемонстрировано преимущество ACSA, отличительной особенностью которого является отсутствие синхронизации по фреймам, и показана нестабильность данного алгоритма в случае, когда доставка сообщения абонента должна быть гарантированной.

### Библиографический список

1. Abramson M. The aloha system: Another Alternative for Computer Communications AFIPS '70 (Fall) // Proceedings of the November 17–19, 1970. Fall Joint Computer Conference. New York, 1970. P. 281–285.
2. Paolini E., Liva G., Chiani M. Coded Slotted ALOHA: A Graph-Based Method for Uncoordinated Multiple Access // IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 61. N 12. P. 6815–6832.
3. Sandgren E., Graell A., Brännström F. On Frame Asynchronous Coded Slotted ALOHA: Asymptotic, Finite Length, and Delay Analysis. Gothenburg, 2016.
4. Sliding Window-Based Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA / A. Meloni, M. Murrone, C. Kissling, M. Berlioli // 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (2012): n. pag. Crossref. Web.
5. Матвеев Н. В., Тюрликов А. М. Слотовый aloha с итерационной процедурой разрешения коллизий. Стабильность и нестабильность // Информационно-управляющие системы. 2019. № 3. С. 89–97.
6. Апанасенко Н. В., Матвеев Н. В., Тюрликов А. М. Метод стабилизации алгоритмов множественного доступа с последовательным погашением интерференции // Научная сессия ГУАП: сб. докл. СПб., 2017. С. 260–266.

УДК 621.391.1

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-201-207

**М. А. Скляр\*<sup>\*</sup>**

магистрант

**И. А. Пастушок\*<sup>\*</sup>**

кандидат технических наук, доцент

<sup>\*</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## О РАЗВЕРТЫВАНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ EDGE-FOG-CLOUD

Облачные вычисления с их тремя ключевыми аспектами, такими как *Infrastructure as a Service* (инфраструктура как сервис), *Platform as a Service* (платформа как сервис) и *Software as a Service* (приложение как сервис), и присущими им преимуществами (например, эластичностью и масштабируемостью) по-прежнему сталкиваются с рядом проблем. Расстояние между облаком и конечными устройствами может быть проблемой для чувствительных к задержкам приложений, таких как приложения для управления авариями и доставки контента. Соглашение об уровне обслуживания также может требовать наличие вычислительных узлов в местах, где у поставщика облачных услуг нет центров обработки данных. «*Fog computing*» – это новая парадигма для решения таких проблем. *Fog computing* позволяет предоставлять ресурсы и услуги за пределами облака, на границе контура сети, ближе к конечным устройствам. *Fog computing* – это не замена облачным вычислениям, а мощное дополнение. Этот подход позволяет обрабатывать данные на границе контура сети, но при этом дает возможность взаимодействовать с облаком. В статье представлен всесторонний обзор *Fog computing*. Критически рассматриваются текущие возможности применения данного подхода проектирования вычислительной сети в свете краткого набора критериев оценки. Рассматриваются как архитектуры, так и алгоритмы создания fog-систем.

**Ключевые слова:** Облачные вычисления, Вычисления на границе сети, Туманные вычисления, интернет вещей (IoT), задержка.

**М. А. Sklyarov\*<sup>\*</sup>**

Postgraduate Student

**I. A. Pastushok\*<sup>\*</sup>**

PhD Sc. Tech., Associate Professor

<sup>\*</sup>St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## ON DEPLOYING THE EDGE-FOG-CLOUD COMPUTING INFRASTRUCTURE

Cloud computing with its three key aspects (such as *IaaS* (Infrastructure as a service), *PaaS* (Platform as a service) and *SaaS* (Software as a service)) and their inherent advantages (for example, elasticity and scalability) still face a number of challenges. Distance between the cloud and endpoints can be an issue for latency-sensitive applications such as *crash management* and *content delivery applications*. *Service Level Agreement (SLA)* requirements can also require compute nodes in locations where the cloud provider does not have data centers. *Fog computing* is a new paradigm for solving such problems. *Fog computing* allows you to provide resources and services outside the cloud, at the edge of the network edge, closer to the end devices. *Fog computing* is not a replacement for cloud computing, but a powerful addition. This approach allows you to process data at the edge of the network contour, but at the same time makes it possible to interact with the cloud. This article provides a comprehensive overview of *Fog computing*. This paper critically examines the current possibilities of applying this approach to designing a computer network in the light of a short set of evaluation criteria. We consider both architectures and algorithms for creating fog systems. Current problems and potential directions for future research are also presented. In addition, lessons learned are analyzed and perspectives are discussed in terms of the key role that fog-computing is likely to play in new technologies such as the *tactile Internet*.

**Keywords:** Cloud Computing, Edge Computing, Fog Computing, internet of things (IoT), latency.

### Существующие парадигмы реализации вычислительных сетей

С годами парадигмы вычислений эволюционировали от распределенных, параллельных и грид-вычислений к облачным вычислениям.

Последние обладают рядом неотъемлемых возможностей, таких как масштабируемость, распределение ресурсов, сокращение затрат по управлению, гибкая модель ценообразования (оплата по мере использования) и простота предоставления приложений и услуг. Облачные вы-

числения, как правило, представлены тремя ключевыми моделями обслуживания: «Инфраструктура как услуга» (IaaS), «Платформа как услуга» (PaaS) и «Программное обеспечение как услуга» (SaaS). IaaS предоставляет виртуализированные ресурсы, такие как процессорное время, хранилище и сеть. PaaS предоставляет программную среду для разработки, развертывания и управления приложениями. SaaS предоставляет программные приложения и комплексные услуги конечным пользователям и другим приложениям.

В настоящее время широко используются облачные вычисления. Однако у него все еще есть некоторые ограничения. Основным ограничением являются возможности соединения между облаком и конечными устройствами. Такое подключение устанавливается через Интернет, что не подходит для целого ряда облачных приложений, чувствительных к задержкам. Среди хорошо известных примеров – системы управления и мониторинга транспортных средств, системы обнаружения и тушения пожара, нейронные сети и системы доставки контента. Более того, облачные приложения часто распределены и состоят из нескольких компонентов. Следовательно, нередко приходится развертывать компоненты приложения отдельно в нескольких облаках. Это может увеличить задержку из-за накладных расходов, вызванных обменом данными между облаками. Тем не менее в качестве еще одного ограничения SLA может предписывать обработку в местах, где облачный провайдер может не иметь центра обработки данных.

*Fog Computing* – это вычислительная парадигма, введенная для решения этих проблем. Сейчас его продвигает Консорциум *OpenFog*, который недавно опубликовал несколько официальных документов. *Fog* – это «облако ближе к земле». Это новая архитектура, которая расширяет традиционную архитектуру облачных вычислений до границ сети. При использовании *Fog* обработка некоторых компонентов приложения (например, чувствительных к задержке) может происходить на границе сети, в то время как другие (к примеру, устойчивые к задержкам и ресурсоемкие компоненты) могут происходить в облаке. Вычислительные, хранилище и сетевые сервисы – это строительные блоки облака и *Fog*, который его расширяет. Однако *Fog* обеспечивает дополнительные преимущества, такие как низкая задержка, позволяя обрабатывать данные на границе сети, рядом с конечными устройствами, так называемыми узлами *Fog*, дает возможность разрешать обработку в специфичных местах. *Fog* также позволяет ис-

пользовать плотно распределенные точки для сбора данных, генерируемых конечными устройствами. Это делается через прокси, точки доступа и маршрутизаторы, расположенные на границе сети, рядом с источниками. В литературе (например, [1]) широко признается, что облачные вычисления не применимы для большинства приложений интернета вещей (IoT). В качестве альтернативы можно использовать *Fog*. Однако важно отметить, что применение *Fog* выходит за рамки интернета вещей.

### От Cloud к Fog

Первоначально *Fog computing* были внедрены в телекоммуникационном секторе, когда исследователи и практики осознали, как изменилась роль конечных пользователей – от потребителей информации к просьюмерам (производителям и потребителям в то же время). Фактически, исходная парадигма, на которой основан Интернет, предполагает, что ядро сети отвечает за предоставление информации, которая будет потребляться по всей границе сети. Однако просьюмеры с мобильными устройствами или датчиками интернета вещей генерируют огромные объемы данных на границе сети. Итак, что же такое *Fog*-вычисления и как их отличить от *Edge*-вычислений? *Edge*-вычисления – это исключительно вычисления на границе сети без понятия облачных сервисов. В зависимости от источника *Fog*-вычисления – это то же самое, что и пограничные вычисления, или определяется как смесь облака, края и любых промежуточных узлов между ними (это может быть центрами обработки данных малого и среднего размера в базовой сети провайдера). В статье мы придерживаемся второй точки зрения (см. рис. 1 для общей схемы архитектуры развертывания *Fog* вычислений).

Чтобы полностью реализовать свой потенциал, *Fog*-вычисления должны быть чем-то большим, чем просто создание центра обработки данных из коробки, то есть *Cloudlets* [2], чтобы приблизить облако к производителям данных. Вместо этого *Fog*-вычисления следует рассматривать как слой ресурсов, который располагается между периферийными устройствами и облачными центрами обработки данных, с функциями, которые могут быть схожи друг с другом. Как также было отмечено в *OpenFog Consortium*, цель *Fog*-вычислений – предоставить набор методов и инструментов для создания континуума между периферией и облаком. Для этого технологиям туманных вычислений особенно необходимо обеспечить плавное пере-

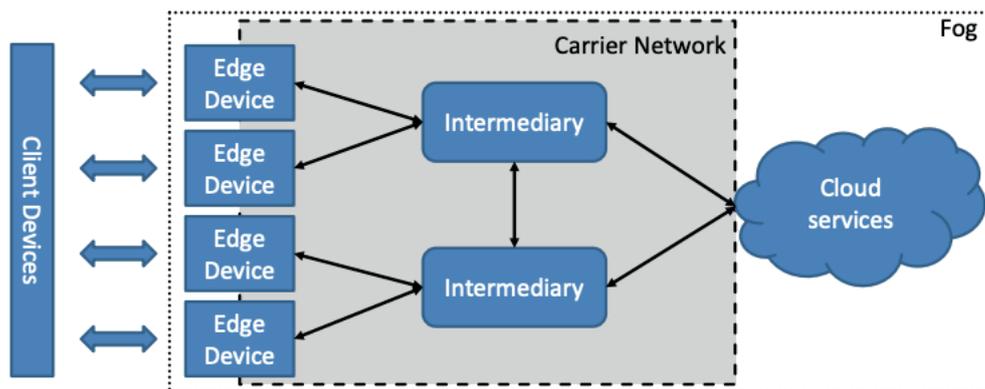


Рис. 1 Базовая архитектура Edge-Fog-Cloud

мещение данных между облачными службами и периферией в обоих направлениях, удовлетворяя при этом ограничениям приложений с точки зрения качества обслуживания (QoS). Такое перемещение данных может также сопровождаться перемещением вычислений.

С появлением туманных вычислений приложения, основанные на этой парадигме, могут использовать преимущества как периферийных, так и облачных сред. С помощью специально настроенных фреймворков, например EDGEX [3], разработчики могут оставить на уровень Fog-вычислений автоматическую обработку данных и размещение вычислений. На основе такого динамического перемещения данных и вычислений приложения могут предоставлять новые функциональные возможности или новые уровни QoS (например, значительно более низкую задержку) и использовать новые способы для динамического балансирования нагрузки. Отсутствие этих возможностей пока препятствует появлению таких технологий, как автономное и взаимосвязанное вождение, крупномасштабный интернет вещей и т. д., которые должны получить значительный толчок в развитии от внедрения Fog.

### Предлагаемый вариант архитектуры Edge-Fog-Cloud

Разворачивание предложенной архитектуры было осуществлено на базе лаборатории интернета вещей ГУАП. Инфраструктура создавалась для объемного проекта, обеспечивающего умное пространство в тестовой лаборатории. В лаборатории имеются камеры, которые должны захватывать видеопоток для дальнейшего анализа, а также ряд датчиков и устройств. Данные с камеры должны обрабатываться нейронной сетью с целью распознавания человека, умное

пространство должно адаптироваться под человека, которого распознала нейронная сеть, путем анализа его положения в пространстве и сбора метрик с датчиков вокруг, по итогу анализа должны быть переданы управляющие команды на устройства поблизости, например «открыть окно», «увеличить мощность электрообогревателя», «сделать ярче освещение» и т. п. Помимо вышеизложенного функционала, на систему также возлагаются функции противодействия пожару. Данные требования к системе накладывают существенные ограничения на инфраструктуру сети. Очевидно, что для достижения максимальной скорости реагирования на пожар непозволительно отправлять данные в Cloud, а для позиционирования человека в пространстве также следует задействовать узлы на границе сети, намного ближе к самой камере. Исходя из этого, была предложена следующая архитектура Edge-Fog-Cloud сети (рис. 2).

### Датчики и устройства

Прежде всего стоит отметить, что площадь лаборатории превышает 200 кв. м, что накладывает существенные ограничения на выбор протокола для датчиков и устройств. Многие из датчиков работают на автономном питании, что делает невозможным постоянное использование модуля Wi-Fi ввиду чрезмерной энергозатраты, поэтому основным протоколом передачи данных для устройств и сенсоров стал Zigbee.

Zigbee – это основанная на IEEE 802.15.4 спецификация для набора протоколов связи высокого уровня, используемых для создания персональных сетей с небольшими маломощными цифровыми радиостанциями. Таким образом, Zigbee представляет собой одноранговую беспроводную сеть с низким энергопотреблением,

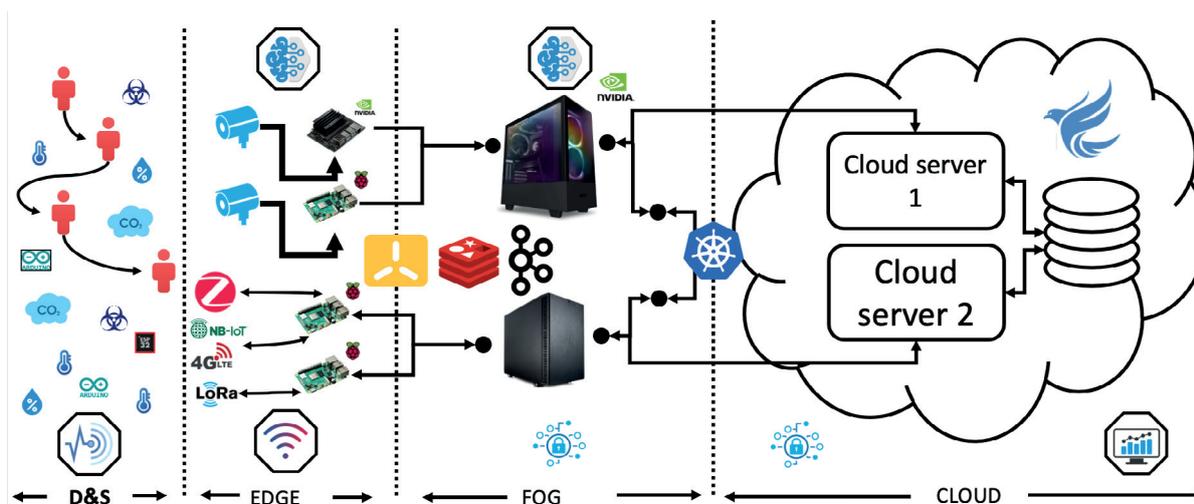


Рис. 2 Предлагаемый вариант архитектуры Edge-Fog-Cloud

низкой скоростью передачи данных и непосредственной близостью узлов.

Технология, определенная в спецификации Zigbee, должна быть проще и дешевле, чем другие беспроводные персональные сети (WPAN), такие как Bluetooth или более общие беспроводные сети, такие как Wi-Fi.

Ее низкое энергопотребление ограничивает расстояние передачи до 10–100 м в пределах прямой видимости, в зависимости от выходной мощности и характеристик окружающей среды. Устройства Zigbee могут передавать данные на большие расстояния, передавая их через ячеистую сеть промежуточных устройств. Zigbee обычно используется в приложениях с низкой скоростью передачи данных, которые требуют длительного времени автономной работы и безопасных сетей (сети Zigbee защищены 128-битными симметричными ключами шифрования). Zigbee имеет определенную скорость 250 кбит/с, что лучше всего подходит для прерывистой передачи данных от датчика, или устройство ввода.

### Edge. Граница сети

На границе сети располагаются базовые станции LORA, NB-IOT и 4G, несмотря на то, что основным протоколом связи для устройств был выбран ZigBee, нами также рассматривались возможности обеспечить связь устройств с потребителями через другие технологии благодаря архитектуре Fog, а именно тому, что базовые станции находятся на границе сети, удалось решить проблему большой задержки. Помимо базовых станций, на уровне Edge располагаются

непосредственно камеры, захватывающие изображение и формирующие видеопоток, а также ряд устройств-микрокомпьютеров Raspberry Pi и Jetson Nano, которые отвечают за прием видеопотока с камер и распознавание/позиционирование человека на нем с минимальной задержкой. Все вычислительные устройства на данном уровне объединены в кластер, и для их оркестрации используется защищенная система оркестрации контейнеров k3s. K3s – это легковесный аналог распространенной системы оркестрации контейнеров Kubernetes от Google. Благодаря ее невысоким требованиям к ресурсам система может быть запущена на устройствах с небольшим количеством RAM и CPU, при этом оставляя достаточно места для уровня Application. Рассмотрение архитектуры Kubernetes выходит за рамки текущей статьи, более подробно можно узнать из следующих работ [4]. Базовая схема архитектуры k3s приведена на рис. 3.

K3s, также как и Kubernetes, состоит из ряда независимых компонентов, каждый из которых имеет свою собственную роль.

Kubernetes API – это интерфейсная часть плоскости управления Kubernetes, обрабатывающая внутренние и внешние запросы. Сервер API определяет, действителен ли запрос, и если да, – обрабатывает его. Доступ к API можно получить через вызовы REST, интерфейс командной строки kubectl или другие инструменты командной строки, такие как kubeadm.

Kube-scheduler, или планировщик, учитывает потребности модуля в ресурсах, таких как ЦП или память, а также состояние кластера. Затем он назначает модуль на соответствующий вычислительный узел.

