



МАСЛАКОВ МИХАИЛ ЛЕОНИДОВИЧ

АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ СИГНАЛОВ ДЛЯ
КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОЛИНИЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Специальность: 05.12.13

«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019 г.

Работа выполнена в акционерном обществе «Российский институт мощного радиостроения» (АО «РИМР»)

Научный руководитель **Егоров Владимир Викторович**
Доктор технических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты **Чесноков Михаил Николаевич**
Доктор технических наук, профессор
Ведущий научный сотрудник отдела разработки систем связи
ЗАО «Институт телекоммуникаций» (г. Санкт-Петербург)

Каплун Дмитрий Ильич
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры «Автоматики и процессов управления»
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Ведущая организация Научно-исследовательский центр телекоммуникационных технологий военно-морского флота, корабельных комплексов и средств обмена информацией и разведки Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований строительства военно-морского флота военный учебно-научный центр военно-морского флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «3» марта 2020 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.233.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «23» января 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.233.05
кандидат технических наук, доцент



Овчинников Андрей Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Коротковолновый (КВ) канал позволяет обеспечить передачу информации на значительные расстояния (до нескольких тысяч километров) в том числе за пределы прямой видимости при относительно малой мощности передатчиков и без промежуточных ретрансляционных станций. Относительная дешевизна, независимость от различных экономических и политических факторов, наряду с высокой мобильностью и простотой развертывания КВ радиосредств, в отличие от спутниковой связи, определяют большой интерес различных ведомств к КВ связи при организации и проведении, например, спасательных работ и координации действий различных организаций и служб в районах стихийных бедствий. По мере развития авиационной отрасли и растущими требованиями к управлению воздушного движения (УВД) и воздушному оперативному управлению в океанических районах экономичным и надежным способом, роль и потребность КВ радиолиний последовательной передачи данных также возрастает. Кроме того, в 2008 году Президентом РФ утверждена «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», где в качестве одной из ключевых задач стоит создание и внедрение современных информационно-телекоммуникационных технологий и систем связи, радиовещания, управления движением судов и полетами и другие, что добавляет дополнительный интерес к развитию надежной высокоскоростной КВ радиосвязи.

Тенденции развития современных систем передачи данных (в том числе и КВ радиолиний) характеризуются повышающимися требованиями к максимально эффективному использованию выделенного частотно-временного ресурса радиоканала. При этом современное развитие вычислительно-элементной базы позволяет реализовывать более сложные, но, в тоже время, более эффективные методы и алгоритмы.

Таким образом, задача разработки новых и усовершенствование известных способов и алгоритмов адаптивной коррекции сигналов для КВ радиолиний последовательной передачи данных с целью повышения помехоустойчивости и информационной скорости передачи данных (иными словами повышение вероятностно-временных характеристик радиолинии), является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Принцип функционирования последовательной (или одночастотной) радиолинии передачи данных с адаптивной коррекцией сигналов в каналах с замираниями и наличием межсимвольной интерференции (МСИ) впервые был предложен Д.Д. Кловским, а системы, построенные по такому принципу, назвали системами с испытательным импульсом и предсказанием (СИИП). Сущность адаптивной коррекции заключается в построении корректирующего фильтра (КФ) или эквалайзера, компенсирующего искажения сигнала, внесенные радиоканалом. Для настройки коэффициентов импульсной характеристики (ИХ) КФ в последовательность информационных символов осуществляют периодические вставки тестовых (зондирующих) сигналов.

Хорошо известны работы в данном направлении Б.И. Николаева, В.А. Сойфера, В.Г. Карташевского, О.В. Горячкина и других. Кроме того, проблемам передачи данных с адаптивной коррекцией посвящены работы Я.З. Цыпкина, С.А.

Курицына, Н.Е. Кириллова, В.В. Шахгильдяна и М.С. Лохвицкого, А.А. Парамонова, Ш.У.Х. Куреши, Г. Унгербока, М.Е. Остина и других.

Проблемы реализации, алгоритмов адаптивной фильтрации, используемых для расчета ИХ канала и ИХ КФ, изложены в монографиях В.И. Джигана, Б. Уидроу, С. Хайкина, А.Н. Тихонова, Л. Льюнга и других.

В настоящее время за рубежом приняты и продолжают развиваться несколько стандартов определяющих сигналы и функционирование последовательных КВ модемов передачи данных, используемых для различного назначения (ARINC 635, MIL-STD-188-110с, STANAG 4285, STANAG 4539). Последовательные модемы, работающие по данным стандартам, производят такие зарубежные предприятия как Rohde & Schwarz (Германия), Harris Corp. (США), Codan Ltd. (Австралия), Rockwell Collins (США), Rapid Mobile (ЮАР).

Среди отечественных производителей систем и комплексов авиационной радиосвязи, в составе которых используется последовательный КВ модем передачи данных, можно выделить АО «НПП «Полет» (г. Нижний Новгород), ООО НПП «Прима» (г. Нижний Новгород), АО «ВНИИРА» (г. Санкт-Петербург), ОАО «ЦНПО «Ленинец» (г. Санкт-Петербург) и другие.

К сожалению, модернизация известных КВ модемов и комплексов с целью повышения их вероятностно-временных показателей эффективности, а также для решения новых современных задач часто невозможно, т.к. используемые КВ модемы реализованы в соответствии с указанными выше стандартами и не могут быть изменены. В России на данный момент не существует общепринятого стандарта, который бы описывал физический уровень последовательного одночастотного КВ модема передачи данных. Кроме того, несмотря на значительный объем отечественных публикаций и различных НИОКР, посвященных методам адаптивной коррекции и последовательной передаче данных, в настоящее время отсутствует современный серийно выпускаемый последовательный КВ модем отечественного производства. Поэтому разработка и модификация методов и алгоритмов адаптивной коррекции сигналов, а также их аппаратная реализация и испытания на реальной трассе являются актуальной задачей.

Цели и задачи. Целью настоящей работы является повышение достоверности и скорости передачи сообщений в коротковолновой радиолинии последовательной передачи данных.