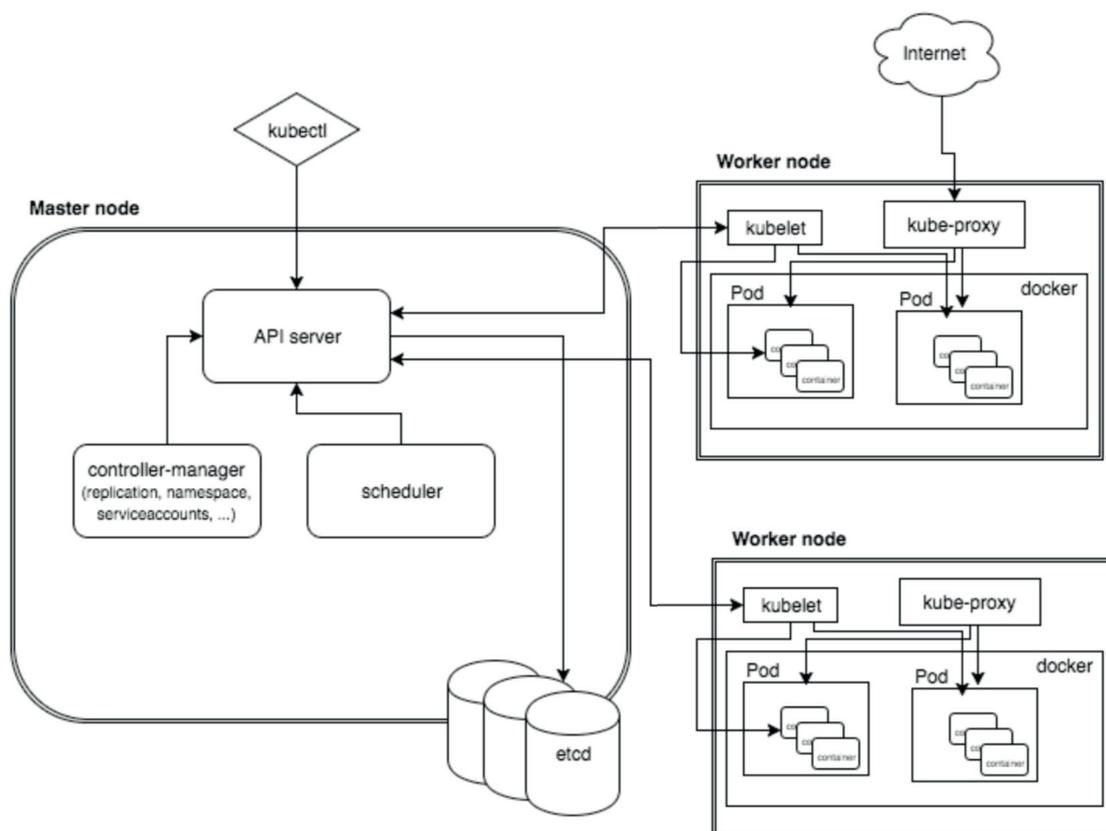


Рис. 3 Архитектура k3s

Kube controller managers или контроллеры заботятся о фактической работе кластера, а контроллер-менеджер Kubernetes содержит несколько функций контроллера в одной. Один контроллер обращается к планировщику и проверяет правильность количества запущенных модулей. Если модуль выходит из строя, другой контроллер замечает это и отвечает. Контроллер подключает службы к модулям, поэтому запросы направляются в нужные конечные точки. Также существуют контроллеры для создания учетных записей и токенов доступа API.

Данные конфигурации и информация о состоянии кластера хранятся в etcd, базе данных хранилища ключей. Отказоустойчивый и распределенный, etcd разработан, чтобы быть основным источником достоверной информации о вашем кластере.

Решение объединить вычислительные ресурсы уровня Fog в кластер k3s было принято неспроста. Во-первых, k3s позволяет крайне гибко распределять нагрузку, что критически важно в случае большого количества «маленьких» устройств; во-вторых, обеспечивать высокую доступность и отказоустойчивость, благодаря быстрой процедуре выбора главного узла сети, а

значит, что при полном отказе нескольких узлов в сети это никак не скажется на функционировании системы в целом. Количество узлов нечетно для поддержания кворума и подобрано таким образом, чтобы система оставалась в полностью рабочем состоянии при отказе более 40 % устройств.

Важно отметить, что устройства уровня Edge не имеют прямого выхода в глобальную сеть Интернет. Поэтому для сценариев противодействия пожара при обнаружении аномалий с датчиков вычислительные устройства не отправляют информацию за контур сети, а реагируют мгновенно на месте, отправляя управляющие команды на устройства сигнализации, аварийного тушения пожара и прочее. И только после этого отправляют уведомление на уровень Fog, который в свою очередь вызовет службы быстрого реагирования и оповестит клиентские мобильные устройства.

### Fog и Cloud

Уровень Fog располагается как правило близко к контуру сети, в нашем случае это тоже здание, но помещение с хорошим охлаждением и

проводным интернет соединением, другими словами, с подходящими кондициями для размещения нескольких мощных вычислительных серверов. Важно отметить, что вычислительные узлы объединены в кластер Kubernetes и напрямую связаны с кластером k3s таким образом, что устройства утилизируют общую виртуальную сеть. Такой подход позволяет минимизировать задержки и упростить процесс оркестрации большого количества приложений на большом количестве узлов. Устройства Cloud также находятся в вышеупомянутом кластере. Система Kubernetes позволяет настроить сложную топологию таким образом, чтобы нагрузка шла на ближайшие узлы, за счет этого мы контролируем потоки данных так, чтобы они не проходили на Cloud в обход Fog, если это не необходимо. Структурная схема Kubernetes-кластера представлена на рис. 4.

В рамках текущей задачи основная роль, возлагаемая на вычислительные узлы уровня Fog, – это анализ данных. Под анализом данных понимаются сложные процедуры оценки большого количества значений и составления вердикта. На уровне Fog запущены нейронные сети, которые получают данные с уровня Edge, а именно – видеопоток с информацией о находящихся на нем людях и ищут на видео аномалии, такие как открытый огонь, задымление и прочее. Помимо этого, нейронные сети на этом же уровне анализируют «поведение» человека, его привычки и «зону комфорта», формируя на выходе вектор признаков таким образом, чтобы умное пространство автоматически подстраивалось под предпочтения конкретного человека, вошедшего в комнату.

Уровень Cloud используется как долговременное хранилище данных, а также предоставляет вспомогательные сервисы, не требующие низкой задержки (например, веб-сервис, визуализирующий умное пространство и позволяющий управлять им).

### Edge-Fog-Cloud. Уровень приложений

В качестве связующей нити всех уровней было выбрано решение Pravega.

Pravega – это примитив хранилища с открытым исходным кодом, реализующий потоки для непрерывных и неограниченных данных.

Pravega организует данные в потоки. Поток – это прочная, эластичная, неограниченная последовательность байтов, предназначенная только для добавления, с хорошей производительностью и высокой согласованностью. Поток Pravega похож на «topic» в терминологии типичных Publisher-Subscriber систем, таких как RabbitMQ или Apache Kafka, но более гибкий.

Pravega Streams основаны на структуре «append-only log». Используя журналы только для добавления, Pravega может быстро загружать данные в надежное хранилище и поддерживать большое количество вариантов использования приложений, таких как потоковая обработка с использованием таких фреймворков, как Flink, публикация/подписка сообщений, базы данных NoSQL, такие как база данных временных рядов (TSDB), механизмы рабочих процессов, событийно-ориентированные приложения и многие другие приложения.

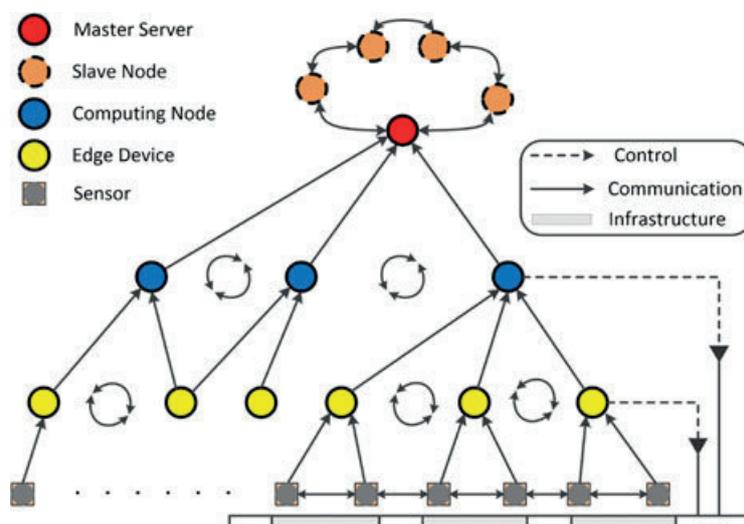


Рис. 4. Структурная схема Kubernetes-кластера

Когда разработчик создает поток в Pravega, он дает этому потоку значимое имя, например «IoTSensorData» или «WebApplicationLog». Имя потока помогает другим разработчикам понять, какие данные хранятся в потоке. Также стоит отметить, что названия потоков Pravega организованы в пределах области видимости. Следовательно, поток однозначно идентифицируется по комбинации его имени потока и области действия. Область действия может использоваться для разделения имен по арендаторам (в многопользовательской среде), по отделам в организации, географическому положению или по любой другой категоризации, которую выберет разработчик.

Размер потока не ограничен – сама Pravega не накладывает никаких ограничений на количество событий, которое может быть в потоке, или общее количество байтов, хранящихся в потоке. Дизайн Pravega горизонтально масштабируется от нескольких машин до мощности всего центра обработки данных.

Приложения, такие как программа Java, считывающая с датчика IoT, записывают данные в конец (перед) потока. Приложения аналитики могут читать из любой точки потока. Многие приложения могут читать и записывать один и тот же поток параллельно. Эластичная, масштабируемая поддержка большого объема потоков данных и приложений лежит в основе дизайна Pravega.

В конкретной реализации Pravega используется от уровня Edge и вплоть до Cloud, все данные системы идут через Pravega. Непрерывный поток данных формируется устройствами Edge и посылается далее, преобразуясь на своем пути устройствами другого уровня, например, добавляется информация о наличии людей на видеопотоке. После прохода всех уровней данные складываются в длительное Tier-2 хранилище на уровне Cloud, откуда могут быть запрошены для проведения повторного анализа или для статистики.

В статье была рассмотрена относительно молодая архитектура формирования гибкой вычислительной сети, проработана и предложена конкретная практическая реализация данной архитектуры, проанализированы узкие места и предложены пути их решения. Рассмотрена возможность использования нового продукта Pravega в подобных вычислительных сетях.

*Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента Российской Федерации МК-1326.2021.1.6 «Исследование алгоритмов доступа к ресурсам радиоканала для систем индустриального интернета вещей»*

## Библиографический список

1. Moving to the Edge-Cloud-of-Things: Recent Advances and Future Research Directions / H. Bangui, S. Rakrak, S. Raghay, B. Buhnova // *Electronics*. Vol. 7. N 309. 2018.
2. Satyanarayanan M. A Brief History of Cloud Offload: A Personal Journey from Odyssey Through Cyber Foraging to Cloudlets // *GetMobile: Mobile Comp. and Comm.* 18, 2015.
3. Hemant S., Kenneth S. EdgeX: Edge Replication for Web Applications // *IEEE 8th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*, 2015.
4. Скляр М. А. Разработка комплекса лабораторных работ на базе технологии управления защищенными облачными контейнерами Kubernetes // Выпускная квалификационная работа бакалавра. СПб.: ГУАП, 2019.

УДК 004.728.3.057.4

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-208-211

**Н. В. Степанов\***

аспирант

**А. М. Турликов\***

доктор технических наук, профессор

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЙНОГО ДОСТУПА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ NB-IOT

Одним из перспективных направлений развития технологии NB-IoT является применение мобильных датчиков. В таком сценарии периодически датчики могут входящие и выходящие из зоны покрытия базовой станции. Возникает проблема синхронизированного подключения большого числа датчиков к каналу произвольного доступа NB-IoT. В этом исследовании описывается модель случайного доступа NB-IoT динамических систем технологии NB-IoT с помощью Марковской цепи. Она позволяет найти важные параметры системы, например среднюю задержку передачи данных. Формулируется проблема использования данной Марковской цепи при анализе систем с большим числом мобильных датчиков. Предлагается способ ее решения.

**Ключевые слова:** NB-IoT, массовые МТС, случайный доступ, мобильные датчики, двухмерная Марковская цепь, численный анализ.

**N. V. Stepanov\***

PhD Student

**A. M. Turlikov\***

Dr. Sc. Tech., Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## NUMERICAL ANALYSIS OF RANDOM ACCESS USING NB-IOT

One of the promising directions for the development of NB-IoT technology is the use of mobile sensors. In such a scenario, intermittent sensors may enter and exit the coverage area of the base station. There is a problem of synchronized connection of a large number of sensors to the NB-IoT random access channel. This study describes the NB-IoT random access model of dynamic NB-IoT technology systems using a Markov chain. The Markov chain allows you to find important system parameters, for example, the average data transfer delay. The problem of using this Markov chain in the analysis of systems with a large number of user devices is formulated. Finally, a way to solve this problem is proposed.

**Keywords:** NB-IoT, massive MTC, random access, mobile sensors, two-dimensional Markov chain, numerical analysis.

### Введение

На сегодняшний день традиционные технологии сотовых сетей 4G, LTE из-за высокой стоимости пользовательского оборудования, значительного энергопотребления и особенностей работы протоколов оказываются малоэффективными при передаче малых объемов данных, характерных для IoT. Среди этих технологий особое место занимают технологии сетей широкого покрытия с низким энергопотреблением (LPWAN, Low-Power Wide-area Network), включающие в себя такие технологии, как SigFox, LoRa и Weightless. Наряду с LPWAN сетями используются CIoT (Cellular IoT) сети [1]. Активное применение IoT в повседневную жизнь с использованием традиционных сотовых сетей породило новое семейство

технологий беспроводных сотовых IoT (CIoT). На сегодняшний день существует три технологии, относящиеся к данному семейству: NB-IoT, LTE-M и EC-GSM-IoT. Лишь NB-IoT и LTE-M являются непосредственным ответвлением от LTE. NB-IoT наиболее активно применяется в IoT-устройствах.

Типовым рассматриваемым сценарием является тот, где есть большое количество пользовательских устройств (или датчиков), которые в случайный момент времени передают сообщения [2]. Такой сценарий в литературе получил название массовое МТС. В системах IoT в силу ряда причин может оказаться, что базовая станция в течение некоторого времени может быть недоступна пользовательскому устройству. Для такого расширения типового сценария функци-

онирование системы может быть описано двухмерной Марковской цепью. Обоснование применимости такой модели есть в статье [3].

Для рассматриваемого сценария ключевым параметром является задержка. Анализируя двухмерную Марковскую цепь, задержка может быть получена численным путем, однако при большом числе пользовательских устройств возникает ряд проблем с реализацией численного расчета. В реальных сценариях число пользовательских устройств может быть несколько тысяч или десятков тысяч. В статье описываются эти проблемы и указываются пути их решения. Работа построена следующим образом: сначала формулируется модель системы с приведенными допущениями. Далее указывается, как функционирование данной модели можно описать с помощью Марковской цепи, формулируется проблема использования данной Марковской цепи при анализе систем с большим числом пользовательских устройств и указывается путь решения этой проблемы.

**Модель системы**

Для описания модели системы введем следующие допущения:

*Допущение 1:* время, проведенное во включенном и выключенном состояниях, представляет собой случайные величины  $T_{ON}$  и  $T_{OFF}$ , которые следуют геометрическим распределениям с параметрами  $q_{ON}$  и  $q_{OFF}$  соответственно. Можно определить эти вероятности, используя время пребывания в режиме соединения и отключения (см., например, [4]).

*Допущение 2:* чтобы упростить формализацию, мы рассматриваем процесс поступления сообщений от датчиков  $N$  как агрегированный с интенсивностью  $N\lambda$ , где  $\lambda$  – интенсивность сообщений от одного датчика. При такой интерпретации каждый датчик может иметь не более одного сообщения, готового к передаче, что согласуется с допущениями модели нашей системы. Датчик остается в системе до тех пор, пока его сообщение не будет успешно передано или пока не будет достигнуто максимальное количество попыток доступа и передачи.

*Допущение 3:* в состоянии ON датчик пытается связаться с БС, используя преамбулы  $l$ . Если попытка доступа успешна, датчик передает сообщение. Если сообщение успешно передано, этот датчик покидает систему.

*Допущение 4:* датчики, имеющие сообщение, готовое к передаче, образуют очередь, в которой все датчики считаются одновременно активны-

ми. Если состояние ON (связность) заканчивается, это отставание датчиков находится в активном состоянии в начале следующего периода ON.

Таким образом, система допущений описывается набором следующих параметров:  $l$  – число преамбул;  $N_{max}$  – максимальное возможное число пользовательских устройств в системе.

**Описание Марковской цепи и нахождение характеристик системы**

Возьмем  $\{S^t, N^t_{act}, t = 0, 1, \dots\}$  – это стохастический процесс, где  $S^t$  описывает состояние соединения системы с состоянием ON, соответствующим 1, и состояниями OFF, обозначенными 0,  $N^t_{act}$  – количество активных датчиков, имеющие сообщение, готовое к передаче, которые еще не получили доступ к системе NB-IoT. Таким образом, процесс определяется в пространстве состояний  $Z\{0,1\} \times \{0, 1, \dots, N\}$ . Вспоминая допущения из предыдущего раздела, легко увидеть, что выбор следующего состояния зависит только от текущего состояния, это подразумевает, что процесс  $\{S^t, N^t_{act}, t = 0, 1, \dots\}$  является Марковским.

Количество активных пользовательских устройств во временном интервале  $t + 1$  связано с количеством активных пользовательских устройств во временном интервале  $t$ , их число определяется по формуле (1) следующим образом:

$$N^{t+1}_{act} = N^t_{act} - T(N^t_{act}, S^t) + V^t(N^t_{act}), \quad (1)$$

где  $T(N^t_{act}, S^t)$  – количество успешных передач, когда система находится в состоянии  $S^t$  и система имеет  $N^t_{act}$  – активных пользовательских устройств. Обозначим через  $V^t(N^t_{act})$  – количество датчиков, которые стали активными во время  $t$ , при условии, что  $N^t_{act}$  – это число активных пользовательских устройств в начале слота  $t$ . Так как количество активных пользовательских устройств совпадает с количеством сообщений. Таким образом, мы имеем условие:

$$S^t = \begin{cases} 0, & \text{если система в состоянии OFF} \\ 1, & \text{если система в состоянии ON} \end{cases}, \quad (2)$$

подразумевая, что компонент  $S^{t+1}$  принимает следующий вид:

$$S^{t+1} = \begin{cases} 0, & \text{с вероятностью } q_{OFF} \text{ если } S^t = 0 \\ 0, & \text{с вероятностью } 1 - q_{ON} \text{ если } S^t = 1 \\ 1, & \text{с вероятностью } q_{ON} \text{ если } S^t = 1 \\ 1, & \text{с вероятностью } 1 - q_{OFF} \text{ если } S^t = 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Используя формулы (1)–(3), можно описать вероятности перехода в Марковской цепи с помощью следующих выражений. Для случая  $i > j$  получается следующая формула (4):

$$p\{j, S^{t+1} | i, S^t\} = \begin{cases} s \sum_{m=i-j}^{N-j} C_{N-i}^{m-(i-j)} q^{m-(i-j)} \times & S^t = 0 \\ \times (1-q)^{N-j-m} \Pr\{T = m | i\} & \\ s C_{N-i}^{i-j} q^{i-j} (1-q)^{N-j} & S^t = 1 \end{cases} \quad (4)$$

для  $i \leq j$  справедливо следующая функция (5):

$$p\{j, S^{t+1} | i, S^t\} = \begin{cases} s \sum_{m=i-j}^{N-j} C_{N-i}^{j-i+m} q^{j-i+m} \times & S^t = 0 \\ \times (1-q)^{N-j-m} \Pr\{T = m | i\} & \\ s C_{N-i}^{j-i} q^{j-i} (1-q)^{N-j} & S^t = 1 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $s$  – вероятность перехода из состояния ON в состояние OFF с учетом следующего выражения в функции (6):

$$S^{t+1} = \begin{cases} q_{ON}, & S^t = 1, S^{t+1} = 1 \\ 1 - q_{ON}, & S^t = 1, S^{t+1} = 0 \\ q_{OFF}, & S^t = 0, S^{t+1} = 0 \\ 1 - q_{OFF}, & S^t = 0, S^{t+1} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

$\Pr\{T = m | i\}$  – вероятность того, что в системе есть  $m$  пользовательских устройств успешно переданными сообщениями, при условии, что имеется  $i$  с готовым к передаче сообщением.

Покажем следующим образом, как можно вычислить вероятность  $\Pr\{T = m | i\}$  по формуле (7).

$$\Pr\{T = m | i\} = \sum_{k=0}^i C_i^k p^k (1-p)^{i-k} P(l, k, m), \quad (7)$$

где  $p$  – вероятность того, что активное пользовательское устройство передает в текущий временной промежуток. Данная вероятность определяется по формуле (8):

$$p = \begin{cases} 0, & \text{если } i = 0 \\ \min\left(\frac{l}{i}, 1\right), & \text{иначе} \end{cases} \quad (8)$$

$P(l, k, m)$  – вероятность распределения сообщений  $k$  по каналам  $l$  преамбулам, так что каналы  $m$  выбираются ровно одним пользовательским устройством. Следуя работе [5], где эта вероятность определяется по формуле (9):

$$P(l, k, m) = \begin{cases} \frac{(-1)^m l! k!}{l^k m!} \sum_{f=m}^{\min(l, k)} \frac{(-1)^f (l-f)^{k-f}}{(f-m)!(l-f)!(k-f)!}, & m \leq k \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (9)$$

На основе переходных вероятности Марковских цепей можно найти стационарное распределение  $P_i$ . А по стационарному распределению можно найти такой важный параметр, как средняя задержка:

$$E[d] = \frac{E[N_{act}]}{(N - E[N_{act}]) \cdot \left(1 - e^{-\frac{-\lambda}{N}}\right)}, \quad (10)$$

где среднее число активных абонентов (или пользователей)  $E[N_{act}]$  рассчитывается по формуле (11):

$$E[N_{act}] = \sum_{i=1}^N i \cdot P_i, \quad (11)$$

Используя эту формулу, можно исследовать зависимость задержки от параметров системы. Однако непосредственный расчет переходных вероятностей путем подстановки выражений, вычисляемых по формулам (6)–(9), в формулы (4) и (5) связан с большими вычислительными затратами, что делает невозможным исследование зависимостей характеристик системы параметров. Решение этой проблемы будет описано в следующем разделе.

### Способ численного анализа при большом числе абонентских устройств

Для решения это проблемы предлагается следующий подход: фиксируется число преамбул  $l$ , задается максимальное возможное число абонентов в системе, до которого в дальнейшем будут рассчитаны характеристики системы  $N_{max}$ . Производится вычисление по формуле (9). Результаты вычислений записываются в двумерном массиве вероятности  $P(l, k, m)$  размерностью  $(l+1) \times N_{max}$ , где номер строки соответствует числу окон, которое в процессе разрешения конфликта выбирает только один абонент ( $m$ ), а номер столбца это количество абонентов, которые передают в данном окне ( $k$ ).

Следует отметить, что при вычислениях большая часть столбцов этого массива может быть заменена нулевыми значениями. Например, если  $l = 12$ , т. е. имеется 12 преамбул, то

при  $k \geq 312$  вероятность события, что преамбулу выберет только один абонент, пренебрежимо мала, поэтому все значения столбцов при  $k \geq 312$  можно заменить нулями.

С использованием заранее сохраненных значений по формуле (9) выполняются вычисления по формуле (7) и снова строим массив размерностью  $(N_{\max}+1) \times (N_{\max}+1)$ . Номер строки соответствует числу активных абонентов, у которых готовы сообщения для передачи ( $N_{act}^t$ ) в момент времени  $t$ , а номер столбца – это количество абонентов, которые успешно передали свое сообщение ( $T$ ). Начиная с определенной строки значения элементов строки не меняются.

Для приведенного выше примера с  $l = 12$  формируется массив по формуле (7). Со значения переменной  $k \geq 6000$  формулы (7) не имеет смысла пересчитывать слагаемые суммы, так как новые слагаемые становятся все меньше. По этой причине все последующие значения вероятности (7) при  $i \geq 6000$  приводятся предыдущие значения вероятностей.

## Заключение

Прерывистое подключение в массовых случаях использования мобильных IoT может привести к различным нежелательным эффектам, таким как синхронизация датчиков после входа в зону обслуживания mMTC. В этой статье мы предложили аналитическую модель для технологии NB-IoT, обслуживающей динамическую

систему, оснащенную большим количеством датчиков, непрерывно работающих в роуминге между зонами покрытия базовых станций NB-IoT. Модель основана на теории Марковских цепей и позволяет учитывать большое число обслуживаемых датчиков, вышедших в активный режим в период отсутствия связи с базовой станцией NB-IoT. Кроме того, решать проблему численного анализа случайного множественного доступа при использовании технологии NB-IoT после того как датчики выйдут в зону покрытия базовой станции одновременно.

## Библиографический список

1. *Liberg O.* Cellular Internet of things: technologies, standards, and performance. Academic Press, 2017. 390 p.
2. *Кузьмичев С. А., Степанов Н. В., Турликов А. М.* Методы назначения параметров оконечных устройств при развертывании сети. СПб.: ГУАП, 2020. 6 с.
3. *Stepanov N., Moltchanov D., Turlikov A.* Modeling the NB-IoT Transmission Process with Intermittent Network Availability. Springer, 2020. 16 p.
4. *Kavuri S.* Performance Analysis of Onshore NB-IoT for Container Tracking During Near-the-Shore Vessel Navigation // IEEE Internet of Things Journal. 2020. Vol. 7. N 4. P. 2928–2943.
5. *Szpankowski W.* Statistic analysis of multiaccess systems with random access and feedback // IEEE Transactions on communications. 1983. P. 684–692.

УДК 621.391

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-212-216

**А. А. Фоминых\***

магистрант

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## СХЕМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛЯРНЫХ КОДОВ

Рассматриваются алгоритмы предварительного кодирования полярных кодов. Обсуждаются актуальные проблемы, возникающие при декодировании полярных кодов. Приводятся результаты моделирования существующих схем предварительного кодирования и схемы с низкоплотностным кодом в канале с АБГШ.

**Ключевые слова:** полярные коды, схемы предварительного кодирования.

**A. A. Fominykh\***

Postgraduate Student

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## POLAR CODES PRECODING SCHEMES

In this paper we consider different precoding schemes for polar codes and discuss the actual problems of polar codes that lead to decoding performance degradation. The results of comparison of existing precoding schemes and precoding scheme using low-density parity-check code are presented using BPSK modulation and AWNG channel.

**Keywords:** polar codes, precoding schemes.

### Введение

Полярные коды были предложены Эрдалом Ариканом в 2009 г. [1], являются первыми кодами с явной конструкцией, в асимптотике достигающими пропускной способности симметричного канала, обладая при этом простыми процедурами кодирования и декодирования. Новая волна интереса к полярным кодам возникла в связи с принятием полярных кодов консорциумом 3GPP (3rd Generation Partnership Project) в стандарт беспроводной связи пятого поколения [2] для кодирования в восходящих и нисходящих каналах сервиса расширенной мобильной широкополосной связи (enhanced mobile broadband, eMBB).

В основе процедуры кодирования полярными кодами лежит явление поляризации канала, суть которого состоит в том, что путем некоторых преобразований канал передачи информации может быть расщеплен на подканалы, вероятность ошибки в которых стремится к нулю, и подканалы, вероятность ошибки в которых стремится к единице. Учитывая возникающие свойства подканалов, целесообразно передавать биты данных по наиболее надежным подканалам, а по наименее надежным подканалам передавать некоторые predetermined данные, как правило, нули.

По своей природе полярные коды имеют последовательные процедуры кодирования и деко-

дирования. Последовательное декодирование приводит не только к большим временным затратам, но и к последовательному распространению ошибок. Частичное решение этой проблемы производится с использованием списочного декодирования [3] либо с помощью алгоритма распространения доверия [4, 5], который, как правило, применяется для декодирования низкоплотностных кодов (low-density parity-check code, LDPC code) [6].

Другой проблемой полярных кодов является их минимальное расстояние. Способы изменения минимального расстояния были предложены в работах [7], [8]. В первой работе предлагается перед кодированием с помощью полярного кода произвести предварительное кодирование с помощью циклического избыточного кода (cyclic redundancy check code, CRC code). В работе [8] предлагается заменить шаг кодирования CRC-кодом на кодирование с помощью сверточного кода (convolutional code). В данной статье будут рассмотрены вышеуказанные схемы и вариант предварительного кодирования с помощью низкоплотностного кода.

### Полярный код

Полярным кодом называется двоичный линейный блочный код длины  $N = 2^n$  и скорости

$R = K/N$ , где  $K$  – число информационных символов;  $R = N - K$  – число замороженных символов. Обозначим множество позиции замороженных символов как  $\mathcal{F}$ , а множество информационных символов как  $\mathcal{A}$ . В основе процедуры кодирования полярными кодами лежит операция поляризации канала, описываемая линейным преобразованием, задаваемым матрицей  $\mathbf{G}^{\otimes n}$ ,  $n = \log_2 N$ ,  $\otimes n$  –  $n$ -кратное кронекеровское произведение матрицы самой на себя,  $\mathbf{G}$  – ядро поляризации [1]:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Преобразование вектора  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_N)$  в кодовое слово  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$  осуществляется посредством умножения  $\mathbf{u}$  на порождающую матрицу  $\mathbf{G}^{\otimes n}$ :

$$\mathbf{x} = \mathbf{u}\mathbf{G}^{\otimes n}.$$

Для того чтобы осуществить процедуру кодирования, предварительно выполняется определение  $K$  из  $N$  наиболее надежных битовых подканалов. На позиции вектора  $\mathbf{u}$  соответствующие этим надежным подканалам присваиваются  $K$  информационных символов. Оставшимся  $N - K$  позициям в векторе  $\mathbf{u}$ , отображающим замороженные позиции и не входящим в множество  $K$  надежных позиций, присваиваются предопределенные фиксированные значения, обычно нули. Так как позиции, соответствующие наиболее надежным подканалам, могут изменяться в зависимости от типа канала и заданного отношения мощности сигнала к мощности шума, а также длины кода, определение этих позиций может выполняться с помощью непосредственного вычисления вероятностей ошибок или с помощью компьютерного моделирования. В стандарте 5G [2] предлагается последовательность из 1024 индексов битовых подканалов, представленных в порядке возрастания их надежности. Данная последовательность была сформирована на основе результатов, полученных в ряде исследовательских работ [9], [10] и может быть использована для выбора информационных и замороженных позиций для каналов с разными условиями канала и кодов длиной до 1024 бит.

#### Алгоритмы декодирования полярных кодов

В оригинальной работе Э. Арикана для декодирования полярных кодов был предложен алгоритм последовательного исключения (successive-cancellation, SC) [1], который является по-

следовательным по своей природе. Биты декодируются последовательно, при этом в каждый момент времени может декодироваться только один бит. Последовательное выполнение алгоритма приводит к значительной задержке при декодировании, а также к распространению ошибок, так как при принятии неверного решения относительно информационного бита данная ошибка будет влиять на декодирование всех последующих битов. Одним из решений данных проблем стало предложение использовать итеративные алгоритмы декодирования [4], [5], используемые, как правило, при декодировании низкоплотных кодов.

Как указано выше, ошибочное решение относительно информационного бита может привести к дальнейшему распространению ошибки, то есть возможности неверного декодирования всего оставшегося слова. В 2015 г. Э. Арикан предложил способ разрешения данного недостатка в работе [3], в которой описал модификацию алгоритма SC – списочный алгоритм последовательного исключения (*successive-cancellation list*, SCL), в котором предлагается продолжать работу декодера, принимая во внимание оба решения относительно символа, при этом результатом работы алгоритма является не одно слово, а список слов. В качестве декодированного слова выбирается наиболее вероятное слово из сформированного списка. Важно заметить, что выбранное слово может не всегда соответствовать изначально передаваемому. Другой способ выбора результирующего кодового слова из списка слов кандидатов, формируемого списочным алгоритмом последовательного исключения, был предложен в работе [7]. В ней предлагается в качестве критерия выбора использовать CRC-код. Помимо возможности выполнять проверку контрольной суммы слова на выходе декодера, в показано, что предварительное кодирование с помощью CRC-кода влияет на минимальное расстояние кода.

РАС-коды (*polarization-adjusted convolutional codes*, РАС) были предложены в [8], также как попытка повлиять на минимальное расстояние полярных кодов. При кодировании используются две матрицы: сверточного кода, с помощью которой выполняется предварительное кодирование, и полярного кода. Формально процесс кодирования РАС-кодов можно описать с помощью следующих шагов: на первом шаге  $k$  информационных бит присваиваются на позиции несущего вектора  $\mathbf{u}$ , выбранные из множества  $\mathcal{A}$ . На втором шаге несущий вектор кодируется с помощью матрицы  $\mathbf{T}$  сверточного кода  $\mathbf{v} = \mathbf{u}\mathbf{T}$ . На третьем шаге вектор  $\mathbf{v}$  кодируется с помо-

щью матрицы полярного кода  $\mathbf{c} = \mathbf{vP}$ , то есть  $\mathbf{c} = \mathbf{vTP}$ . Интерес представляет следующий вопрос: какие коды могут быть использованы для предварительного кодирования, то есть в качестве матрицы  $\mathbf{T}$ . Рассмотрим применимость низкоплотностного кода на этапе предварительного кодирования.

**Результаты моделирования**

Опишем рассматриваемые при моделировании схемы кодирования.

1. *Полярный код.* Информационное слово  $\mathbf{m} = [m_1, \dots, m_K]$  размещается на позициях  $A$  несущего вектора  $\mathbf{u}$ , который кодируется с помощью порождающей матрицы  $\mathbf{G}$ , в результате получая кодовое слово  $\mathbf{x}$ . Для полярного кода используется алгоритм декодирования последовательного исключения (SC):

$$[c_1, \dots, c_N] = \underbrace{[u_1, \dots, u_N]}_{u_A = \mathbf{m}, u_F = \mathbf{0}} \mathbf{G}^{\otimes n}.$$

2. *Полярный код и CRC-код.* В данном случае  $A$  – число информационных символов, то есть скорость кода равна  $A/N$ . В этой схеме применяется списочный алгоритм декодирования (SCL):

$$\mathbf{v} = \underbrace{[m_1, \dots, m_A]}_K \text{ | CRC},$$

$$[c_1, \dots, c_N] = \underbrace{[u_1, \dots, u_N]}_{u_A = \mathbf{v}, u_F = \mathbf{0}} \mathbf{G}^{\otimes n}.$$

3. *PAC-код.* Сначала выполняется кодирование сообщения  $\mathbf{m} = [m_1, \dots, m_K]$ , помещенного в несущий вектор  $\mathbf{u}$ , с помощью сверточного кода, а затем с помощью полярного кода. В данной схеме применяется модифицированный списочный алгоритм декодирования (SCL) для PAC-кодов [11]:

$$[c_1, \dots, c_N] = \underbrace{[u_1, \dots, u_N]}_{u_A = \mathbf{m}, u_F = \mathbf{0}} \mathbf{G}_{CC} \mathbf{G}^{\otimes n}.$$

4. *Полярный код и низкоплотностный код.* Сообщение  $\mathbf{m}$  кодируется с помощью низкоплотностного кода, затем с помощью полярного. В этой схеме применяется списочный алгоритм декодирования (SCL):

$$\mathbf{v} = [m_1, \dots, m_A] \mathbf{G}_{LDPC},$$

$$[c_1, \dots, c_N] = \underbrace{[u_1, \dots, u_N]}_{u_A = \mathbf{v}, u_F = \mathbf{0}} \mathbf{G}^{\otimes n}.$$

Для проведения экспериментов был выбран полярный код со скоростью  $1/2$ , длиной  $N = 128$ . В списочных алгоритмах размер списка равен 8. Выполняется моделирование передачи с помощью двоичной фазовой модуляции в

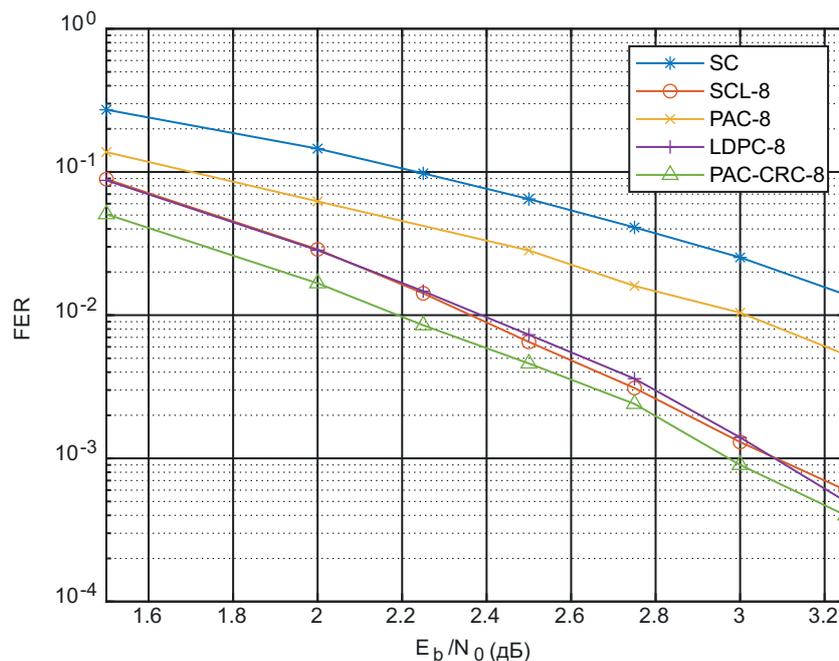


Рис. 1. Вероятность ошибки декодирования

канале с аддитивным белым гауссовским шумом. Сравнение производится по вероятности ошибки на информационное слово (frame error rate, FER). Замороженные позиций выбирались согласно варианту, предложенному в стандарте 5G [2]. На рис. 1 приведены результаты моделирования для различных схем кодирования. Можно заметить, что наименьшую вероят-

ность ошибки показывает схема с совместным использованием сверточного кода, CRC-кода и полярного кода, в то время как схема с низкоплотным кодом почти точно повторяет результат, полученный при декодировании по схеме с CRC-кодом.