Основной научной задачей является разработка новых и усовершенствование известных способов и алгоритмов адаптивной коррекции сигналов и их практическая реализация.

Достижение этой цели требует решения следующих частных задач:

1. Разработка методов для выбора параметров алгоритмов расчета ИХ канала и коэффициентов КФ с учетом специфики задачи адаптивной коррекции сигналов.
2. Разработка алгоритма решения интегрального уравнения типа свертки в базисе Хартли.
3. Разработка способа адаптивной коррекции с обратной связью по решению (ОСР).
4. Разработка способов квазикогерентного сложения тестовых сигналов.

5. Разработка способа бестестовой адаптивной коррекции сигналов.
6. Модификация алгоритма ОСР для способа бестестовой адаптивной коррекции сигналов.
7. Исследование помехоустойчивости коротковолновой радиолинии последовательной передачи данных при использовании разработанных способов.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

- разработан способ нахождения импульсной характеристики корректирующего фильтра на основе решения задачи идентификации;
- разработан алгоритм решения интегрального уравнения типа свертки с неточно заданной правой частью в базисе Хартли;
- разработаны методы выбора оптимальных параметров алгоритмов расчета ИХ канала и коэффициентов КФ;
- разработаны способы повышения эффективности методов адаптивной коррекции при использовании тестовых сигналов;
- разработан способ бестестовой адаптивной коррекции сигналов.

На большинство предложенных методов получены патенты РФ на изобретения или полезные модели.

Теоретическая значимость состоит в разработке способа бестестовой адаптивной коррекции, позволяющего определять надежно принятые сегменты сигнала, обладающие хорошими автокорреляционными и спектральными свойствами и вычислять на их основе коэффициенты КФ. Это позволяет осуществлять адаптивную коррекцию сигналов на основе обработки информационных сигналов. Также в работе получено новое решение интегрального уравнения типа свертки, относящегося к классу некорректных задач, с использованием преобразования Хартли. Кроме того разработаны способы для выбора параметров методов и алгоритмов расчета ИХ канала и КФ с учетом специфики задачи адаптивной коррекции сигналов.

Практическая значимость состоит в том, что применение разработанных способов в коротковолновых радиолиниях последовательной передачи данных позволяет существенно повысить скорость передачи данных, увеличить точность расчета импульсной характеристики канала связи и корректирующего фильтра, повысить помехоустойчивость радиолинии и, как следствие, вероятность доведения сообщений.

Часть предложенных в диссертационной работе способов использована в ОКР «Арго» и в автоматизированном адаптивном комплексе технических средств радиосвязи «Пирс», что подтверждается соответствующими актами о реализации научных результатов. Эффективность всех разработанных способов подтверждается трассовыми испытаниями макетов последовательных КВ модемов, а также их практическим использованием в постоянно действующих коротковолновых радиолиниях последовательной передачи данных.

Предложенные способы могут найти применение в перспективных разрабатываемых коротковолновых радиолиниях с высокими вероятностно-временными требованиями к доведению сообщений. Многие из разработанных

способов могут быть использованы в уже существующих радиоприемниках последовательной передачи данных без внесения изменений в аппаратную часть и сигнальные конструкции путем их программной реализации.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач в работе использовались методы теории цифровой обработки сигналов, теории решения некорректных задач, теории помехоустойчивого кодирования, теории передачи дискретных сообщений. Для практической реализации осуществлялось компьютерное моделирование с использованием пакета MATLAB, имитационное моделирование разработанного программного макета одночастотного КВ радиомодема, реализованного на языке программирования C++, с использованием имитатора КВ радиоканала, а также трассовые испытания данного макета.

Положения, выносимые на защиту.

1. Способы повышения эффективности методов и алгоритмов расчета импульсной характеристики корректирующего фильтра.
2. Способы повышения эффективности адаптивной коррекции сигналов при использовании тестовых сигналов.
3. Способ бестестовой адаптивной коррекции сигналов.

Степень достоверности полученных результатов обусловлена корректностью постановки задачи и принятых допущений и ограничений, использованием математического аппарата, соответствующего решаемой задаче, и подтверждена результатами имитационного моделирования, а также результатами стендовых и трассовых испытаний.

Личный вклад автора. Автором лично выполнен основной объем исследований: постановка задач исследования, разработка и реализация предложенных способов в программной среде, проведение вычислительных экспериментов и участие в натурных испытаниях, анализ и обобщение полученных результатов, сформулированы основные положения диссертации, составляющие ее новизну и практическую значимость.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

1. XXXIX неделя науки СПбГПУ, г. Санкт-Петербург, 2010 г.;
2. Ежегодные конференции молодых специалистов ПАО «РИМР», г. Санкт-Петербург (2011, 2014 – 2016 гг.);
3. 13 – 17 и 20 Международные конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA), г. Москва (2011 – 2015, 2018 гг.);
4. XVII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь», г. Воронеж, 2011 г.;
5. Научно-технический семинар «Актуальные проблемы теории связи, передачи и обработки информации и подготовки научных кадров», г. Санкт-Петербург, 2012 г.;
6. VI – XI Всероссийские научно-технические конференции «Радиолокация и радиосвязь», г. Москва (2012 – 2017 гг.);
7. V, IX Всероссийские конкурсы молодых ученых «Итоги диссертационных исследований» (Миасс, Россия, 2013, 2017 гг.);
8. Научная сессия ГУАП, г. Санкт-Петербург, 2017 г.;

9. 9-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», г. Москва, 2017 г.;

10. VI международная научно-техническая конференция, посвященная дню образования войск связи «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией», г. Воронеж, 2017 г.;

11. IV Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь», г. Омск, 2017 г.

Публикации. Основные научные результаты отражены в 49 публикациях: 9 статей в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ для публикации результатов диссертационных работ, 1 статья в издании, входящем в международную базу данных Scopus, 19 текстов докладов в сборниках по итогам международных и всероссийских конференций, 15 патентов РФ на изобретения и полезные модели, 5 работ в других изданиях.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 153 наименования, списка сокращений и условных обозначений и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 149 страниц, включая 69 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, рассматривается состояние исследуемой проблемы, сформулированы цель работы, перечислены основные научные результаты, полученные в диссертации, определены практическая ценность и область применения результатов, приведены сведения об апробации работы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности и используемые модели КВ радиоканала. Приведен обзор существующих одночастотных КВ модемов, в которых применяют методы адаптивной коррекции сигналов. Рассмотрены основные принципы адаптивной коррекции сигналов и алгоритмы, применяемые в задачах адаптивной фильтрации. Приведена постановка задачи исследования.