На рис. 2 представлены результаты моделирования декодирования для схемы предвари-

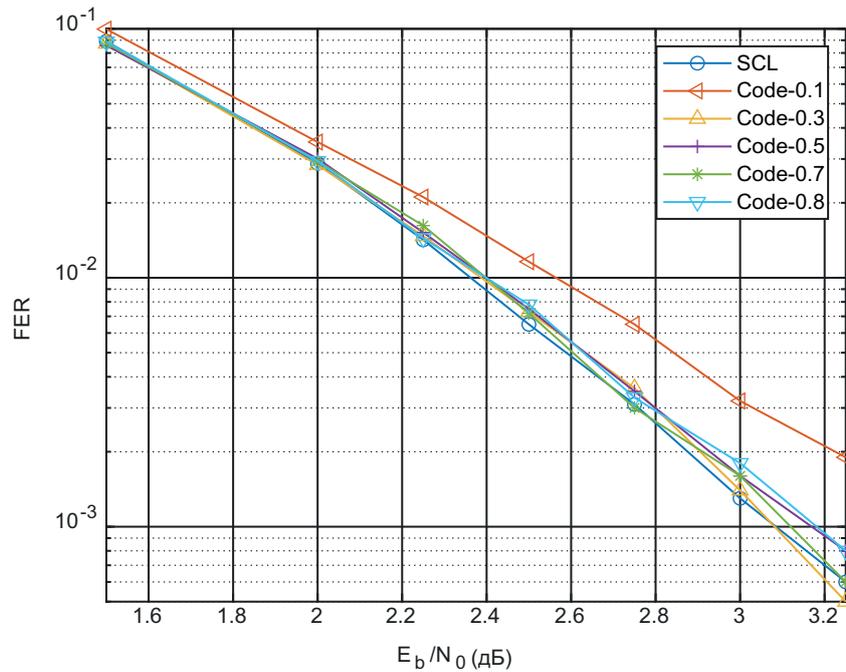


Рис. 2. Вероятность ошибки декодирования

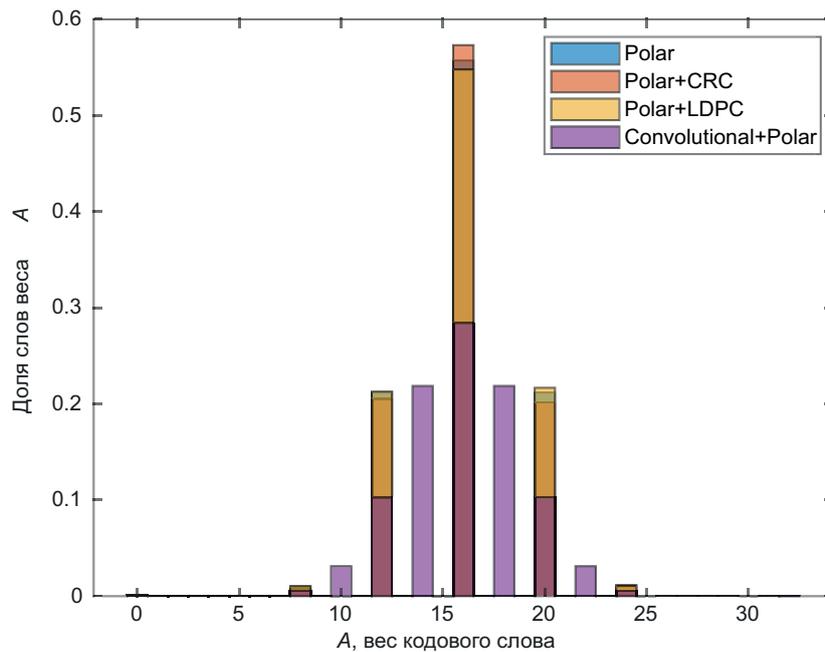


Рис. 3. Спектр кода

тельного кодирования с помощью кода с разной плотностью проверочной матрицы. Заметно, что код с малой плотностью обеспечивает наилучшую вероятность ошибки.

На рис. 3 приведены спектры кода длины  $N = 32$ , вычисленные для разных схем кодирования. Можно заметить, что при использовании сверточного кода для предварительного кодирования спектр кода размывает, в то время как спектры для схем с CRC-кодом и LDPC-кодом почти точно совпадают со спектром полярного кода.

### Заключение

В работе были рассмотрены схемы предварительного кодирования полярных кодов применительно к стандарту 5G. Выделены актуальные проблемы, которым подвержены полярные коды и описаны существующие варианты их решения. Рассмотрен вариант схемы кодирования, получаемый при замене CRC-кода и сверточного кода на низкоплотностный код. Приведены результаты декодирования при использовании разных схем предварительного кодирования полярных кодов при моделировании передачи в канале с АБГШ, показавшие, что схема с низкоплотностным кодом не уступает по вероятности ошибки схеме с CRC-кодом.

Работа основана на результатах, полученных в рамках образовательного модуля «Современные методы теории информации, оптимизации и управления», прошедшего со 2 по 23 августа 2020 в НТУ Сириус, Сочи, Россия.

### Библиографический список

1. *Arikan E.* Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2009. Vol. 55. N 7. P. 3051–3073.
2. 3rd Generation Partnership Project (3GPP) // Multiplexing and channel coding. 3GPP 38.212. 2018. Vol. 15.3.0.
3. *Tal I., Vardy A.* List decoding of polar codes // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2015. Vol. 61. N 5. P. 2213–2226.
4. *Kschischang F., Frey B., Loeliger H.* Factor graphs and the sum-product algorithm // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2001. Vol. 47. N 2. P. 498–519.
5. *Cammerer S.* Sparse graphs for belief propagation decoding of polar codes // 2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE. 2018. P. 1465–1469.

6. *Gallager R.* Low-density parity-check codes // *IRE Transactions on Information Theory*. 1962. Vol. 8. N 1. P. 21–28.

7. *Niu K., Chen K.* CRC-aided decoding of polar codes // *IEEE Communications Letters*. 2012. Vol. 16. N 10. P. 1668–1671.

8. *Arikan E.* From sequential decoding to channel polarization and back again // *arXiv preprint arXiv:1908.09594*. 2019.

9. Beta-expansion: a theoretical framework for fast and recursive construction of polar codes / G. He, J. Belfiore, I. Land et al. // *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Singapore, Dec. 2017.

10. *Condo C., Hashemi S., Gross W.* Efficient bit-channel reliability computation for multi-mode polar code encoders and decoders // *IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS)*, Lorient, France, Oct. 2017.

11. *Tal I., Vardy A.* List decoding of polar codes // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2015. Vol. 61. N 5. P. 2213–2226.

## ИНФОРМАЦИОННО-СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.325

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-217-222

М. П. Агеев\*, С. Ю. Гуков\*  
аспиранты

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ФОРМАТОВ КОДИРОВАНИЯ

Рассматриваются современные форматы кодирования изображений. Производится сравнение форматов JPEG с HEIF, JPEG с WebP и JPEG с AVIF. Делаются выводы о текущей доступности на рынке, даются прогнозы о дальнейших улучшениях и трендах.

**Ключевые слова:** графические форматы, сжатие изображений, HEIF, WebP, AVIF.

М. P. Ageev\*, S. Y. Gukov\*  
Postgraduate Students

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF NEW GRAPHIC ENCODING FORMATS

Modern image encoding formats are considered. JPEG vs HEIF (HEIC), JPEG vs WebP, and JPEG vs AVIF are compared. Conclusions are drawn about the current availability in the market and forecasts of further improvements and trends are given.

**Keywords:** graphic formats, image compression, HEIF, WebP, AVIF.

До сих пор самыми доминирующими графическими форматами являются JPEG и PNG, использующие алгоритмы сжатия с потерями. И на протяжении многих лет они продолжают обеспечивать правильный баланс между размером файла, качеством изображения и совместимостью. JPEG был создан около 30 лет назад, примерно в то же время, когда появилась самая первая веб-страница. Однако в то время как IT-технологии стремительно меняются, развиваются и выходят на новые рынки – смартфоны, «умные» часы, фитнес-браслеты и т. п. – графика в этих задачах все еще используется в формате JPEG.

Тем не менее уже давно всем очевидно, что IT-сфера нуждается в альтернативе JPEG, причем в такой, которая будет:

- также широко поддерживаться,
- иметь лучшую эффективность сжатия,
- иметь более широкий набор функций и настроек.

В статье рассматриваются и сравниваются несколько новых форматов изображений, которые вполне могут претендовать на то, чтобы

стать следующим JPEG: HEIC (HEIF), WebP и AVIF.

Ниже в табл. 1 представлены общие характеристики форматов, далее описанных более подробно.

### Формат HEIC (HEIF)

Формат HEIC (*High-Efficiency Image Container*) был разработан группой экспертов по MPEG (*Moving Picture Experts Group*) в соответствии со стандартом ISO / IEC 23008-12 в 2015 году, которая известна благодаря разработке видео- и аудиоформатов, таких как, например, MP3 или MP4. Здесь используются стандарты сжатия видео HEVC (*High-Efficiency Video Container*) или H.265 для кодирования изображений. Формат также известен под аббревиатурой HEIF (*High-Efficiency Image Format*) – «формат изображений высокой эффективности» [1].

С тех пор он был принят рядом производителей, включая Microsoft, Canon и Apple, которая в 2017 году для устройств с iOS 11 сделала этот

Таблица 1

Общие характеристики форматов

Характеристика	JPEG	HEIC (HEIF)	WebP	AVIF
прозрачность	–	+	+	+
сжатие с потерями	+	+	+	+
сжатие без потерь	–	+	+	+
анимация	–	+	+	+
поддержка ОС	все настольные ОС, все мобильные ОС	ios, mac os, android 9+, windows 10 2018 update+	windows 7+, android 7+	windows10+
поддержка браузеров	все	safari	chrome, opera	chrome
процент сжатия по сравнению с JPEG	–	выше на 50–60 %	выше на 25–34 %	выше до 50 %
возможность восстановить оригинал	–	+	–	+
поддержка битности	8 бит	16 бит	8 бит	16 бит

формат форматом по умолчанию, как замена JPEG, так как новый формат меньше по размеру, но сопоставим с ним по качеству.

Файл HEIC может содержать либо одно изображение, либо последовательность изображений, сохраненных в формате HEIF с метаданными, описывающими каждое изображение. Тем самым он может использоваться для хранения последовательностей изображений, таких как GIF-анимация или HDR-последовательность.

Еще одна особенность HEIF заключается в том, что он поддерживает прозрачность, как это делает PNG.

У этого формата есть еще одно преимущество, когда дело доходит до редактирования: возможность отменить любые изменения даже после сохранения, поскольку в таких файлах также хранится информация о редактировании изображений – например, о повороте и его обрезке.

Важно отметить, что в то время, как JPEG всегда производит 8-битные изображения с потерями (даже при самых высоких параметрах), HEIC может хранить 16-битные изображения с потерями и без потерь. Здесь имеется в виду, сколько различных цветов может хранить изображение. В то время как человеческий глаз не может различать между триллионами цветов доступных в 16-битном формате, большее количество цветов создает большую гибкость при редактировании фотографии. 8-битная фотография может быть отредактирована до такой степени, что в цветах появляются полосы, в то время как в 16-битной фотографии такого эффекта не возникает. Это делает HEIC похожим по своему потенциалу на исходный RAW-файл, с которым JPEG даже отдаленно не может конкурировать. И самое главное, он может хранить все эти

данные очень эффективно, что приводит к сравнительно небольшим размерам файлов [2].

Обобщив, можно сказать, что HEIC превосходит формат JPEG по следующим параметрам:

- улучшенные блики, детали теней и средние тона,
- расширенный динамический диапазон,
- 16-битные цвета (в отличие от 8-битного цветового профиля JPEG),
- информация о глубине,
- прозрачность,
- хранение списка изменений,
- хранение последовательности изображений (анимация, HDR и панорамные последовательности, серийная съемка и т. д.).

Новый формат довольно универсален, так как может объединить возможности нескольких форматов изображений – JPEG, PNG и GIF – в одном файле, сохраняя при этом высокое качество изображения.

### Формат WebP

WebP – формат изображений, созданный в 2010 году и развиваемый компанией *Google*. Этот формат обеспечивает сжатие изображений как с потерями, так и без них. Он был создан как альтернатива PNG и JPEG и отличается гораздо меньшим размером при том же качестве изображения. Некоторые крупные компании, такие как *Google*, *Facebook* и *eBay*, все чаще советуют использовать данный формат для сжатия изображений.

Согласно данным самих *Google*:

- WebP сжимает изображения без потерь на 26 % лучше, чем PNG,

- WebP сжимает изображения с потерями лучше, чем JPEG на 25–34 % при одинаковом индексе структурного сходства (SSIM),

- WebP поддерживает прозрачность без потерь (альфа-канал) при увеличении размера всего лишь на 22 %.

WebP использует новый алгоритм сжатия, поэтому искажение (т. е. деформация и ухудшение качества) выглядят иначе относительно других типов файлов. WebP оставляет четкие края фотографии, но при этом ухудшается детализация и текстура, что неизбежно при сжатии с потерями. В то время как сопоставимый JPEG-файл показывает дрожание на сплошных участках изображения, WEBP может похвастаться гладкими переходами даже на самых низких настройках качества. Недостаток этого в том, что лица людей могут выглядеть «пластиковыми» при низких настройках качества [3].

Есть еще пара особенностей формата WebP. Настройки сжатия не повторяют в точности таковые в JPEG. Не стоит ожидать, что 50 % качества JPEG будет соответствовать 50 % качеству WebP. В случае в WebP качество падает довольно стремительно, так что начинать лучше с наибольших значений и постепенно их уменьшать. Однако у WebP есть способность добавлять маску альфа-канала, так же как в PNG. В отличие от конкурирующего формата, изображение формата WebP можно сжать до одной десятой размера изображения в формате PNG.

Итак, делая выводы, можно выделить следующие преимущества формата изображений WebP:

- меньший размер файла,
- улучшенный алгоритм сжатия,
- более качественные переходы цветов,
- маска альфа-канала.

И следующие недостатки:

- пока что неполная поддержка браузерами,
- искажения имеют «пластиковый» вид (особенно на объектах людей),
- неудобный интерфейс экспорта.

### Формат AVIF

Формат изображения AVIF расшифровывается как «AV1 ImageFormat», так как он основан на алгоритме AV1. AV1 – это самый последний видекодек, разработанный *AllianceforOpenMedia*. Разработка видекодека AV1 стала результатом сотрудничества между *Google*, *Xiph* и *Cisco*, которые решили объединить свои собственные видекодеки в один открытый, бесплатный видекодек [4].

AVIF использует тот же контейнер HEIF, что и формат HEIC, используемый в камере iOS. AVIF и HEIC предлагают аналогичную производительность сжатия. Разница заключается в том, что HEIC основан на коммерческом, обремененном патентами формате H.265. В странах, разрешающих патенты на программное обеспечение, H.265 запрещено использовать без получения патентных лицензий. Он покрыт тысячами патентов, принадлежащих сотням компаний, которые разделились на две конкурирующие лицензионные организации. В настоящее время, когда видео в основном потребляется через бесплатные браузеры и приложения, старая модель лицензирования стала неустойчивой. Это создало огромный стимул для таких веб-гигантов, как *Google*, *Netflix* и *Amazon*, чтобы поддержать альтернативу бесплатных лицензий.

AVIF, так же как и базовый формат HEIF, предлагает типичные функции, ожидаемые от формата изображения, такие как: поддержка любого кодека изображения, возможность использования режима с потерями или без потерь для сжатия, поддержка различных субдискретизаций и битовых глубин и т. д. Кроме того, формат также позволяет хранить серию анимированных кадров (предлагая эффективную и долгожданную альтернативу анимированным gif-файлам), а также возможность указать альфа-канал (который имеет огромное применение в UI). Кроме того, поскольку формат основан на HEIF, он также позволяет сохранять метаданные, такие как цветовая гамма и информация о высоком динамическом диапазоне (HDR) [5].

Использование алгоритмов AV1 оказывается полезным как во времени обработки, так и в решении аппаратных проблем.

Некоторые из особенностей, которые делают AVIF потенциально лучше конкурентов, заключаются в следующем:

- AVIF поддерживает высокий динамический диапазон (HDR), который обеспечивает лучшее и яркое изображение,
- AVIF поддерживает как сжатие без потерь, так и сжатие с потерями,
- AVIF включает в себя альфа-канал,
- AVIF обеспечивает 8, 10 и 12-битную глубину цвета,
- бесплатная лицензия.

Однако при всех этих преимуществах есть и недостатки – скорость кодирования и отсутствие прогрессивного рендеринга.

Декодирование AVIF-изображений для отображения требует относительно большей мощности процессора, чем другие кодеки, но на практике оно остается достаточно быстрым.



*Рис. 1. Исходное изображение*

Даже бюджетные Android-устройства могут воспроизводить видео AV1 в формате FullHD без помощи аппаратного ускорения, а AVIF-изображения – это всего лишь один кадр видео AV1. Однако кодирование изображений AVIF происходит гораздо медленнее. На создание одного образа может уйти до нескольких секунд. AVIF поддерживает тайлинг, который ускоряет кодирование на многоядерных процессорах.

Второй существенный недостаток AVIF: в то время как прогрессивный JPEG может отображать более низкое качество изображения во время загрузки полного изображения, AVIF ничего не показывает на экране до тех пор, пока он не будет полностью загружен.

Поскольку AVIF – это довольно новый формат изображений, он по-прежнему не поддерживается большинством браузеров, плохо поддерживается устройствами и операционными системами, так как сохраняет изображение в формате .avif. Как следствие, его малая доступность на рынке.

#### **Практическое сравнение форматов**

В своем исследовании компания Netflix [6] проводила сравнительный анализ форматов JPEG и AVIF. В рассматриваемой статье будет произведен анализ форматов JPEG, AVIF, HEIC, WebP. Для его проведения необходимо произвести сжа-



*Рис. 2. Изображение в формате HEIC с коэффициентом сжатия 40 %*



Рис. 3. Изображение в формате AVIF с коэффициентом сжатия 80

Таблица 2

Сравнение размеров файлов после сжатия

Коэффициент сжатия (%)	HEIC	JPEG	WebP	AVIF
80	238 Кб	65 Кб	54 Кб	32 Кб
40	35 Кб	27 Кб	26 Кб	10 Кб
10	3 Кб	8 Кб	11 Кб	3 Кб

тие исходного кадра в разных форматах с разным коэффициентом сжатия. Размер в килобайтах исходного изображения составляет 711 Кб. На рис. 1 представлено исходное изображение.

В табл. 2 приведены размеры в Кб после сжатия для каждого из формата с разными коэффициентами сжатия.

Хочется отметить, что при коэффициенте сжатия 10 % абсолютно все форматы сильно искажают изображение. При коэффициенте сжатия 40 % меньше всего потерь у формата HEIC. На рис. 2 приведено исходное изображение после сжатия.

При высоком коэффициенте сжатия (80) лучшим форматом с точки зрения потерь стал также HEIC, но размер файла уменьшился только в 3 раза. Для сравнения у формата AVIF после сжатия при таком же коэффициенте размер файла уменьшился в 22 раза, при этом заметных потерь также не наблюдается. На рис. 3 представлено исходное изображение в формате AVIF.

## Заключение

В этой статье были рассмотрены современные графические форматы HEIC (HEIF), WebP и AVIF, которые имеют наибольшую перспективу в ближайшее время заменить самый популярный в наше время формат JPEG.

Произведены сравнения этих форматов изображений по общим характеристикам, возможностям и качеству сжатия.

На данный момент активно развиваются три формата – HEIC, WebP и AVIF. Все эти новые форматы имеют схожие возможности и закономерности, которые позволяют выделить тот факт, что современная тенденция заключается в объединении возможностей разных на данный момент форматов в один. Например, таких функций, как альфа-канал, то есть прозрачность (как в PNG), анимация (как в GIF) и сжатие без потерь. Также стоит отметить, что два из трех новых форматов позволяют сохранять процесс редактирования изображения и, соответственно, в любой момент восстановить оригинал.

Самым перспективным форматом из рассмотренных трех является AVIF. Это связано с тем, что он при высоком коэффициенте сжатия позволяет максимально эффективно сжать изображение без потери качества. AVIF является бесплатным в распространении, что может способствовать его скорейшей популяризации.

Все же, какой именно формат станет лидирующим в будущем, сложно предугадать, но мож-

но с точностью сказать, что JPEG скоро потеряет свои лидирующие позиции на рынке графических форматов.

#### Библиографический список

1. *Hannuksela M., Lainema J.* The High Efficiency Image File Format Standard // IEEE Signal Processing Magazine. Vol. 32. Issue: 4, July 2015.
2. *McKeown S.* Forensic Considerations for the High Efficiency Image File Format (HEIF) // 2020 International Conference on Cyber Security and Protection of Digital Services (Cyber Security).
3. *Zhanjun S., Shen K.* Research on the WebP Image Format // Advanced Graphic Communications, Packaging Technology and Materials. P. 271–277.
4. *Barman N., Martin M.* An Evaluation of the Next-Generation Image Coding Standard AVIF // 2020 Twelfth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX).
5. *Testolina M., Upenik E.* Comprehensive assessment of image compression algorithms // SPIE Optical Engineering + Applications, 2020.
6. *Mavlankar A., Cock J., Concolato C.* AVIF for Next-Generation Image Coding. URL: <https://netflixtechblog.com/avif-for-next-generation-image-coding-b1d75675fe4> (дата обращения: 15.12.2020).

УДК 621.396:681.323

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-223-227

**С. И. Зиятдинов\***

доктор технических наук, профессор

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА СЕЛЕКЦИИ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ

Рассматривается вопрос подавления коррелированных помех средствами селекции движущихся целей, реализованных на базе адаптивного комплексного режекторного фильтра первого порядка. Для устранения эффекта «слепых» скоростей использована модуляция периода повторения зондирующих импульсов в виде двух и более различных периодов повторения. Цель работы – исследование влияния модуляции периода повторения зондирующих импульсов на коэффициент подавления коррелированных помех.

Оптимизация параметров режекторного фильтра осуществлялась на основе критерия минимума средней дисперсии коррелированных помех на выходе фильтра за период модуляции частоты повторения.

Получены выражения для дисперсии коррелированных помех на выходе комплексного адаптивного фильтра при модуляции периода повторения. Приведены соотношения для нахождения оптимальных значений частоты настройки и коэффициентов режекторного фильтра, минимизирующих уровень коррелированных помех на их выходе.

Представлены графики зависимостей коэффициента подавления коррелированных помех от относительной величины девиации периода повторения зондирующих сигналов для различных значений ширины спектральной плотности коррелированных помех при оптимальных и неоптимальных значениях частоты настройки и коэффициентов режекторного фильтра. Показано, что использование модуляции периода повторения зондирующих импульсов приводит к снижению коэффициента подавления коррелированных помех. При этом адаптация весовых коэффициентов для принятых моделей режекторных фильтров и входных коррелированных помех обеспечивает увеличение коэффициента подавления.

Полученные результаты позволяют при разработке и исследовании систем селекции движущихся целей с учетом допустимых потерь коэффициента подавления коррелированных помех обоснованно выбрать величину девиации периода повторения зондирующих импульсов для решения задачи устранения эффекта «слепых» скоростей.

**Ключевые слова:** коррелированные помехи, режекторный фильтр, адаптация, модуляция периода повторения.

**S. I. Zyatdinov\***

Dr. Sc. Tech., Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## ADAPTIVE SELECTION SYSTEM FOR MOVING TARGETS

The issue of suppression of correlated interference by means of selection of moving targets implemented on the basis of adaptive complex first-order cutting filter is considered. Modulation of repetition period of probing pulses in the form of two or more different repetition periods is used to eliminate effect of "blind" rates.

Investigation of effect of modulation of repetition period of probing pulses on coefficient of suppression of correlated interference.

Optimization of the parameters of the notch filter was carried out on the basis of the criterion of minimum average dispersion of correlated interference at the output of the filter over the period of modulation of the repetition frequency.

Expressions are obtained for dispersion of correlated interference at output of complex adaptive filter at modulation of repetition period. Relations are given for finding optimal values of tuning frequency and coefficients of the notch filter, which minimize the level of correlated interference at their output. Diagrams of correlated interference suppression coefficient dependence on relative deviation value of repetition period of probing signals for different values of spectral density of correlated interference at optimal and suboptimal values of tuning frequency and coefficients of cutting filter are presented. It is shown that using modulation of repetition period of probing pulses results in reduction of coefficient of suppression of correlated interference. At the same time adaptation of weight coefficients for received models of notch filters and input correlated interference provides for increase of suppression coefficient.

The obtained results make it possible during development and study of systems of selection of moving targets taking into account allowable losses of coefficient of suppression of correlated interference to reasonably select deviation value of repetition period of probing pulses for solution of problem of elimination of effect of "blind" speeds.

**Keywords:** correlated interference, cutting filter, adaptation, modulation of repetition period.

При разработке систем оценки параметров и обнаружения сигналов, систем автоматического измерения угловых координат, дальности и скорости движения объектов для подавления коррелированных помех используются системы селекции движущихся целей (СДЦ) [1], [5]. В случаях неизвестных характеристик помех применяются адаптивные системы СДЦ, характеристики кото-

лированных помех используются системы селекции движущихся целей (СДЦ) [1], [5]. В случаях неизвестных характеристик помех применяются адаптивные системы СДЦ, характеристики кото-

рых изменяются в соответствии с частотными свойствами коррелированных помех [6]–[9].

На практике в зависимости от тактических задач системы СДЦ выполняются либо в виде режекторных фильтров различных порядков, либо в виде полосовых доплеровских фильтров [6], [7], [11], [12]. В обоих случаях существенным недостатком используемых средств подавления коррелированных помех и выделения сигналов от движущихся объектов является наличие эффекта «слепых» скоростей, когда при доплеровских частотах обрабатываемых сигналов, кратных частоте повторения импульсов, наблюдаются глубокие провалы в скоростной характеристике системы СДЦ [2].

Для устранения эффекта «слепых» скоростей используют, как правило, изменение периода следования (частоты повторения) зондирующих импульсов. В системах СДЦ, выполненных на базе доплеровских фильтров, осуществляется модуляция частоты повторения зондирующих импульсов. При этом, например, на отрезке времени  $T$  зондирующие импульсы излучаются с частотой повторения  $F_{п1}$ , а на следующем отрезке времени  $T$  – с частотой  $F_{п2}$  и т. д. [2], [13].

В случае использования для подавления коррелированных помех режекторных фильтров на базе схем череспериодного вычитания применяется модуляция периода повторения в виде, например, двух чередующихся периодов повторения  $T_{п1}$  и  $T_{п2}$ .

В работах [7], [13]–[15] показано, что коэффициент подавления коррелированных помех средствами СДЦ в значительной степени зависит от величины периода повторения зондирующих импульсов. При уменьшении периода повторения происходит увеличение коэффициента подавления коррелированных помех. Значение периода повторения в целом определяет тактические характеристики всего радиолокационного комплекса. Выбор минимального значения периода повторения зависит от максимальной однозначно измеряемой дальности до объекта. Максимальное значение периода повторения определяется минимальной величиной доплеровской частоты сигнала от движущегося объекта, при которой появляется существенный провал в скоростной характеристике системы СДЦ.

В статье рассматривается адаптивная система СДЦ на базе адаптивного комплексного режекторного фильтра первого порядка. Для устранения эффекта «слепых» скоростей использована модуляция периода повторения зондирующих импульсов. Исследование влияния модуляции периода повторения зондирующих импульсов на коэффициент подавления коррелированных помех адаптивным режекторным фильтром первого порядка составляет основное содержание статьи.

лированных помех адаптивным режекторным фильтром первого порядка составляет основное содержание статьи.

### Комплексный адаптивный режекторный фильтр первого порядка

Алгоритм работы рассматриваемого режекторного фильтра определяется следующим соотношением [16]–[18]:

$$z_{\text{ВЫХ}}(t) = z_{\text{ВХ}}(t) + az_{\text{ВХ}}(t - T_{\text{П}})e^{j\omega_0 T_{\text{П}}}, \quad (1)$$

где  $z_{\text{ВХ}}(t)$  и  $z_{\text{ВЫХ}}(t)$  – комплексные значения входной и выходной коррелированной помехи;  $a$ ,  $\omega_0 T_{\text{П}}$  – модуль и аргумент комплексного весового коэффициента;  $t = iT_{\text{П}}$ ,  $T_{\text{П}}$  – период следования отсчетов значений входной и выходной коррелированной помехи;  $i = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\omega_0$  – частота настройки зоны режекции фильтра.

При заданном периоде повторения  $T_{\text{П}}$  определим оптимальные значения модуля весового коэффициента  $a$  и частоты настройки  $\omega_0$  режекторного фильтра, минимизирующие уровень помехи на его выходе. Для этого найдем корреляционную функцию помехи на выходе режекторного фильтра:

$$B_{\text{ВЫХ}}(\tau) = \overline{[z_{\text{ВХ}}(t) + az_{\text{ВХ}}(t - T_{\text{П}})e^{j\omega_0 T_{\text{П}}}] \times [z_{\text{ВХ}}^*(t - \tau) + az_{\text{ВХ}}^*(t - T_{\text{П}} - \tau)e^{-j\omega_0 T_{\text{П}}}]}. \quad (2)$$

В данном выражении черта сверху означает статистическое усреднение; значок \* – комплексную сопряженность.

С учетом выражения (1) соотношение для корреляционной функции (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} B_{\text{ВЫХ}}(\tau) &= \overline{z_{\text{ВХ}}(t)z_{\text{ВХ}}^*(t - \tau) +} \\ &+ \overline{az_{\text{ВХ}}(t - T_{\text{П}})z_{\text{ВХ}}^*(t - \tau)e^{j\omega_0 T_{\text{П}} +} \\ &+ \overline{az_{\text{ВХ}}(t)z_{\text{ВХ}}^*(t - T_{\text{П}} - \tau)e^{-j\omega_0 T_{\text{П}} +} \\ &+ \overline{a^2 z_{\text{ВХ}}(t - T_{\text{П}})z_{\text{ВХ}}^*(t - T_{\text{П}} - \tau) =} \\ &= (1 + a^2)B_{\text{ВХ}}(\tau) - aB_{\text{ВХ}}(\tau - T_{\text{П}})e^{j\omega_0 T_{\text{П}}} - \\ &- aB_{\text{ВХ}}(\tau + T_{\text{П}})e^{-j\omega_0 T_{\text{П}}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $B_{\text{ВХ}}(\tau)$  – корреляционная функция комплексной входной помехи  $z_{\text{ВХ}}(t)$ .

Положив в (3)  $\tau = 0$ , находим дисперсию помехи на выходе рассматриваемого режекторного фильтра:

$$\sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = (1 + a^2)B_{\text{ВХ}}(0) + a[B_{\text{ВХ}}(-T_{\Pi})e^{j\omega_0 T_{\Pi}} + B_{\text{ВХ}}(T_{\Pi})e^{-j\omega_0 T_{\Pi}}], \quad (4)$$

Согласно [9] корреляционная функция входной стационарной комплексной помехи  $z_{\text{ВХ}}(t)$  имеет вид:

$$B_{\text{ВХ}}(\tau) = \sigma_{\Pi}^2 \rho_{\Pi}(\tau) (\cos \omega_{\Pi} \tau + j \sin \omega_{\Pi} \tau), \quad (5)$$

где  $\sigma_{\Pi}^2$ ,  $\rho_{\Pi}(\tau)$  и  $\omega_{\Pi}$  – дисперсия, огибающая коэффициента корреляции и средняя частота спектральной плотности входной комплексной помехи.

После подстановки (5) в (4) и проведения несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ВЫХ}}^2 &= \sigma_{\Pi}^2 \{ (1 + a^2) + a \rho_{\Pi}(T_{\Pi}) [e^{j(\omega_0 - \omega_{\Pi}) T_{\Pi}} + e^{-j(\omega_0 - \omega_{\Pi}) T_{\Pi}}] \} = \\ &= \sigma_{\Pi}^2 [1 + a^2 + 2a \rho_{\Pi}(T_{\Pi}) \cos \Delta \omega T_{\Pi}]. \end{aligned} \quad (6)$$

В данном соотношении  $\Delta \omega_0 = \omega_0 - \omega_{\Pi}$  – расстройка по частоте режекторного фильтра и средней частоты спектральной плотности входной помехи.

Для оптимизации параметров режекторного фильтра найдем значение его частоты настройки и коэффициента, минимизирующие дисперсию помехи на его выходе. Для этого необходимо решить следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_{\text{ВЫХ}}^2}{d\Delta\omega} = 0; \\ \frac{d\sigma_{\text{ВЫХ}}^2}{da} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Дифференцируя соотношение (6) по параметру  $\Delta\omega$ , получим:

$$\frac{d\sigma_{\text{ВЫХ}}^2}{d\Delta\omega} = 2a T_{\Pi} \rho_{\Pi}(T_{\Pi}) \sin \Delta \omega T_{\Pi}. \quad (8)$$

Приравняем производную (8) к нулю. В результате находим оптимальное значение частоты настройки режекторного фильтра  $\omega_{0opt} = \omega_{\Pi}$  ( $\Delta\omega = 0$ ).

Второе уравнение системы (7) имеет вид:

$$\frac{d\sigma_{\text{ВЫХ}}^2}{da} = 2a + 2\rho_{\Pi}(T_{\Pi}) \cos \Delta \omega T_{\Pi} = 0. \quad (9)$$

При  $\Delta\omega = 0$  из формулы (9) получим оптимальное значение модуля весового коэффициента рассматриваемого режекторного фильтра  $a_{opt} = \rho_{\Pi}(T_{\Pi})$ .

С учетом полученных результатов дисперсия помехи на выходе режекторного фильтра записывается следующим образом:

$$\sigma_{\text{ВЫХ min}}^2 = \sigma_{\Pi}^2 [1 - \rho_{\Pi}^2(T_{\Pi})].$$

В случае использования для устранения эффекта «слепых» скоростей двух чередующихся периодов повторения  $T_{\Pi 1}$  и  $T_{\Pi 2}$  выражение (6) для дисперсии помехи на выходе принимает вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ВЫХ1}}^2 &= \sigma_{\Pi}^2 [1 + a_1^2 + 2a_1 \rho_{\Pi}(T_{\Pi 1}) \cos \Delta \omega_1 T_{\Pi 1}]; \\ \sigma_{\text{ВЫХ2}}^2 &= \sigma_{\Pi}^2 [1 + a_2^2 + 2a_2 \rho_{\Pi}(T_{\Pi 2}) \cos \Delta \omega_2 T_{\Pi 2}]. \end{aligned}$$

Среднее значение дисперсии помехи на выходе режекторного фильтра при использовании двух чередующихся периодов повторения зондирующих импульсов составит:

$$\sigma_{\text{ср}}^2 = (\sigma_{\text{ВЫХ1}}^2 + \sigma_{\text{ВЫХ2}}^2) / 2.$$

При оптимальных значениях параметров  $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0$ ,  $a_{1opt} = -\rho_{\Pi}(T_{\Pi 1})$  и  $a_{2opt} = -\rho_{\Pi}(T_{\Pi 2})$  минимальное значение дисперсии помехи на выходе режекторного фильтра имеет вид:

$$\sigma_{\text{ср min}}^2 = \sigma_{\Pi}^2 \{1 - 0,5[\rho_{\Pi}^2(T_{\Pi 1}) + \rho_{\Pi}^2(T_{\Pi 2})]\}.$$

Коэффициент подавления коррелированной помехи, приведенный ко входу рассматриваемого режекторного фильтра, будем оценивать следующим соотношением:

$$K_{\text{под}} = \frac{4\sigma_{\Pi}^2}{\sigma_{\text{ср min}}^2} = 4\{1 - 0,5[\rho_{\Pi}^2(T_{\Pi 1}) + \rho_{\Pi}^2(T_{\Pi 2})]\}^{-1}.$$

Для конкретизации полученных результатов примем гауссову аппроксимацию огибающей коэффициента корреляции коррелированной помехи на входе [13], [19], [20]:

$$\rho_{\Pi}(\tau) = \exp(-\Delta\omega_{\Pi}^2 \tau^2 / 4),$$

где  $\Delta\omega_{\Pi}$  – ширина спектральной плотности помехи.

Графики зависимости коэффициента подавления коррелированной помехи от относительной величины девиации периода повторения  $\Delta T / T_{\Pi 1} = (T_{\Pi 2} - T_{\Pi 1}) / T_{\Pi 1}$  для различных значений ширины спектральной плотности коррелированной помехи  $\Delta f_{\Pi} = \Delta\omega_{\Pi} / 2\pi$  при оптимальных значениях параметров  $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0$ ,  $a_{1opt} = -\rho_{\Pi}(T_{\Pi 1})$  и

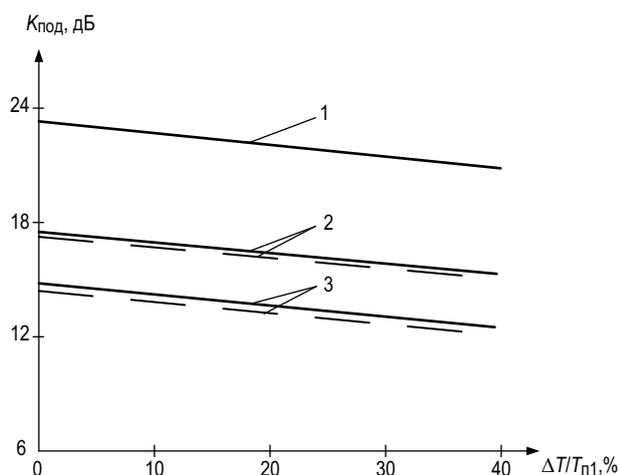


Рис. 1. Коэффициент подавления коррелированной помехи режекторным фильтром первого порядка  $1-\Delta f_n=30$  Гц,  $2-\Delta f_n=60$  Гц,  $3-\Delta f_n=90$  Гц

$a_{2opt}=-\rho_{п}(T_{п2})$  показаны на рис. 1 сплошной линией. Здесь же пунктирной линией представлены аналогичные зависимости для случая отсутствия адаптации весового коэффициента, который принимался равным  $a_1=a_2=-1$ . Расчеты проводились для  $T_{п1}=1$  мс.