Во второй главе предложены способы повышения эффективности методов и алгоритмов расчета ИХ КФ.

Рассмотрена следующая модель адаптивной коррекции сигналов:

$$\int_0^{\infty} s(t - \tau) h_{\kappa}(\tau) d\tau = u(t), \int_0^{\infty} u(t - \tau) h_{\text{КФ}}(\tau) d\tau = \hat{s}(t), \quad (1)$$

где $s(t)$ – входной передаваемый сигнал; $h_{\kappa}(t)$ – ИХ канала связи; $u(t) = \bar{u}(t) + \xi(t)$ – искаженный зашумленный сигнал (сигнал на входе КФ); $\bar{u}(t)$ – искаженный сигнал; $\xi(t)$ – аддитивный белый шум; $h_{\text{КФ}}(t)$ – ИХ КФ; $\hat{s}(t)$ – откорректированный сигнал, причем $\hat{s}(t) \rightarrow s(t)$.

Подставив во второе уравнение из (1) переданный и принятый тестовый сигнал, можно рассчитать ИХ КФ $\hat{h}_{\text{КФ}}(t)$, после чего осуществить коррекцию информационного сигнала. Однако при таком подходе одна из подынтегральных функций содержит шумовую составляющую, что значительно снижает точность полученных коэффициентов ИХ КФ. Поэтому автором предлагается способ нахождения ИХ КФ на основе решения задачи идентификации канала, включающий расчет ИХ канала связи путем решения первого уравнения из (1) (при подстановке

переданного и принятого теста) и затем либо расчет коэффициентов ИХ КФ $\hat{h}_{\text{КФ}}(t)$ путем решения уравнения:

$$\int_0^{\infty} \hat{h}_{\text{к}}(t - \tau) h_{\text{КФ}}(\tau) d\tau = \delta(t), \quad (2)$$

либо осуществления непосредственно коррекции (фильтрации) информационного сигнала, т.е. решении уравнения:

$$\int_0^{\infty} s(t - \tau) \hat{h}_{\text{к}}(\tau) d\tau = u(t). \quad (3)$$

Предложенный способ позволяет значительно повысить точность расчета ИХ канала и ИХ КФ.

Для повышения вычислительной эффективности в [2] автором получены выражения для решения интегрального уравнения типа свертки методом регуляризации Тихонова с использованием дискретного преобразования Хартли. Решение уравнений (1–3) в базе Хартли с использованием алгоритмов быстрого преобразования Хартли (БПХ) обеспечивает точно такую же точность получаемого решения, что и решение в базе Фурье (при условии выбора соответствующего оптимального значения параметра регуляризации), но требует значительно меньших вычислительных затрат. Так, число операций сложения меньше более чем в 5 раз, умножения – в 3 раза, деления – в 2 раза. При этом все операции вещественны, т.е. нет необходимости отдельно хранить реальную и мнимую части.

Для повышения точности расчета ИХ канала в [8; 11] автором также предложено использование двухпараметрических стабилизирующих функций, при этом введены дополнительные требования, предъявляемые к стабилизирующим функциям. Целью введения этих функций является учет полосовых свойств используемых сигналов.

При этом важной задачей является выбор значений параметров алгоритма коррекции. Так, в различных методах и алгоритмах, применяемых в задачах адаптивной фильтрации для расчета ИХ, используется некоторый параметр (параметр регуляризации, размер шага, порядок фильтра и т.п.), влияющий на устойчивость и точность получаемого решения. Рассмотрим выбор параметра регуляризации при использовании тестовых сигналов для способа нахождения ИХ КФ на основе решения задачи идентификации канала. Введем индекс j , которым обозначим тестовые сигналы в различные моменты времени. Тогда решим уравнение:

$$\int_0^{T_0} s_0(t - \tau) \cdot h_{\text{к},j}(\tau) d\tau = u_{0,j}(t) \quad (4)$$

где T_0 – длительность тестового сигнала

При $j = 0$ получим значения коэффициентов ИХ канала $h_{\text{к},0}(t)$. Полагая, что

$$h_{\text{к},j}(t) \cong h_{\text{к},j \pm z}(t), z = 1, 2, \dots, Z, \quad (5)$$

из (3) можно получить $s_{0,z}(t, \alpha_z)$. В качестве оптимального значения α_{opt} автором предложено взять медианное значение из выборки $\{\alpha_{opt,z}\}$, полученной путем минимизации $\min_{\alpha_z} \|s_{0,z}(t, \alpha_z) - s_0(t)\|$.

В [47] также приведена адаптация данного алгоритма для выбора порядка адаптивного КФ при расчете коэффициентов методом наименьших квадратов.

Также автором разработан метод выбора оптимального параметра алгоритма коррекции на основе отклонения фазовых значений. Целевой функцией является количество ошибок демодуляции:

$$q = \min_{\alpha} \sum_{n=0}^{N-1} |b(n) - b(n, \alpha)|, \quad (6)$$

где $b(n)$ – информационная последовательность; $b(n, \alpha)$ – результат демодуляции откорректированного информационного сигнала.

При этом отметим, что последовательность $b(n)$ – неизвестна. Данный метод основан на следующем утверждении: минимизация дисперсии фаз σ_{ψ}^2 приведет к минимизации вероятности ошибки на бит, определяемой $P = 1 - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} W_0(\psi) d\psi$, где $W_0(\psi)$ плотность вероятности начальных фаз символов откорректированного информационного сигнала, при этом оценка P определяется выражением: $\hat{P} = \frac{1}{LN} \sum_{l=1}^L q_l$, минимизация, которой и заключается в минимизации (6). Ввиду небольшого объема выборки, равного длине информационной последовательности, возникает погрешность определения σ_{ψ}^2 , поэтому автором введен функционал:

$$R(\alpha) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} c(n, \alpha) \cdot \exp(i \cdot \psi_0(n, \alpha)) \right|, \quad (7)$$

где $c(n, \alpha)$ – весовые коэффициенты; $\psi_0(n, \alpha)$ – значения фаз откорректированного сигнала, повернутые в сектор $\left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$. Максимум (7) соответствует оптимальному значению α . Данный метод может быть использован, в том числе, и для способа бестесовой адаптивной коррекции сигналов.

Рассмотренные методы позволяют повысить точность расчета ИХ канала и ИХ КФ (примерно на 15-20%), что в результате позволяет повысить помехоустойчивость передачи данных.

В третьей главе предложены способы повышения эффективности адаптивной коррекции сигналов при использовании тестовых сигналов. Основной целью данных способов является повышение точности расчета ИХ канала и ИХ КФ за счет дополнительной обработки сигналов.

В работе [6] автором рассмотрено применение различных защитных интервалов (ЗИ) между тестовыми и информационными сигналами, что позволяет избавиться от наложения неизвестных информационных символов на тестовые. Одним из возможных вариантов ЗИ является пассивная пауза, т.е. интервал, на котором отсутствует передача сигнала. Подобный вариант предлагался Б.И. Николаевым при применении двухуровневой балансной амплитудной модуляции или фазовой телеграфии, что порождало ряд проблем связанных с появлением

третьей позиции и сложностью при подстройке тактовой синхронизации. При использовании фазоманипулированных сигналов на основе псевдослучайных последовательностей это приводит к некоторому увеличению пик-фактора, однако более существенной проблемой является влияние автоматической регулировки усиления (АРУ) приемника. Так, при отсутствии многолучевости на месте пассивных пауз будет присутствовать только шум, уровень которого будет увеличен АРУ до уровня сигнала, в результате чего уменьшится отношение сигнал/шум (ОСШ) и, как следствие, точность расчета ИХ канала и ИХ КФ. Для использования преимуществ пассивной паузы и устранения указанных недостатков автором разработан новый способ адаптивной коррекции с компенсацией ЗИ [14].

Для повышения точности расчета ИХ канала и соответствующей ИХ КФ автором предлагается использование ЗИ в виде циклического продолжения тестового сигнала. Тогда можно считать свертку (1) циклической и решить это уравнение в замкнутой области $\{T_1 \leq \tau \leq T_2; T_1 \leq t \leq T_1\}$ методом, основанным на переходе в частотную область без добавления нулей, что позволяет компенсировать влияние МСИ и получить значения коэффициентов ИХ с большей точностью.

В [6] проведен сравнительный анализ влияния вида ЗИ на точность расчета ИХ канала, а на рисунках 1, 2 приведены кривые вероятности ошибки на бит в зависимости ОСШ при отсутствии ЗИ, применении ЗИ в виде циклического повторения теста или пассивной паузы, а также для способа компенсации ЗИ для сигналов с фазовой манипуляцией (ФМ) различной кратности.

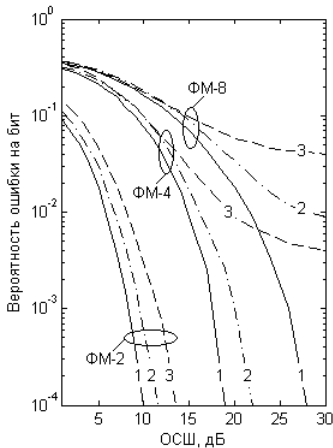


Рисунок 1 – Зависимости вероятности ошибки на бит от ОСШ в двухлучевом канале для ФМ различной кратности при: 1 – ЗИ пассивная пауза; 2 – ЗИ циклическое повторение теста; 3 – без ЗИ

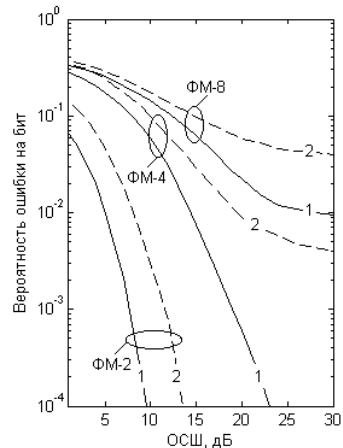


Рисунок 2 – Зависимости вероятности ошибки на бит от ОСШ в двухлучевом канале для ФМ различной кратности при: 1 – компенсации ЗИ; 2 – без ЗИ

Таким образом, применение ЗИ позволяет повысить помехоустойчивость передачи данных в нестационарном двухлучевом канале на несколько дБ, при сохранении информационной скорости. Кроме того, при определенных условиях [5]

появляется возможность повысить информационную скорость передачи данных, перейдя к использованию сигналов повышенной позиционности.

Также для повышения точности расчета ИХ канала и ИХ КФ автором был разработан способ адаптивной коррекции с ОСР [7]. Суть ОСР заключается в компенсации МСИ путем вычитания с одновременным взвешиванием значений прошлых символов в процессе принятия решения о текущем символе. Отличительной особенностью предложенного алгоритма ОСР является взвешенное вычитание тестовых и информационных символов (а точнее сигналов) с целью минимизации влияния их «хвостов» друг на друга, что позволяет повысить точность расчета коэффициентов ИХ канала и соответствующей ИХ КФ.

На рисунке 3 приведены кривые помехоустойчивости последовательного модема с информационным сигналом длительностью $n_{\text{симв}} = 30$ ФМ-2 символов (аналогично стандарту ARINC-635) без применения ОСР (кривая 1), с применением алгоритма Кловского-Николаева (АКН) (кривая 2), как одного из наиболее эффективных алгоритмов ОСР, и с использованием предложенного автором алгоритма адаптивной коррекции с ОСР (кривая 3).