Из полученных результатов следует, что использование для устранения эффекта «слепых» скоростей модуляции периода повторения зондирующих импульсов приводит к снижению коэффициента подавления коррелированных помех. Так, при реализации системы СДЦ в виде комплексного адаптивного режекторного фильтра первого порядка изменение относительной девиации периода повторения в пределах от 0 до 40 % и точной настройке фильтра на среднюю частоту спектральной плотности коррелированной помехи коэффициент подавления уменьшается на 1,8 дБ. Использование адаптации весового коэффициента для принятой модели режекторного фильтра при изменении относительной ширины спектральной плотности коррелированной помехи в пределах  $\Delta\omega_{п}T_{п1}=0,19\div 0,57$  ( $\Delta f_n=30\div 90$  Гц,  $T_{п1}=10^{-3}$  с) дает увеличение коэффициента подавления на 0,29 дБ.

## Заключение

Использование модуляции периода повторения зондирующих импульсов приводит к уменьшению значения коэффициента подавления коррелированных помех. Для системы СДЦ в виде комплексного режекторного адаптивного фильтра первого порядка изменение относи-

тельной девиации периода повторения в пределах от 0 до 40 % дает уменьшение коэффициента подавления на 1,8 дБ. Адаптация весовых коэффициентов режекторного фильтра к частотным свойствам коррелированных помех является практически сложной задачей. Для режекторного фильтра первого порядка при соотношении  $\Delta\omega_{п}T_{п1}=0,57$  адаптация весовых коэффициентов приводит к увеличению коэффициента подавления на 0,29 дБ.

## Библиографический список

1. Skolnik M. Radar Handboor. New Jork: McGraw-Hill, 2008. 1352 p.
2. Бакулев П. А., Стенин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 286 с.
3. Попов Д. И. Адаптивное обнаружение сигналов на фоне пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 4. С. 32–37.
4. Ястребов А. В. Адаптивный фильтр на основе методов степенных рядов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2017. № 1. С. 5–11.
5. Журавский В. Н., Силин С. И. Синтез адаптивного обнаружителя в спектральной области // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 12. С. 1277–1284.
6. Попов Д. И. Адаптивное подавление пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 4. С. 32–37.
7. Попов Д. И. Адаптация нерекурсивных режекторных фильтров // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2009. Т. 52. № 4. С. 46–55.
8. Зиятдинов С. И. Влияние рассогласования параметров квадратурных каналов на работу адаптивной системы селекции движущихся целей // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23. №3. С. 6–9.
9. Мичурин С. В. Влияние ошибок настройки квадратурных каналов когерентной системы на оценку параметров комплексного сигнала // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 6. С. 495–500.
10. Микропроцессорные системы автоматического управления / Под общ. ред. В. А. Бесекерского. Л.: Машиностроение. 1988. 355 с.
11. Kholodnyak D., Turgaliev A., Baskakova A. Method to Design Lumped-Element Tunable Bandpass Filters with Constant Absolute Bandwidth // Proc. off 44th Eur. Microwave Conf., Roma, 6–9 Oct. 2014. Nijkerk: EuMA, 2014. P. 335–338.
12. Баскакова А. Э., Тургалиев В. М., Холодняк Д. В. Перестраиваемый полосно-пропускной фильтр на элементах с сосредоточенными параметрами с независимым непрерывным управлением // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2016. № 3. С. 25–32.

13. *Попов Д. И.* Режективное пассивных помех при возбуждении периода повторения // Радиотехника. 2015. № 5. С. 97–101.
14. *Бакулев П. А.* Радиолокационные системы. М.: Радиотехника. 2004. С. 319.
15. Методы улучшения различимости объектов при наличии гидрометеоров / А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, К. В. Коротков., Е. П. Новичихин // Журн. Радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 1–14.
16. *Зиатдинов С. И., Соколова Ю. В.* Синтез комплексных дискретных фильтров // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 12–19.
17. *Зиатдинов С. И., Соколова Ю. В.* Синтез комплексных дискретных фильтров на основе переходных характеристик // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 7. С. 641–647.
18. *Котоусов А. С., Морозов А. К.* Оптимальная фильтрация и компенсация помех. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 166 с.
19. *Малинкин В. Б.* Адаптивные фильтры в телекоммуникационных системах. Новосибирск.: СибГУТИ, 2005. 223 с.
20. *Пинчук А. Н.* Модель пассивной помехи при радиолокации низковысотных целей над морской поверхностью // Радиоэлектроника. 2015. № 3. С. 15–19.

УДК 621.396:681.323

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-228-232

**С. И. Зиятдинов\***

доктор технических наук, профессор

\*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСНОГО СИГНАЛА ПРИ РАССОГЛАСОВАНИИ КВАДРАТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Рассматривается вопрос формирования на видеочастоте пары комплексно-сопряженных составляющих когерентной системы обработки сигналов, представленной двумя квадратурными каналами со сдвинутыми на девяносто градусов опорным напряжениями. Целью работы является исследование влияния практически неизбежных амплитудных и фазовых рассогласований параметров квадратурных каналов на частотные свойства комплексного сигнала.

Использован метод комплексной переменной, при котором выходные сигналы квадратурных каналов представляются в виде пары комплексно-сопряженных составляющих на видеочастоте.

Представлено выражение для спектральной плотности комплексного сигнала при отсутствии амплитудных и фазовых рассогласований параметров квадратурных каналов. Получены выражения для спектральной плотности выходного сигнала в случае неравенства коэффициентов передачи каналов и отличия от девяносто градусов фазового сдвига опорных напряжений при преобразовании на видеочастоту высокочастотных входных радиосигналов. Показано, что отклонение коэффициентов передачи и фазовое рассогласование квадратурных каналов когерентной системы приводит к появлению в выходном сигнале дополнительной вещественной составляющей, уровень которой определяется величиной отклонения коэффициентов передачи квадратурных каналов и значением фазового рассогласования опорных напряжений.

К качеству настройки квадратурных каналов когерентной системы обработки информации должны предъявляться весьма жесткие требования. Наличие амплитудных и фазовых рассогласований квадратурных каналов приводит к искажению спектральной плотности выходного комплексного сигнала. Ошибки настройки квадратурных каналов когерентной системы обуславливают появление в выходном сигнале квадратурных каналов вещественной составляющей, уровень которой пропорционален разности коэффициентов передачи и величине фазового отклонения опорных напряжений от девяносто градусов. Наличие в выходном сигнале квадратурных каналов когерентной системы вещественной составляющей может привести к ошибкам оценки амплитуды и частоты комплексного сигнала, к ошибкам при решении задач обнаружения сигналов, снижению качества работы систем селекции движущихся целей, систем автоматического сопровождения по угловым координатам, дальности и скорости. Представленные результаты будут полезны при разработке и исследовании разнообразных систем обработки информации с целью выявления влияния амплитудных и фазовых рассогласований параметров квадратурных каналов на характеристики систем.

**Ключевые слова:** квадратурные каналы, комплексный сигнал, коэффициент передачи, фазовый сдвиг, ошибки настройки, спектральная плотность.

**S. I. Zyatdinov\***

Dr. Sc. Tech., Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## SPECTRAL CHARACTERISTICS OF COMPLEX SIGNAL IN CASE OF MISALIGNMENT OF QUADRATURE COMPONENTS

The issue of forming at video frequency a pair of complex conjugate components of a coherent signal processing system represented by two quadrature channels with ninety-degree shifted reference voltages is considered. Investigation of influence of almost inevitable amplitude and phase misalignments of quadrature channel parameters on frequency properties of complex signal.

Method of complex variable is used, in which output signals of quadrature channels are represented in the form of pair of complex conjugated components at video frequency.

Expression for spectral density of complex signal in absence of amplitude and phase mismatches of quadrature channels parameters is presented. Expressions are obtained for spectral density of output signal in case of inequality of channel transmission coefficients and difference from ninety degrees of phase shift of reference voltages during conversion to video frequency of high-frequency input radio signals. It is shown that deviation of transmission coefficients and phase mismatch of quadrature channels of coherent system results in appearance in output signal of additional real component, level of which is determined by value of deviation of transmission coefficients of quadrature channels and value of phase mismatch of reference voltages.

The quality of setting quadrature channels of a coherent information processing system should be very stringent. Presence of amplitude and phase misalignments of quadrature channels leads to distortion of spectral density of output complex signal. Errors of adjustment of quadrature channels of coherent system cause appearance in output signal of quadrature channels of real component, level of which is proportional to difference of transmission coefficients and value of phase deviation of reference voltages from ninety degrees. The presence of quad-

ature channels in the output signal of the coherent system of the real component can lead to errors in estimating the amplitude and frequency of the complex signal, to errors in solving the problems of detecting signals, to a decrease in the quality of operation of selection systems for moving targets, automatic tracking systems by angular coordinates, range and speed. The presented results will be useful in the development and study of a variety of information processing systems in order to identify the effect of amplitude and phase misalignments of quadrature channel parameters on the characteristics of the systems.

**Keywords:** quadrature channels, complex signal, transmission coefficient, phase shift, adjustment errors, spectral density.

При построении когерентных систем обработки сигналов, таких как обнаружители и измерители параметров сигналов, систем селекции движущихся целей (СДЦ), систем автоматического сопровождения по дальности, угловым координатам и скорости, в большинстве практических случаев используется преобразование принимаемых высокочастотных радиосигналов на видеочастоту [1]–[6]. Данное преобразование осуществляется с помощью пары преобразователей (квадратурных каналов) со сдвинутыми на девяносто градусов опорными напряжениями. В результате формируется на видеочастоте комплексный сигнал в виде двух комплексно-сопряженных (квадратурных) составляющих, используя которые решаются все задачи обработки сигналов [7], [8].

Рассмотренные в литературе вопросы обработки комплексных сигналов на основе их квадратурных составляющих базируются на безошибочном преобразовании высокочастотных сигналов на видеочастоту.

На практике реализовать квадратурные каналы с абсолютно одинаковыми характеристиками не представляется возможным. Каналы могут иметь различные коэффициенты передачи, а используемые опорные напряжения иметь фазовый сдвиг, отличный от девяносто градусов. Данные погрешности приводят к ошибкам оценки таких важнейших параметров комплексного сигнала, как его амплитуда и частота, снижению качества работы системы СДЦ, систем автоматического сопровождения [9], [10]. Исследование влияния погрешностей реализации квадратурных каналов когерентной системы на частотные свойства комплексного сигнала составляет основное содержание статьи.

### Спектральные характеристики комплексного сигнала

В состав системы когерентной обработки сигналов устройств входят два множителя принимаемого высокочастотного сигнала  $u_{\text{вх}}(t)$  и опорных напряжений  $u_{\text{оп}}(t)$  и  $u_{\text{оп}}^*(t)$ , фильтры

нижних частот ФНЧ, генератор опорного напряжения ГОН и фазовращатель опорного напряжения на девяносто градусов.

Запишем комплексный выходной сигнал квадратурных каналов в виде:

$$z(t) = x(t) + jy(t),$$

где комплексно-сопряженные составляющие  $x(t)$  и  $y(t)$  в случае отсутствия ошибок преобразования представляются следующим образом [11], [12]:

$$\begin{aligned} x(t) &= U(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)]; \\ y(t) &= U(t) \sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)]. \end{aligned} \quad (1)$$

В соотношении (1)  $U(t)$  и  $\varphi_0(t)$  флюктуирующие амплитуда и начальная фаза квадратурных сигналов;  $\omega_0$  – средняя частота.

Выражения (1) позволяют записать комплексный сигнал  $z(t)$  в виде:

$$z(t) = U(t)e^{j[\omega_0 t + \varphi_0(t)]}. \quad (2)$$

Применим к (2) прямое преобразование Фурье. Тогда спектральная плотность комплексного сигнала  $z(t)$  будет определяться выражением:

$$\begin{aligned} G_{\text{ком}}(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} U(t)e^{j[\omega_0 t + \varphi_0(t)]} e^{-j\omega t} dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} U(t)e^{-j[(\omega - \omega_0)t + \varphi_0(t)]} dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Спектральная плотность комплексного сигнала является односторонней относительно нуля частот и может располагаться как в области положительных частот, так и в области отрицательных частот.

В дальнейшем будем считать, что квадратурные каналы имеют различные коэффициенты передачи, а фазовые сдвиги опорных напряжений имеет отличный от  $90^\circ$  фазовый сдвиг. В этом случае выходные сигналы квадратурных каналов можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} x(t) &= kU(t)\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t) + \Delta\varphi]; \\ y(t) &= U(t)\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $k=1+\Delta k$ ;  $\Delta k$  – отклонение коэффициентов передачи квадратурных каналов;  $\Delta\varphi$  – отклонение от  $90^\circ$  фазового сдвига опорных напряжений.

Рассмотрим отдельно влияние параметров  $\Delta k$  и  $\Delta\varphi$  на частотные свойства комплексного сигнала (4).

Влияние отклонения коэффициентов передачи квадратурных каналов на спектральную плотность комплексного сигнала

Для этого положим в (4)  $\Delta k \neq 0$  и  $\Delta\varphi = 0$ . Тогда выражения (4) примут вид:

$$\begin{aligned} x(t) &= kU(t)\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)]; \\ y(t) &= U(t)\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя соотношения (5), найдем спектральную плотность комплексного сигнала:

$$\begin{aligned} G_{\Delta k}(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) + jy(t)]e^{-j\omega t} dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \{kU(t)\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] + \\ &+ jU(t)\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)]\}e^{-j\omega t} dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставим в (6)  $k=1+\Delta k$ . В результате получим:

$$\begin{aligned} G_{\Delta k}(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \{U(t)\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] + \\ &+ jU(t)\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)]\}e^{-j\omega t} dt + \\ &+ \Delta k \int_{-\infty}^{\infty} U(t)\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)]e^{-j\omega t} dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Перепишем (7) в виде:

$$\begin{aligned} G_{\Delta k}(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} U(t)e^{j[\omega_0 t + \varphi_0(t)]}e^{-j\omega t} dt + \\ &+ \Delta k \int_{-\infty}^{\infty} U(t)\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)]e^{-j\omega t} dt. \end{aligned} \quad (8)$$

В выражении (8) первый интеграл представляет спектральную плотность комплексного сигнала, соответствующую спектральной плотности (3). Второй интеграл в (8) представляет спектральную плотность вещественного сигнала  $\Delta k U(t)\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)]$ , которая является двухсторонней относительно нуля частот [13]–[15].

Таким образом, можно записать, что

$$G_{\Delta k}(j\omega) = G_{\text{КОМ}}(j\omega) + G_{\text{Вещ}}(j\omega), \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} G_{\text{КОМ}}(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} U(t)e^{j[\omega_0 t + \varphi_0(t)]}e^{-j\omega t} dt; \\ G_{\text{Вещ}}(j\omega) &= \Delta k \int_{-\infty}^{\infty} U(t)\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)]e^{-j\omega t} dt. \end{aligned}$$

Из полученных результатов следует, что при отклонении коэффициентов передачи квадратурных каналов в спектре выходного сигнала кроме спектральной плотности комплексного сигнала появляется спектральная плотность вещественного сигнала, величина которой определяется разностью коэффициентов передачи квадратурных каналов.

#### Влияние фазового рассогласования квадратурных каналов на спектральную плотность комплексного сигнала

Положим, в (4)  $\Delta k = 0$  и  $\Delta\varphi \neq 0$ . Для этих условий квадратурные составляющие (4) записываются в виде:

$$\begin{aligned} x(t) &= U(t)\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t) + \Delta\varphi]; \\ y(t) &= U(t)\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)], \end{aligned} \quad (10)$$

Первое выражение в (10) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} x(t) &= U(t)\{\cos\Delta\varphi\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] - \\ &- \sin\Delta\varphi\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)]\}. \end{aligned}$$

Тогда выходной сигнал записывается в виде

$$\begin{aligned} z(t) &= U(t)\{\cos\Delta\varphi\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] - \\ &- \sin\Delta\varphi\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)] + j\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)]\}. \end{aligned} \quad (11)$$

В выражении (11) сделаем следующую подстановку  $\cos\Delta\varphi = 1-d$ . В результате (11) можно представить как

$$\begin{aligned} z(t) &= U(t)\{\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] + j\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)] - \\ &- U(t)\{d\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] + \sin\Delta\varphi\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)]\} = \\ &= U(t)e^{j[\omega_0 t + \varphi_0(t)]} - U(t)\{d\cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] + \\ &+ \sin\Delta\varphi\sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)]\}. \end{aligned} \quad (12)$$

В полученной соотношении (12) первое слагаемое является комплексным сигналом и определяет спектральную плотность  $G_{\text{КОМ}}(j\omega)$  комплексной составляющей выходного сигнала квадратурных каналов, второе слагаемое является вещественным сигналом и определяет спектральную плотность  $G_{\text{ВЕЩ}}(j\omega)$  вещественной составляющей выходного сигнала квадратурных каналов.

Найдем составляющую  $G_{\text{ВЕЩ}}(j\omega)$  выходного сигнала квадратурных каналов. Для этого ко второму слагаемому выражения (12) применим прямое преобразование Фурье:

$$G_{\text{ВЕЩ}}(j\omega) = d \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] e^{-j\omega t} dt + \sin \Delta\varphi \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)] e^{-j\omega t} dt. \quad (13)$$

Соотношение (13) перепишем в виде:

$$G_{\text{ВЕЩ}}(j\omega) = dG_{\text{ВЕЩ}}^*(j\omega) + \sin \Delta\varphi G^*(j\omega), \quad (14)$$

где

$$G_{\text{ВЕЩ}}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] e^{-j\omega t} dt$$

– спектральная плотность вещественного сигнала  $U(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)]$ ,

$$G^*(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)] e^{-j\omega t} dt$$

– спектральная плотность вещественного сигнала  $U(t) \sin[\omega_0 t + \varphi_0(t)]$ .

При малых углах фазового рассогласования квадратурных каналов  $\Delta\varphi$ , не превышающих единиц градусов, с учетом того, что  $d \approx \Delta\varphi^2 / 2 \ll \Delta\varphi$ , выражение (14) можно представить следующим образом:

$$G_{\text{ВЕЩ}}(j\omega) \approx \Delta\varphi G^*(j\omega).$$

В результате спектральная плотность выходного сигнала квадратурных каналов принимает вид:

$$G_{\Delta\varphi}(j\omega) = G_{\text{КОМ}}(j\omega) + G_{\text{ВЕЩ}}(j\omega). \quad (15)$$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при фазовом рассогласовании квадратурных каналов в спектре выходного сигнала присутствуют как спектральная плотность

комплексного сигнала, так и спектральная плотность вещественного сигнала, величина которой определяется уровнем фазового рассогласования каналов.

## Заключение

К качеству настройки когерентной системы обработки сигналов должны предъявляться весьма жесткие требования. Наличие амплитудных и фазовых рассогласований квадратурных каналов обуславливает искажение спектральной плотности выходного комплексного сигнала. Ошибки настройки квадратурных каналов когерентной системы приводят к появлению в выходном сигнале каналов вещественной составляющей, уровень которой пропорционален разности коэффициентов передачи и величине фазового отклонения опорных напряжений от девяносто градусов. Наличие в выходном сигнале квадратурных каналов когерентной системы вещественной составляющей может привести к ошибкам оценки параметров комплексного сигнала, к ошибкам при решении задач обнаружения сигналов, снижению качества работы систем селекции движущихся целей, систем автоматического сопровождения по угловым координатам, дальности и скорости.