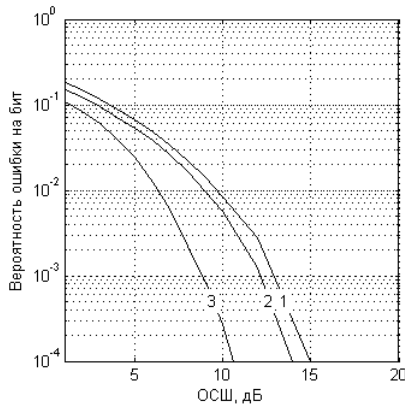


Рисунок 3 – Зависимости вероятности ошибки на бит от ОСШ в двухлучевом канале для модема с $n_{\text{симв}} = 30$ ФМ-2 символов: 1 – без ОСР; 2 – АКН; 3 – с ОСР

Дополнительно, автором проведено исследование алгоритма ОСР при большей длительности информационного сегмента $n_{\text{симв}}$ и различной длительностью интервала между установлением синхронизации, в результате чего показано отсутствие эффекта распространения ошибок, присущего многим известным алгоритмам ОСР.

Также автором предлагается осуществление предварительной компенсации шума в принимаемом тестовом сигнале. Для этого предполагается осуществление квазигогерентного сложения нескольких тестовых сигналов. При этом делается допущение (5). Так, например, при сложении двух тестовых сигналов можно увеличить ОСШ в 2 раза. Однако в каналах с малым интервалом корреляции (т.е. с быстрыми замираниями) сложение большого количества тестов может привести к нарушению условия (5). Кроме того, невозможно заранее задать количество складываемых тестовых сигналов. Поэтому автором разработаны способы весового

и синфазного квазикогерентного сложения тестовых сигналов. В этих способах осуществляется предварительное вычисление весовых коэффициентов и фазирование тестовых сигналов.

Зависимости помехоустойчивости от ОСШ, полученные путем моделирования, при использовании данных способов представлены на рисунке 4.

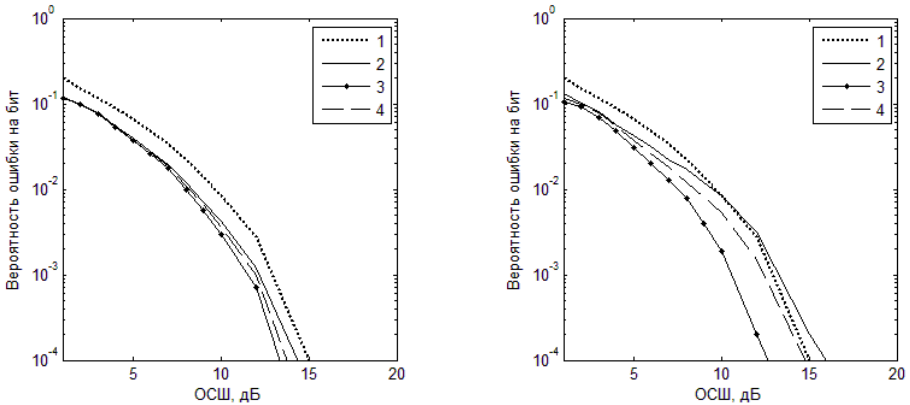


Рисунок 4 – Зависимости вероятности ошибки на бит от ОСШ в двухлучевом релейском канале при сложении 3 (слева) и 7 (справа) тестовых сигналов: 1 – без сложения; 2 – квазикогерентное сложение; 3 – весовое квазикогерентное сложение; 4 – синфазное сложение

Данные способы могут быть использованы в существующих последовательных КВ модемах без изменения сигнальной конструкции, и позволяют обеспечить выигрыш порядка 2 дБ.

Дополнительно автором рассмотрены вопросы применения методов адаптивной коррекции многочастотных OFDM сигналов, что позволяет реализовать передачу сигналами КАМ различной позиционности в КВ канале без использования циклического префикса.

В четвертой главе предложены способы безызыточной бестестовой передачи с адаптивной коррекцией сигналов.

Автором предложен способ совместной передачи тестового и информационного сигналов, при этом амплитуда тестового сигнала A_T меньше амплитуды информационного сигнала A_I . Данный метод является безызыточным, так как передача тестового сигнала не прерывает передачу информации. Процесс адаптивной коррекции в предлагаемом подходе предполагает когерентное накопление тестового сигнала. При накоплении n тестовых последовательностей суммарный уровень амплитуды теста будет $n \cdot A_T$, а среднеквадратичные амплитуды полученных при когерентном сложении информационных последовательностей, в силу случайности передаваемых информационных символов, имеют порядок $\sqrt{n} \cdot A_I$. Расчет ИХ КФ при этом можно осуществить методом последовательных приближений, двигаясь скользящим окном размером, кратным длительности n тестовых сигналов.

Осуществив смещение несущей частоты тестового сигнала на величину, кратную интервалу ортогональности тестового сигнала, можно получить

дополнительный выигрыш в помехоустойчивости порядка 2 дБ. Несмотря на использование тестовых сигналов, данный способ позволяет повысить информационную скорость передачи данных на 30%, однако возможность его применимости на практике крайне ограничена.

Автором разработан способ бестестовой адаптивной коррекции сигналов, в которых тестовые сигналы полностью отсутствуют на достаточно длительном отрезке времени. В основе предлагаемого автором способа бестестовой адаптивной коррекции сигналов [1; 4; 9] лежит гипотеза, что информационная последовательность представляет собой случайный набор равновероятных символов (бит). В связи с этим для расчёта ИХ канала связи и соответствующего ИХ КФ предлагается использование сегмента уже демодулированных информационных символов, среди которых необходимо найти сегмент, обладающий «хорошими» спектральными свойствами, т.е. занимающую всю полосу сигнала и не имеющий нулей в этой полосе. Поиск сегментов, используемых в качестве тестовых, производится только в тех кодовых блоках, в которых используемым кодом было обнаружено число ошибок не более заданного. При использовании сверточного кода сегменты могут быть найдены в декодированном фрагменте, ограниченным глубиной просмотра решетки. Дополнительно могут быть учтены оценки вероятности ошибки на бит, а также значения метрик, полученные в результате декодирования.

Зависимости вероятности ошибки на бит от ОСШ при применении бестестовых методов адаптивной коррекции при использовании блоковых или сверточных кодов практически совпадают и приведены на рисунке 5 (кривая 1).

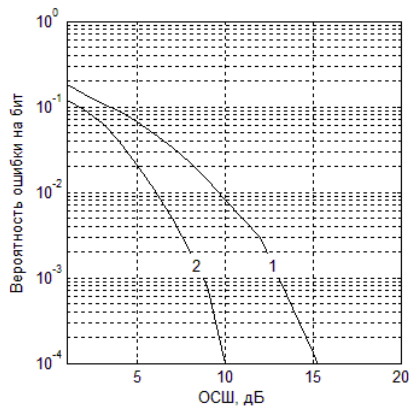


Рисунок 5 – Зависимости вероятности ошибки на бит от ОСШ в двухлучевом канале для модема с бестестовой адаптивной коррекцией: 1 – без ОСР; 2 – с применением ОСР

Использование ошибочного сегмента вследствие ошибок демодуляции, а также невозможность своевременно найти соответствующий сегмент и, как следствие, «устаревание» ИХ КФ, могут привести к «срыву» процедуры коррекции, т.е. к резкому росту числа ошибок. В некотором роде данный эффект схож с эффектом размножения ошибок, возникающем при использовании ОСР. Поэтому

автором предложено ввести такой показатель как *вероятность устойчивой работы за заданное время и среднее время устойчивой работы*.

Результаты испытаний, приведенные в [3], подтверждают работоспособность и устойчивость способа бестестовой адаптивной коррекции сигналов. Там же показано, что на реальных трассах значение среднего времени устойчивой работы составляет величину более двух минут, что не превышает среднее время на передачу сообщений в различных системах передачи данных.

Длина искомого сегмента может быть различной с ограничением «снизу» (не менее интервала многолучевости), что повышает вероятность нахождения такого сегмента. Вычисленная экспериментально вероятность нахождения такого сегмента в последовательности длиной 127 бит составляет величину более $P_{\text{тест}} = 0,98$.

Также автором в [6; 43] приведена модернизация разработанного алгоритма ОСР для способа бестестовой адаптивной коррекции, основанного на уточнении ИХ канала и ИХ КФ путем взвешенного вычитания информационных символов до и после найденного сегмента, используемого в качестве теста. Зависимость помехоустойчивости при применении данного алгоритма приведена на рисунке 5 (кривая 2). Применение данного алгоритма ОСР обеспечивает как существенный выигрыш в помехоустойчивости (до 5 дБ), так и повышает устойчивость самой бестестовой адаптивной коррекции, т.к. уменьшение вероятности ошибки на бит повышает вероятность правильного декодирования кодового блока.

Таким образом, автором разработан устойчивый способ бестестовой адаптивной коррекции сигналов, обеспечивающие повышение информационной скорости до 30–50%. Кроме того, при сохранении информационной скорости источника сообщений имеется возможность использовать кодовые конструкции с большей избыточностью, обеспечивающие большую исправляющую способность, что значительно повышает вероятность доведения сообщений. Также отметим, что при использовании сегментов информационных сигналов имеется возможность производить более частую подстройку коэффициентов КФ, тем самым обеспечивая более оперативное изменение системы (адаптацию КФ) к изменениям в канале связи, в отличие от способов с использованием тестовых сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

1. Предложен способ нахождения ИХ КФ на основе решения задачи идентификации канала. Рассмотрен вопрос физической реализуемости КФ как обратного фильтра для многолучевого канала связи.
2. Получены выражения для решения интегрального уравнения типа свертки с неточно заданной правой частью в базисе Хартли, что позволило значительно повысить вычислительную эффективность алгоритма коррекции сигнала. Так, при нахождении ИХ канала в базисе Хартли число операций сложения меньше более чем в 5 раз, операций умножения в – 3 раза и операций деления – в 2 раза. Также предложено применение двухпараметрических стабилизирующих функций, учитывающих полосовые свойства радиосигналов, что позволило повысить точность расчета коэффициентов ИХ на 15-20 %.

3. Разработаны методы выбора оптимального значения параметров алгоритмов расчета ИХ (параметр регуляризации, размер шага, порядок фильтра и т.п.). Один из разработанных методов может быть использован для выбора соответствующего параметра при использовании способа бестестовой адаптивной коррекции сигналов. Выбор оптимального параметра алгоритма коррекции позволяет повысить точность расчета ИХ канала и ИХ КФ и, как следствие, повысить помехоустойчивость, обеспечивая выигрыш порядка 2-4 дБ.
4. Разработаны способы адаптивной коррекции, использующие тестовые сигналы, и позволяющие значительно повысить помехоустойчивость последовательных одночастотных КВ модемов передачи данных по сравнению с известными зарубежными аналогами. Выигрыш составляет от 2 до 5 дБ. Часть этих способов может быть применена в существующих одночастотных КВ модемах без изменения сигнальных конструкций.
5. Разработан способ бестестовой адаптивной коррекции, основанный на анализе результатов декодирования блоковых или сверточных кодов и расчете ИХ канала и КФ с использованием сегментов информационных сигналов. Проведена модернизация алгоритма ОСР для способа бестестовой адаптивной коррекции сигналов, обеспечивающего выигрыш порядка 3-5 дБ.
6. Применение способа бестестовой адаптивной коррекции сигналов позволяет повысить среднюю информационную скорость передачи до 50 %, либо при сохранении информационной скорости источника сообщений имеется возможность использовать кодовые конструкции с большей избыточностью, обеспечивающие большую исправляющую способность, что приводит к повышению вероятности доведения сообщений.
7. Использование способа бестестовой адаптивной коррекции позволяет производить более частую подстройку коэффициентов КФ, тем самым обеспечивая более оперативное изменение системы (адаптацию КФ) с учетом изменений в канале связи.
8. Таким образом, цель настоящей работы, состоящая в повышении эффективности коротковолновой радиолинии последовательной передачи данных, достигнута. Разработанные методы и способы позволяют значительно улучшить вероятностно-временные характеристики КВ радиолинии последовательной одночастотной передачи данных.
9. Работоспособность всех способов подтверждается результатами компьютерного моделирования, а также результатами стендовых (с использованием имитатора КВ радиоканала) и трассовых испытаний с использованием каналовобразующих средств, входящих в состав адаптивного автоматизированного комплекса технических средств АА КТС «Пирс» разработки АО «РИМР».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях (из Перечня ВАК)

1. Егоров, В. В. Бестестовая адаптивная коррекция сигналов в КВ системах последовательной передачи данных / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков, А. Н. Мингалев // Электросвязь. – 2011. – № 11. – С. 32-34.