## Библиографический список

1. Фельдман Ю. И., Гидаспов Ю. Б., Гомзин В. Н. Сопровождение движущихся целей. М.: Радио и связь, 1978. 287 с.
2. Бакулев П. А., Стенин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 286 с.
3. Попов В. И. Оценивание корреляционных параметров пассивных помех // Радиопромышленность. 2017. Т. 27. № 1. С. 57–62.
4. Попов Д. И. Адаптивное подавление пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 4. С. 32–37.
5. Котоусов А. С., Морозов А. К. Оптимальная фильтрация и компенсация помех. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 166 с.
6. Кокошкин А. В., Коротков В. А., Коротков К. В. Методы улучшения различимости объектов при наличии гидрометеоров // Радиотехника. 2015. № 10. С. 12–16.
7. Зиятдинов С. И., Соколова Ю. В. Синтез комплексных дискретных фильтров // Изв. вузов. Радиотехника. 2017. № 4. С. 12–19.

8. *Зиатдинов С. И., Соколова Ю. В.* Синтез комплексных дискретных фильтров на основе переходных характеристик // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 7. С. 641–647.

9. *Мичурин С. В.* Влияние ошибок настройки квадратурных каналов когерентной системы на оценку параметров комплексного сигнала // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63. № 6. С. 495–500.

10. *Зиатдинов С. И.* Влияние рассогласования параметров квадратурных каналов на работу адаптивной системы селекции движущихся целей // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 2020. Т. 23. № 3. С. 25–31.

11. *Попов Д. И.* Адаптивное обнаружение сигналов на фоне пассивных помех // *Радиотехника*. 2017. № 70. С. 5–10.

12. *Попов Д. И.* Оценка параметров пассивных помех // *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2013. Т. 56. № 4. С. 39–47.

13. *Тихонов В. И.* Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 623 с.

14. *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1975. 391 с.

15. Методы улучшения различимости объектов при наличии гидрометеоров / А. В. Кokoшкин, В. А. Коротков, К. В. Коротков, Е. П. Новичихин // *Журн. Радиоэлектроника*. 2015. № 1 10. С. 1–14.

УДК 621.391.1

DOI: 10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-233-237

**В. А. Кузнецов\***

кандидат технических наук, доцент

\*Санкт-петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## УСКОРЕННЫЙ РАСЧЕТ СКАЛЯРНЫХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ ДЛЯ ВТОРОГО АЛГОРИТМА ЧЕЙЗА ПРИ ДЕКОДИРОВАНИИ БЛОКОВЫХ ТУРБОКОДОВ НА ОСНОВЕ ПАРИТЕТНОГО КОДА

Приводятся результаты разработки алгоритма поиска мягкого решения и конкурирующих слов, которые используются для расчета дополнительной информации обмена между итерациями декодирования блоковых турбокодов произведения. Показано, что второй алгоритм Чейза может быть использован для декодирования паритетного кода лишь при определенных параметрах декодера. В качестве подтверждения теоретического расчета сложности приводится тестирование реализованных алгоритмов при различных параметрах паритетных кодов.

**Ключевые слова:** блоковые турбокоды, алгоритм декодирования Чейза, паритетный код.

**V. A. Kuznetsov\***

PhD Sc. Tech., Associate Professor

\*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

## FAST CORRELATION TERM CALCULATION FOR SECOND CHASE ALGORITHM IN THE PROCESS OF DECODING BLOCK TURBO CODES BASED ON THE SINGLE PARITY BLOCK CODE

The article presents the algorithm for computation of a soft solution and competing words, which are used to calculate additional information for exchange between iterations of decoding of block turbo codes. It is shown that the second Chase algorithm can be used to decode a parity code only with some decoder parameters. For verification of the theoretical computational complexity, the testing of the implemented algorithms with various parameters of single parity code is given.

**Keywords:** block turbo codes, chase decoding algorithm, single parity block code.

### Введение

Паритетный код прост для реализации в качестве базового для построения многомерных блоковых турбокодов произведения [1]–[3]. При том, что код обладает низкой корректирующей способностью, он часто используется в комбинации с другими базовыми кодами, а также может быть единственным базовым кодом при увеличении количества измерений турбокода с добавлением коротких паритетных кодов. В статье паритетный код определяется размером передаваемого слова  $N$ , количество проверочных символов всегда равно 1.

Рассматривается этап расчета дополнительной информации обмена между итерациями при декодировании турбокодов произведения, общая схема процесса декодирования представлена на рис. 1.

Дополнительная информация вычисляется на основе мягкого решения  $D$ , конкурирующих



Рис. 1. Общая схема декодирования

слов  $C$  для каждой битовой позиции и принятой последовательности  $R$ . Мягкое решение  $D$  на каждой итерации соответствует минимуму Евклидова расстояния [1] или максимуму скалярного произведения с принятой последовательностью  $R$ . Конкурирующее слово  $C_j$  – ближайшее к принятой последовательности слово, которое отличается в текущей битовой позиции от мягкого решения  $D$ :

$$w_j = \frac{\left( \sum_{l=1}^N r_l d_l - \sum_{l=1}^N r_l c_l \right)}{2} d_j - r_j. \quad (1)$$

Для определения скалярных произведений наиболее затратой задачей является перебор кодовых слов для определения мягкого решения слова и конкурирующих слов для каждой позиции бита. Само конкурирующее слово для вычисления (1) не требуется, необходимо определение скалярного произведения от входной последовательности до ближайшего слова, содержащего в текущей позиции отличный символ. Иными словами, для вычисления (1) достаточно вычислить два максимальных значения скалярных произведений для каждой позиции:  $\max_j^{+1}$  и  $\max_j^{-1}$ .

Для значительного ускорения поиска мягкого решения со снижением корректирующей способности в [1] при декодировании кодов Хэмминга предлагается использовать второй алгоритм Чейза [4]. Основным отличием его применения в [1]–[3] является определение, помимо мягкого решения  $D$ , конкурирующих слов  $C$ . Параметром алгоритма Чейза-Пиндиаха является количество слабых позиций  $L$ . Важно отметить, что для паритетных кодов процедура вычисления (1) может быть корректно осуществлена без использования второго алгоритма Чейза и необходимости полного перебора кодовых слов.

### Алгоритм Чейза-Пиндиаха

Входными данными для алгоритма мягкого декодирования Чейза-Пиндиаха являются: количество бит в передаваемом слове  $N$ , количество слабых позиций  $L$ , входная последовательность  $R\{R_{N-1}, R_{N-2}, \dots, R_0\}$ , где  $R_i$  принадлежит интервалу  $[-1, 1]$ . Для входной последовательности применяется арифметика с насыщением.

Алгоритм Чейза-Пиндиаха предполагает следующую последовательность вычислений:

1. Определить позиции  $L$  наименьших значений  $B\{B_{L-1}, B_{L-2}, \dots, B_0\}$  в последовательности  $R$ , где  $B_g = i$ , который соответствует некоторому  $g$  минимуму  $\min_g = R_i$ .

2. Сформировать набор пробных векторов  $F_k\{F_{N-1}, F_{N-2}, \dots, F_0\}$ , где  $F_i$  может принимать значения 0 или 1, а  $k = 1 \dots 2^L$ . Для позиций  $B$  сформировать все возможные наборы значений 0 или 1. Остальные позиции входной последовательности вся все пробных векторов задать равными

$$\begin{aligned} F_i &= 1, R_{Bi} > 0 \\ F_i &= 0, R_{Bi} \leq 0 \end{aligned}$$

3. Для каждого пробного вектора произвести операцию жесткого декодирования и рассчитать бит паритета в случае его наличия в ис-

пользуемом коде. Для паритетного кода необходимо рассчитать только бит паритета.

4. Вычислить  $S_k = F_{N-1}R_{N-1} + \dots + F_0R_0$  скалярное произведение входной последовательности и каждого модулированного пробного вектора. Так как значения модулированных пробных векторов могут принимать значения  $-1$  или  $1$ , то операция умножения заменяется на операцию изменения знака, для некоторых знаковых типов данных может быть использована операция «исключающее или» к знаковому разряду  $R_i[N-1] \wedge \sim F_i[N-1]$ .

5. Пробный вектор  $F_k$  будет являться мягким решением  $D$ , если скалярное произведение будет максимальным  $S_k = S_{\max}$ . Пробный вектор  $F_k$  будет являться конкурирующим словом  $C_j$ , если скалярное произведение будет максимальным  $S_k = S_{\max j^-}$  при противоположном значении бита в позиции  $j$  значению бита в той же позиции мягкого решения  $D$ .

6. Вычисление дополнительной информации по формуле (1) в позиции  $j$ , где есть конкурирующее слово. Формулу (1) можно переписать следующим образом:

$$w_j = \frac{(S_{\max} - S_{\max j^-})}{2} d_j - r_j. \quad (2)$$

В дальнейшем этот алгоритм будем именоваться алгоритм 0. Для него расчет скалярных произведений потребует:  $2^L(N-1)$  операций сложения и  $2^L N$  операций изменения знака,  $2^L N$  операций XOR-сдвиг для вычисления паритетного бита.

Для ускоренного расчета алгоритм Чейза-Пиндиаха может быть реализован следующим образом.

1. Для текущего значения  $L$  сформировать  $2^L$  частичных пробных векторов  $F\{F_{LP}, F_{L-1}, F_{L-2}, \dots, F_0\}$ , где  $F_{LP}$  – бит паритета между битами слабых позиций.

2. Определить позиции  $L$  наименьших значений  $B$  с сортировкой  $R$  таким образом, что значения слабых позиций начинаются от нуля, то есть  $B_{L-1} = L-1, B_0 = 0$ . В старшем бите паритет.

3. Рассчитать скалярное произведение  $S_k^{LP} = F_{L-1}R_{L-1} + \dots + F_0R_0$  для бит слабых позиций по алгоритму.

4. Однократно вычислить скалярное произведение  $S_k^{N-L-1} = F_{N-2}R_{N-2} + \dots + F_LR_L$  для всех бит, кроме паритетного и бит слабых позиций.

5. Однократно вычислить  $F_{N-L-1}$  бит паритета для всех  $N-L-1$  бит, кроме паритетного и бит слабых позиций.

6. Выполнить для всех пробных векторов  $F_p = F_{N-L-1} \wedge F_{LP}$ .

7. Сложить для всех пробных векторов  $S_k = S_k^{N-L-1} + S_k^{LP} + F_p R_p$ .

8. При каждом вычислении сравнивать  $S_k$  с максимумом по единицы в соответствующих  $j$  позициях  $S_{\max j+1}$  максимумом по нулю  $S_{\max j-1}$ .

9. Вычисление дополнительной информации по формуле (2) в позиции  $j$ , где есть конкурирующее слово.

В дальнейшем этот алгоритм будем именоваться алгоритм 1. При фиксированной схеме перебора бит слабых позиций для алгоритма расчета скалярных произведений потребуется

$$\sum_{l=1}^{L-1} 2^l = 2^L - 2 \text{ операций сложения и } 2^L - 2 \text{ опера-}$$

ций изменения знака. Также для расчета скалярных произведений потребуется  $N-L-1$  операция сложения и изменения знака остальной части и паритета,  $2^L$  сложений суммы слабых позиций и остальной части,  $2^L$  сложений и изменения знака для добавления в сумму паритета,  $N-L + 2^L$  операций XOR-сдвиг для вычисления паритетных бит.

**Алгоритм без перебора пробных векторов**

Стоит отметить, что если в каждой позиции пробного вектора инвертировать бит, то наиболее правдоподобное слово будет соответствовать  $S_{\max} - 2 * F_{\min} R_{\min} - 2 * F_j R_j$  при индексе минимального значения  $R_{\min}$  и  $\min \neq j$ . При  $\min = j$  необходимо вместо  $R_{\min}$  использовать значение следующего минимума. Значение  $S_{\max}$  может быть получено как скалярное произведение  $R$  на вектор  $F$ , такой что

$$\begin{aligned} F_j = 1, R_j > 0 \\ F_j = 0, R_j \leq 0 \end{aligned}$$

при этом  $F_{\min} = \sim F_{\min}$  в случае, если  $F_{N-1} \wedge F_{N-2} \wedge \dots \wedge F_0 = 1$ .

Такой алгоритм не требует перебора пробных векторов и поиска конкурирующих слов и может быть реализован следующим образом.

1. Определить позиции 2 наименьших значений  $B$  с сортировкой  $R$  таким образом, что позиции минимальных значений считаются от нуля, то есть  $B_1 = 1, B_0 = 0$ . Важно, что позиция паритета также сортируется.

2. Вычислить  $F_{pc} = F_{N-1} \wedge F_{N-2} \wedge \dots \wedge F_0$ . Если  $F_{pc} = 0$ , то паритет сошелся, если нет, то инвертировать минимальный бит, который располагается в позиции 0.

3. Вычислить скалярное произведение  $S_{\max}$  мягкого решения и входной последовательности.

4. Вычислить  $S^{-1} = S_{\max} - 2 * F_{\min} R_{\min}$ .

5. Для нулевой позиции присвоить  $R_{\min} = R_{\min 2}$ .

6. Для каждой позиции в пробном векторе вычислить скалярные произведение входной последовательности и конкурирующего слова  $S_{\max j} = S^{-1} - 2 * F_j R_j$ .

7. Вычисление дополнительной информации по формуле (2) в каждой позиции  $j$ .

В дальнейшем этот алгоритм будем именоваться алгоритм 2. Для расчета скалярных произведений потребуется: по пункту 3 требуется  $N-1$  операций сложения и изменения знака; 1 сложение, 1 инвертирование знака, 1 удвоение (сдвиг) для расчета  $S_{-1}$  по пункту 5;  $N$  сложений и  $N$  изменения знака,  $N$  удвоение (сдвигов);  $N-1$  операций XOR-сдвиг для вычисления паритетных бит. Для сравнения данные по трем алгоритмам объединены в табл. 1.

Удвоение может быть заменено операцией сдвига при работе с типом данных с фиксированной запятой. Для упрощения процедуры сортировки допустимо использовать в качестве значения  $R_{\min 2}$  любого бита, что приведет к несоответствию максимума правдоподобия в этой позиции.

Таблица 1

Сравнение количества операций, выполняемых алгоритмами

	Сложений (ADD)	Инвертирование знака (INV)	XOR-сдвиг для расчета бита паритета	Удвоение (сдвиг)	Условное инвертир. нулевого бита	Объем сортировки	Сравнение с максимумом
Алгоритм 0	$2^L(N - 1)$	$2^L N$	$2^L$ по $N$	0	0	$L$	$2^L N$
Алгоритм 1	$3 * 2^L + N - L - 3$	$2 * 2^L + N - L - 3$	1 по $N-L + 2^L$	0	0	$L$	$2^L N$
Алгоритм 2	$2 * N + 1$	$2 * N + 1$	1 по $N$	$N + 1$	1	2	-

Таблица 2

## Результат тестирования работы алгоритмов

Параметры кода	Алг. 0 L	Теоретически, количество операций (ADD/INV)			Экспериментально, тактов		
		Алг. 1	Алг. 2	Алг. 0	Алг. 1	Алг. 2	
N							
5	2	16 / 20	12 / 8	11 / 11	1003	652	564
5	3	32 / 40	23 / 15	11 / 11	1687	971	564
7	2	24 / 28	14 / 10	15 / 15	1446	934	872
7	3	48 / 56	25 / 17	15 / 15	2441	1399	872
10	2	36 / 40	17 / 13	21 / 21	1910	1200	1156
10	3	72 / 80	28 / 20	21 / 21	3047	1820	1156
10	4	144 / 160	51 / 35	21 / 21	5330	2895	1156
16	2	60 / 64	23 / 19	33 / 33	3303	2028	2234
16	3	120 / 128	34 / 26	33 / 33	6564	3029	2234
16	4	340 / 256	57 / 41	33 / 33	8664	5032	2234
16	5	480 / 512	104 / 92	33 / 33	13971	8633	2234
16	6	960 / 1024	199 / 135	33 / 33	25439	15402	2234

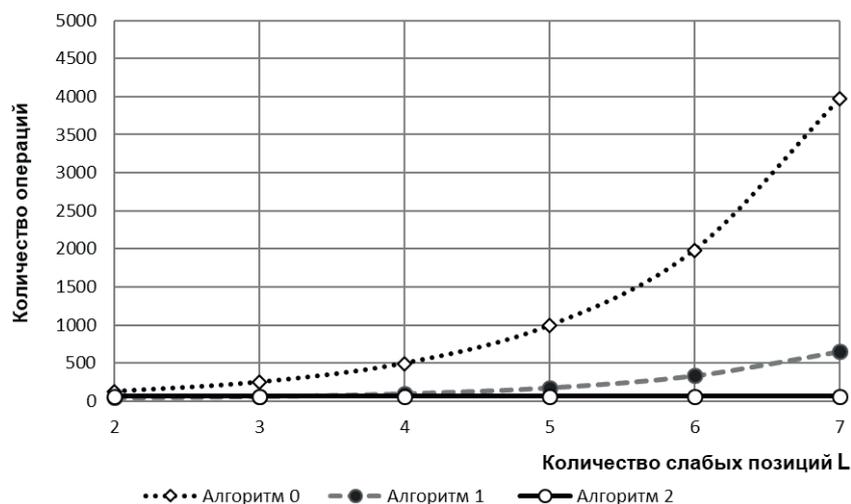


Рис. 2. Суммарное количество операций для различных алгоритмов при N=16 и разном количестве слабых позиций

## Результат тестирования

Тестирование реализованных алгоритмов проводилось с использованием команды `rdtsc` для измерения разницы счетчика тактов до и после выполнения процесса. Для получения более надежного измеренного значения использована выборка из 100 различных последовательных измерений. При расчете среднего значения в выборке были отброшены 20 максимальных

значений. Результаты теоретического и экспериментального сравнения быстродействия алгоритмов вычисления дополнительной информации представлены в табл. 2 и рис. 2.

## Вывод

Избыточная необходимость осуществления поиска конкурирующих слов алгоритмом Чей-

за-Пиндиаха в значительной степени усложняет его применение для паритетного кода. Очевидным недостатком использования алгоритма Чейза-Пиндиаха для декодирования паритетного кода также является наличие конкурирующих слов только слабых позиций и позиции бита паритета, что требует альтернативного способа вычисления для остальных позиций при достаточно большом объеме вычисления. Однако данный алгоритм может быть модифицирован и использован для декодирования турбокодов произведения на основе кода Хэмминга или кода Голя, для которых необходимо вычисление синдрома с последующей коррекцией пробных векторов.

### Библиографический список

1. *Pyndiah R.* Near Optimum Decoding of Product Codes: Block Turbo Codes // *IEEE Trans. Commun.* Vol. 46. P. 1998. 1003–1010.
2. Near optimum decoding of product codes / *R. Pyndiah, A. Glavieux, A. Picart, S. Jacq* // *Proc. of GLOBECOM.* Vol. 1. 1994. P. 339–343.
3. *Goalic A., Pyndiah R.* Real-time turbo decoding of product codes on a digital signal processor. 1997. P. 267–270.
4. *Chase D.* A class of algorithms for decoding block codes with channel measurement information // *IEEE Trans. Inform. Theory, IT-18.* 1972. P. 170–182.