2. Егоров, В. В. Использование преобразования Хартли для решения интегрального уравнения типа свертки / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 2. – С. 2-6.
3. Маслаков, М. Л. Высокоскоростной последовательный КВ радиомодем передачи данных / М. Л. Маслаков // Электросвязь. – 2014. – № 7. – С. 40-43.
4. Егоров, В. В. Бестестовые методы адаптивной коррекции сигналов в многолучевых радиоканалах / В. В. Егоров, К. В. Зайченко, М. Л. Маслаков, В. Ф. Михайлов // Радиотехника. – 2017. – № 5. – С. 10-13.
5. Маслаков, М. Л. Применение защитных интервалов в одночастотных КВ модемах передачи данных / М. Л. Маслаков // Цифровая обработка сигналов. – 2017. – № 2. – С. 13-18.
6. Маслаков, М. Л. Новый алгоритм адаптивной коррекции с обратной связью по решению для передачи данных в канале с межсимвольной интерференцией / М. Л. Маслаков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2018. – № 1. – С. 44-51.
7. Маслаков, М. Л. Применение двухпараметрических стабилизирующих функций при решении интегрального уравнения типа свертки методом регуляризации / М. Л. Маслаков // Журн. вычисл. матем. и мат. физ. – 2018. – Т. 58. – № 4. С. 541-549.
8. Маслаков, М. Л. Новые методы адаптивной коррекции сигналов в авиационном модеме передачи данных коротковолнового диапазона / М. Л. Маслаков // Труды МАИ. – 2018. – № 98. – С. 26. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90435>.
9. Маслаков, М. Л. Применение бестестовых методов для оценки состояния радиоканала / М. Л. Маслаков, М. С. Смаль // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 4. – С. 32-37.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus

10. Maslakov, M. L. Application of Two-Parameter Stabilizing Functions in Solving a Convolution-Type Integral Equation by Regularization Method / M. L. Maslakov // Comput. Math. Math. Phys. – 2018. – I. 58 – № 4. P. 529-536.

Патенты на изобретения

11. Пат. 2510950 РФ. Способ передачи данных по многолучевому каналу связи с адаптивной настройкой корректирующего фильтра по информационным сигналам / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 10.04.2014, Бюл. № 10. – 7 с.
12. Пат. 2573270 РФ. Способ адаптивной коррекции с компенсацией защитных интервалов / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 20.01.2016, Бюл. № 2. – 6 с.
13. Пат. 2653485 РФ. Способ адаптивного выбора оптимального параметра алгоритма коррекции сигналов / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ПАО «РИМР»; 08.05.2018, Бюл. № 13. – 10 с.

Патенты на полезные модели

14. Пат. 143804 РФ. Устройство передачи данных с адаптивной настройкой корректирующего фильтра по результатам синдромного декодирования информационных кодовых блоков / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 27.07.2014, Бюл. № 21. – 2 с.

15. Пат. 147413 РФ. Устройство адаптивной коррекции с обратной связью по решению / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 10.11.2014, Бюл. № 31.– 3 с.
16. Пат. 148638 РФ. Устройство адаптивной настройки корректирующего фильтра с квазикогерентным сложением теста / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 10.12.2014, Бюл. № 34.– 1 с.
17. Пат. 154750 РФ. Устройство адаптивной настройки корректирующего фильтра с весовым квазикогерентным сложением теста / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 10.09.2015, Бюл. № 25.– 2 с.
18. Пат. 161276 РФ. Устройство совместной передачи сообщений и служебной информации в последовательных системах / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 20.04.2016, Бюл. № 11. – 2 с.
19. Пат. 163605 РФ. Устройство адаптивной настройки корректирующего фильтра с синфазным сложением теста / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 27.07.2016, Бюл. № 21.– 2 с.
20. Пат. 165348 РФ. Устройство фазирования узкополосных сигналов / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 10.10.2016, Бюл. № 28. – 2 с.
21. Пат. 166744 РФ. Устройство бестестовой адаптивной коррекции с обратной связью по решению / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 10.12.2016, Бюл. № 34. – 3 с.
22. Пат. 168000 РФ. Устройство совместной передачи информации и тестовых сигналов в каналах с межсимвольной интерференцией / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ОАО «РИМР»; 16.01.2017, Бюл. № 2. – 6 с.
23. Пат. 172181 РФ. Устройство совместной передачи информации и тестовых сигналов со сдвигом по частоте в каналах с межсимвольной интерференцией / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ПАО «РИМР»; 30.06.2017, Бюл. № 19. – 8 с.
24. Пат. 174155 РФ. Устройство бестестовой адаптивной коррекции по результатам декодирования сверточного кода / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ПАО «РИМР»; 05.10.2017, Бюл. № 28. – 10 с.
25. Пат. 178763 РФ. Устройство адаптивной коррекции с обратной связью по решению в каналах с межсимвольной интерференцией / Егоров В.В., Катанович А.А., Лобов С.А., Маслаков М.Л. [и др.]; ПАО «РИМР»; 18.04.2018, Бюл. №11.–10 с.

Публикации в материалах международных и российских конференций

26. Маслаков, М. Л. Разработка алгоритма адаптивной коррекции с обратной связью по решению для модема КВ связи / М. Л. Маслаков, В. В. Егоров // XXXIX недели науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. IX. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 31-32.
27. Егоров, В. В. Высокоскоростные последовательные КВ радиомодемы / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков, А. Н. Мингалев // 13-я международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2011». 30 марта - 1 апреля 2011, Москва, доклады. – Т. 1. – С. 183–186.

28. Егоров, В. В. Адаптивная коррекция сигналов в КВ системах последовательной передачи сообщений по информационным сигналам / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков, А. Н. Мингалев // XVII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь», 12-14 апреля 2011, Воронеж, доклады. – Т. 2. – С. 955-961.
29. Егоров, В. В. Совместная передача тестовых и информационных последовательностей в системах последовательной передачи данных с адаптивной коррекцией / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков, А. Н. Мингалев // 14-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2012», 28-30 марта 2012, Москва, доклады. – Т. 1. – С. 142-145.
30. Егоров, В. В. Адаптивная коррекция сигналов в многочастотных КВ системах передачи данных / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков // VI Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», 19-22 ноября 2012, Москва, доклады. – С. 127-130.
31. Маслаков, М. Л. Совместная передача служебных и информационных сообщений в последовательных КВ системах передачи данных / М. Л. Маслаков // 15-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA 2013», 27-29 марта 2013, Москва, доклады. – С. 162-166.
32. Маслаков, М. Л. Результаты трассовых испытаний последовательного КВ модема / М. Л. Маслаков, А. Н. Мингалев // VII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», 25-27 ноября 2013, Москва, доклады. – С. 266-269.
33. Маслаков, М. Л. Адаптивная коррекция сигналов с компенсацией шума / М. Л. Маслаков // 16-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA 2014», 26-28 марта 2014, Москва, доклады. – С. 220-223.
34. Егоров, В. В. Адаптивные корректирующие фильтры в рекурсивной форме / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков, А. Н. Мингалев // VIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», 24-26 ноября 2014, Москва, доклады. – С. 213-218.
35. Маслаков, М. Л. Метод адаптивной коррекции с весовым квазикогерентным сложением тестовых сигналов / М. Л. Маслаков // 17-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA 2015», 25-27 марта 2015, Москва, доклады. – С. 258-261.
36. Маслаков, М. Л. Использование преобразования Хартли в задачах адаптивной коррекции / М. Л. Маслаков // VI научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «РИМР», 19 мая 2015, Санкт-Петербург, тезисы. – С. 4-9.
37. Егоров, В. В. Влияние выбора параметра регуляризации на помехоустойчивость в задачах адаптивной коррекции сигналов / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков // IX Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», 23-25 ноября 2015, Москва, доклады. – С. 182-187.
38. Маслаков, М. Л. Способы использования квазикогерентного сложения в задачах адаптивной коррекции / М. Л. Маслаков // VI научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «РИМР», 18 мая 2016, Санкт-Петербург, тезисы. – С. 11-16.
39. Маслаков, М. Л. Методы повышения ОСШ в задачах адаптивной коррекции / М. Л. Маслаков // X Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», 21-23 ноября 2016, Москва, доклады. – С. 267-271.

40. Егоров, В. В. Методы бестестовой адаптивной коррекции в последовательных КВ модемах / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. в 3 ч. Ч. II. Технические науки / СПб: ГУАП. СПб, 2017. С. 80-82.
41. Егоров, В. В. Бестестовые методы адаптивной коррекции сигналов в авиационных модемах передачи данных коротковолнового диапазона / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков, А. Н. Мингалев // Сб. науч. ст. по материалам VI Международной научно-технической конференции, посвященной дню образования войск связи «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией». – 8 – 9 ноября 2017, Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА». – С. 91-94.
42. Егоров, В. В. Передача данных территориально распределенных автоматизированных систем реального времени по КВ радиоканалу / В. В. Егоров, М. Л. Маслаков, А. Н. Мингалев, М. С. Смаль, А. Е. Тимофеев // Радиотехника, электроника и связь: сб. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. 15-16 ноября 2017, Омск: АО «ОНИИП». – С. 165-169.
43. Маслаков, М. Л. Алгоритм бестестовой адаптивной коррекции с обратной связью по решению / М. Л. Маслаков // XI Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», 27-29 ноября 2017, Москва, доклады. – С. 91-93.
44. М. Л. Маслаков. Проблема выбора порядка адаптивного эквалайзера / Маслаков М. Л. // 20-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA 2018». Москва. 28-30 марта 2018 – Т. 1. – С. 204-208.

Публикации в других изданиях

45. Маслаков, М. Л. Бестестовые методы адаптивной коррекции в каналах с межсимвольной интерференцией / М. Л. Маслаков // Итоги диссертационных исследований. Т. 1. – Материалы V Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2013. – С. 41-49.
46. Егоров, В. В. Пути построения адаптивных систем коротковолновой радиосвязи [Электронный ресурс] / В. В. Егоров, А. Н. Мингалев, А. Е. Тимофеев, М. С. Смаль, М. Л. Маслаков // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – Т. 20. – С. 2831-2835. – Режим доступа: <http://e-koncept.ru/2014/54830.htm>.
47. Маслаков, М. Л. Бестестовые способы установления синхронизации систем радиосвязи / М. Л. Маслаков // Девятнадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов, СПб. – 2014. – С. 142.
48. Маслаков, М. Л. Новые методы адаптивной коррекции сигналов в авиационном модеме передачи данных коротковолнового диапазона / М. Л. Маслаков // 9-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации». Аннотации конкурсных работ. 20-24 ноября 2017, Москва : МАИ. – С. 130-131.
49. Маслаков, М. Л. Методы повышения помехоустойчивости последовательных КВ модемов / М. Л. Маслаков // Итоги диссертационных исследований. Т. 1. – Материалы IX Всероссийского конкурса молодых ученых, посвященного 70-летию Государственного ракетного центра им. академика В.П. Макеева. – М.: РАН, 2013. – С. 28-37.

Тираж 100 экз.
Отпечатано в АО «РИМР»
199178, г. Санкт-Петербург, 11 линия, д. 66
Тел.: (812) 328-44-09