**Агеев Михаил Павлович**

ассистент кафедры информационно-сетевых технологий. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
kylesp@rambler.ru

**Аграновский Андрей Владимирович**

кандидат технических наук, доцент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – современные информационные технологии, информатизация общества  
agr3691@mail.ru

**Акопян Белла Кареновна**

ассистент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, современная биомедицинская электроника, моделирование в среде MathCAD, распознавание образов, компьютерная обработка изображений  
akopyan.bella@yandex.ru

**Балонин Юрий Николаевич**

инженер кафедры вычислительных систем и сетей. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – вычислительные методы, теория чисел, моделирование с использованием сред компьютерной математики  
tomaball@mail.ru

**Борисовская Анна Владимировна**

ассистент кафедры инфокоммуникационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии, системы передачи данных  
borisovskaya@k36.org

**Бостанбеков Кайрат Аратович**

заместитель руководителя Национальной научной лаборатории коллективного пользования информационных и космических технологий. Казахский Национальный Технический Университет им. К. И. Сатпаева. Область научных интересов – информационные технологий, экология, энергетика  
kairat.boss@gmail.com

**Веселов Антон Игоревич**

кандидат технических наук, доцент кафедры инфокоммуникационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – машинное обучение, теория информации  
aveselov@guap.ru

**Веселова Виктория Алексеевна**

студентка кафедры безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
kafedra51.info@guap.ru

**Витвинов Валерий Константинович**

инженер лаборатории интернета вещей инженерной школы. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – беспроводные технологии, системы передачи данных с низким энергопотреблением  
vitvinov-98@mail.ru

**Георгиев Георги Димитров**

кандидат технических наук, исследователь, руководитель. Центр энергетических решений. Область научных интересов – моделирование электрических систем, их мониторинг и управление, возобновляемые источники энергии  
georgidg@gmail.com

**Глушкова Екатерина Максимовна**

студентка кафедры компьютерных технологий и программной инженерии. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – обработка естественных языков, статистический анализ данных  
cate.glushkova@yandex.ru

**Горелик Денис Вадимович**

аспирант кафедры вычислительных систем и программирования. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – системы динамического распараллеливания в кластерных системах  
den5509@mail.ru

**Григорьев Евгений Константинович**

ассистент кафедры вычислительных систем и сетей. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, многопозиционные радиолокационные системы, моделирование в среде MATLAB  
grig.evvgk@gmail.com

**Гуков Сергей Юрьевич**

ассистент кафедры информационно-сетевых технологий. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
sg\_brui@mail.ru

**Дранощук Артем Дмитриевич**

студент кафедры инфокоммуникационных систем, лаборант лаборатории интернета вещей инженерной школы. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмиче-

ского приборостроения. Область научных интересов – машинное обучение, сверточные сети  
dranoshhuk@bk.ru

**Ерышов Вадим Георгиевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационная безопасность  
eryshov@mail.ru

**Жаринов Олег Олегович**

кандидат технических наук, доцент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – современная биомедицинская электроника, цифровая обработка сигналов, моделирование с использованием сред компьютерной математики  
zharinov73@inbox.ru

**Зиатдинов Сергей Ильич**

доктор технических наук, профессор кафедры информационно-сетевых технологий. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
ziat.53@mail.ru

**Иванов Сергей Александрович**

кандидат технических наук, главный специалист ОАО «ЦНПО «Ленинец». Область научных интересов – радиолокация, радионавигация, системы позиционирования  
kabalustuk@mail.ru

**Ильина Дарья Викторовна**

старший преподаватель кафедры безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
idaria@k36.org

**Исаева Мария Николаевна**

ассистент кафедры безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – защита информации, кодирование, стеганография  
imn@guap.ru

**Килимник Вячеслав Александрович**

кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела биотехнических проблем (НИО БП). Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – микромощная электроника, имплантируемые системы, микропроцессорная техника, многоканальная функциональ-

ная электростимуляция, биотехнические системы, учебно-исследовательские комплексы по биофизике  
kil-aanet@ya.ru

**Ким Дмитрий Константинович**

ассоциированный профессор-исследователь. Университет Нархоз, Алматы, Казахстан, кандидат физико-математических наук. Область научных интересов – применение математических методов в задачах энергетики и передачи информации  
dmitriy.kim@narhoz.kz

**Колесникова Светлана Ивановна**

доктор технических наук, профессор. Институт вычислительных систем и программирования, СПб ГУАП. Область научных интересов – интеллектуальный анализ данных, синергетические системы нелинейного управления, стохастический синтез нелинейных систем управления  
skolesnikova@yandex.ru

**Коломойцев Владимир Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационная безопасность, построение защищенных систем  
dek-s-kornis@yandex.ru

**Коломойцева Ксения Романовна**

магистр ФТМИ. Университет ИТМО. Область научных интересов – авторское и смежные права, нормативно-правовая защита информации  
dek-s-kornis@yandex.ru

**Комашинский Владимир Владимирович**

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
gvladkom@gmail.com

**Кузнецов Виталий Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-сетевых технологий. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
k.avk-c@mail.ru

**Матвеев Николай Валентинович**

старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
n.matveev@k36.org

**Мирошниченко Никита Игоревич**

студент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный

университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальные сети электроснабжения, моделирование в среде Simulink  
nikitos\_mir.1997@mail.ru

**Настуева Наталья Станиславовна**

студентка педиатрического факультета. Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова. Область научных интересов – сетевые решения в здравоохранении, удаленный мониторинг состояния больных  
natali.19.01.97@mail.ru

**Ненашев Сергей Александрович**

студент кафедры вычислительных систем и сетей. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – системы передачи информации, цифровая обработка изображений и сигналов, оптико-локационные системы, системы компьютерного зрения  
nenashev\_sergey178@mail.ru

**Никитин Александр Васильевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и сетей. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – цифровые реальности, виртуальная и дополненная реальности, дополненная виртуальность и различные области их применения  
guar.nike@mail.ru

**Овчинников Андрей Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – теория информации, теория кодирования, низкоплотностные коды, каналы с памятью, постквантовая криптография  
mldoc@guar.ru

**Пастушок Игорь Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры инфокоммуникационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
i.pastushok@k36.org

**Поляк Марк Дмитриевич**

старший преподаватель кафедры компьютерных технологий и программной инженерии. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – математическое моделирование, синергетические системы нелинейного управления, теория случайных процессов, искусственные нейронные сети  
markpolyak@gmail.com

**Попов Алексей Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – теория и технология сквозного проектирования электронных устройств и систем  
anskela@yandex.ru

**Попов Илья Дмитриевич**

ассистент кафедры безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – компьютерные сети, информационная безопасность  
asp.i.popov@gmail.com

**Путилова Надежда Владимировна**

старший преподаватель кафедры компьютерных технологий и программной инженерии. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – автоматизация и управление образованием, автоматизированные информационные системы, базы данных  
N\_V\_P\_hex@mail.ru

**Раскопина Анастасия Сергеевна**

студентка кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальные сети электроснабжения, моделирование в среде Simulink  
raskopina.nastia@yandex.ru

**Решетникова Нина Николаевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и сетей. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интерактивная 3D-графика, моделирование и анимация персонажей, виртуальная и дополненная реальность  
reni\_07@list.ru

**Рогачев Сергей Александрович**

старший преподаватель кафедры компьютерных технологий и программной инженерии. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – геоинформационные системы, анализ данных, исследования Земли из космоса, использование аэрокосмической информации, машинное обучение, искусственные нейронные сети  
Rogachev.seal@gmail.com

**Рындюк Виктория Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государ-

ственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
kafedra51.info@guap.ru

**Савинов Максим Сергеевич**

лаборант лаборатории интернета вещей. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – машинное обучение  
cabuhob@gmail.com

**Сединкин Павел Андреевич**

студент кафедры инфокоммуникационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – массовая межмашинная связь (mMTC)  
pavel-sedinkin@list.ru

**Семенihin Евгений Леонидович**

магистрант. Институт вычислительных систем и программирования, СПб ГУАП. Область научных интересов – синергетические системы нелинейного управления  
semenihin97@inbox.ru

**Сенцов Антон Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и сетей. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – обработка и передача информации, радиолокация, радионавигация, отладочные стенды, моделирование работы оборудования бортовых радиоэлектронных комплексов  
toxx@list.ru

**Сергеев Александр Михайлович**

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры вычислительных систем и сетей. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – цифровая обработка информации, сетевые технологии, системы медицинского назначения  
aleks.asklab@gmail.com

**Синкин Михаил Дмитриевич**

студент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальные сети электроснабжения, моделирование в среде Simulink  
aweekw@gmail.com

**Скляр Максими Александрович**

инженер лаборатории интернета вещей инженерной школы. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
Maxim.Sklyarov@dell.com

**Сорокин Александр Васильевич**

ассистент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальные сети электроснабжения, моделирование в среде Simulink  
aleksandr.sorokin.v@gmail.com

**Степанов Никита Вячеславович**

аспирант кафедры инфокоммуникационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – случайный множественный доступ, имитационное моделирование, сотовые сети  
nstepanov@k36.org

**Толмачев Сергей Геннадьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – корреляционный анализ, теория кодирования  
tsg17@yandex.ru

**Туманова Алена Валерьевна**

доцент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – автоматизация процессов планирования и сопровождения учебного процесса  
alenavt@mail.ru

**Турнецкая Елена Леонидовна**

кандидат технических наук, доцент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – современные информационные технологии, информатизация общества  
turnetskaya@mail.ru

**Турликов Андрей Михайлович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационные технологии  
turlikov@k36.org

**Фаталиева Евгения Олеговна**

магистрант кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – микропроцессорные устройства, датчики газов, датчики физических параметров, цифровая и аналоговая обработка сигналов  
evgenia.fat@mail.ru

**Фоменкова Анастасия Алексеевна**

ассистент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – моделирование технологических процессов  
a.a.fomenkova@mail.ru

**Фоминых Анна Александровна**

магистрант кафедры безопасности информационных систем. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – помехоустойчивое кодирование  
ev19ev19@yandex.ru

**Чекменёва Анна Александровна**

магистрант кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – микропроцессорные устройства, датчики газов, датчики физических параметров, цифровая и аналоговая обработка сигналов  
chekmeneva.anna.1999@mail.ru

**Щеголева Александра Андреевна**

студентка кафедры компьютерных технологий и программной инженерии. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – математическое моделирование, синергетические системы нелинейного управления  
aleksandrasheg@yandex.ru

**Яковлев Александр Викторович**

кандидат технических наук, доцент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – машинное обучение, анализ видео- и аудиоматериалов, обработка сигналов, оценка состояния человека  
sven-7@mail.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ</b> .....	<b>3</b>
<i>Аграновский А. В., Турнецкая Е. Л.</i> КРИТЕРИИ ВЫБОРА ХОСТИНГ-ПРОВАЙДЕРА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ .....	3
<i>Акопян Б. К.</i> ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О КЛАССИФИКАЦИИ НАРУШЕНИЙ СЕРДЕЧНОГО РИТМА .....	7
<i>Акопян Б. К., Жаринов О. О.</i> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ .....	13
<i>Иванова М. С., Шепета А. П.</i> АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ПО ЭМПИРИЧЕСКИМ ДАННЫМ .....	20
<i>Исаков В. И., Шепета Д. А.</i> ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ОГИБАЮЩЕЙ ЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ КРОМКИ ЗЕМЛЯ-МОРЕ .....	25
<i>Килимник В. А., Чекменева А. А.</i> КОМПЛЕКСНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ .....	29
<i>Килимник В. А., Чекменева А. А., Фаталиева Е. О.</i> УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ КОЖНОГО ПОКРОВА.....	32
<i>Сорокин А. В., Мирошниченко Н. И., Раскопина А. С., Синкин М. Д.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИМУЛЯЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ SMART GRID .....	35
<i>Толмачев С. Г.</i> РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШУМОВ ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА.....	45
<i>Яковлев А. В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ DEEP LEARNING ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ КОГНИТИВНОЙ УСТАЛОСТИ ЧЕЛОВЕКА ПО ЕГО РЕЧИ.....	48
<i>Яковлев А. В.</i> ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ ТЕСТОВЫМИ ОБРАЗАМИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА.....	54
<b>КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ</b> .....	<b>57</b>
<i>Глушкова Е. М., Поляк М. Д.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТНОСТИ СЛОВ И ЛАТЕНТНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ДИРИХЛЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕРЫ СХОЖЕСТИ ТЕКСТОВ.....	57
<i>Попов А. А.</i> ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ БАЗОВОГО ЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ПЛИС КРУПНОЗЕРНИСТОЙ АРХИТЕКТУРЫ.....	61
<i>Рогачев С. А.</i> ГЕНЕРАЦИЯ ШУМОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ.....	67
<i>Семенихин Е. Л., Колесникова С. И.</i> СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ .....	73
<i>Туманова А. В., Путилова Н. В.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ .....	78
<i>Фоменкова А. А.</i> ВЫБОР МИНИМАЛЬНОГО НАБОРА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БИОМАССЫ В СИСТЕМЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.....	82
<i>Щеголева А. А., Поляк М. Д.</i> МОДЕЛЬ «ХИЩНИК-ЖЕРТВА С ПИТАНИЕМ» .....	86
<b>ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ</b> .....	<b>92</b>
<i>Балонин Ю. Н.</i> ПОИСК СИММЕТРИЧНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ МАТРИЦ АДАМАРА С ТРЕМЯ БЛОКАМИ (ПРОПУСОВ) ДО 188 ПОРЯДКА ВКЛЮЧИТЕЛЬНО.....	92
<i>Горелик Д. В.</i> MOSIX КАК СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ «ЭЛЬБРУС».....	97

<b>Никитин А. В., Решетникова Н. Н.</b> РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНЫХ ИНСТРУКЦИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ 3D-ПАНОРАМ .....	100
<b>Никитин А. В., Решетникова Н. Н.</b> РАЗРАБОТКА ПРЕВИЗОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ РЕАЛЬНОСТЕЙ .....	105
<b>Сенцов А. А., Григорьев Е. К., Ненашев С. А.</b> РАДИООПТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	110
<b>Сенцов А. А., Иванов С. А., Ненашев С. А.</b> ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ УСТРОЙСТВ В СОСТАВЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ МОНИТОРИНГЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	117
<b>Сергеев А. М., Настуева Н. С.</b> ТЕХНОЛОГИЯ ЮМТ КАК ОСНОВА НОСИМЫХ ОНЛАЙН-МОНИТОРОВ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ.....	123
<b>БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>128</b>
<b>Борисовская А. В., Тюрликов А. М.</b> ОБЗОР МЕТОДОВ ДОСТУПА АБОНЕНТОВ К ОБЩЕМУ КАНАЛУ В СИСТЕМАХ С ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕОГРАНИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ АБОНЕНТОВ И ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ «УСПЕХ-НЕУСПЕХ» .....	128
<b>Бостанбеков К. А., Георгиев Г. Д., Ким Д. К.</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ В СТРУКТУРЕ ГЕНЕРАЦИИ.....	132
<b>Васильев Д. А., Тюрликов А. М., П. ван де Вен, Шнеер В. В.</b> МОДЕЛЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В СЕТЯХ 5G.....	138
<b>Веселова В. А., Овчинников А. А.</b> О КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИТЕРАТИВНЫХ ДЕКОДЕРОВ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ .....	142
<b>Витвинов В. К., Пастушок И. А.</b> РАЗРАБОТКА СОГЛАСОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИЛОЖЕНИЙ И АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ РАДИОРЕСУРСОВ В СЕТЯХ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА .....	147
<b>Гуков С. Ю., Тюрликов А. М.</b> ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ КАРТЫ ГЛУБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАДЕРЖКИ СВЕТОВОГО СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ ПРИ МУЛЬТИКАМЕРНОЙ СЪЕМКЕ .....	156
<b>Дранощук А. Д., Веселов А. И.</b> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРЬ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ.....	163
<b>Дранощук А. Д., Пастушок И. А., Савинов М. С.</b> СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОСЕТИТЕЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ .....	171
<b>Ерышов В. Г., Ильина Д. В.</b> АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НЕГЛАСНОГО ДОБЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТАХ ИНФОРМАТИЗАЦИИ.....	175
<b>Исаева М. Н., Овчинников А. А.</b> О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОШИБОК ПРИ ИТЕРАТИВНОМ ДЕКОДИРОВАНИИ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ.....	180
<b>Коломойцев В. С., Коломойцева К. Р.</b> МЕТОД ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СЦЕНАРИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ.....	186
<b>Попов И. Д., Комашинский В. В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СЕТЕВЫХ АТАК НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА.....	190
<b>Рындюк В. А.</b> ВОПРОСЫ УДАЛЕННОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ .....	195
<b>Сединкин П. А., Матвеев Н. В.</b> НЕСТАБИЛЬНОСТЬ АЛГОРИТМОВ СЛУЧАЙНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С НИЗКОЙ ЗАДЕРЖКОЙ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПОГАШЕНИЕМ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ.....	197
<b>Скляр М. А., Пастушок И. А.</b> О РАЗВЕРТЫВАНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ EDGE-FOG-CLOUD .....	201

<b>Степанов Н. В., Тюрликов А. М.</b> ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЙНОГО ДОСТУПА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ NV-IOT.....	208
<b>Фоминых А. А.</b> СХЕМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛЯРНЫХ КОДОВ ....	212
<b>ИНФОРМАЦИОННО-СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>217</b>
<b>Агеев М. П., Гуков С. Ю.</b> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ФОРМАТОВ КОДИРОВАНИЯ.....	217
<b>Зиатдинов С. И.</b> АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА СЕЛЕКЦИИ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ .....	223
<b>Зиатдинов С. И.</b> СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСНОГО СИГНАЛА ПРИ РАССОГЛАСОВАНИИ КВАДРАТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ .....	228
<b>Кузнецов В. А.</b> УСКОРЕННЫЙ РАСЧЕТ СКАЛЯРНЫХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ ДЛЯ ВТОРОГО АЛГОРИТМА ЧЕЙЗА ПРИ ДЕКОДИРОВАНИИ БЛОКОВЫХ ТУРБОКОДОВ НА ОСНОВЕ ПАРИТЕТНОГО КОДА .....	233

Научное издание

# ОБРАБОТКА, ПЕРЕДАЧА И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ '21

Международная научная конференция  
14–22 апреля 2021 г.

Сборник докладов

ISBN: 978-5-8088-1557-5



9 785808 815575

Ответственные за выпуск:

кандидат технических наук, доцент *В. А. Ненашев*;  
кандидат технических наук, доцент *И. А. Пастушок*

Редакторская подготовка *Е. В. Тороповой*  
Компьютерная верстка *С. Б. Мацапуры*

---

Подписано к печати 24.03.21. Формат 60×84 1/8.  
Усл. печ. л. 30,7. Уч.-изд. л. 37,8. Тираж 150 экз. Заказ № 30.

---

Редакционно-издательский центр ГУАП  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, ул., 67