

На правах рукописи



**Борисовская Анна Владимировна**

**МОДЕЛИ СИСТЕМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ СО  
СЛУЧАЙНЫМ ДОСТУПОМ И ЗАВИСИМЫМИ  
ИСТОЧНИКАМИ**

Специальность 2.2.15 —  
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на кафедре инфокоммуникационных технологий и систем связи.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Тюрликов Андрей Михайлович**

Официальные оппоненты: **Ляхов Андрей Игоревич**,  
доктор технических наук, профессор,  
Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича, лаборатория №18,  
Заведующий лабораторией

**Викулов Антон Сергеевич**,  
кандидат технических наук,  
ООО «Лаборатория Кьютэк», отдел беспроводных решений,  
Руководитель направления беспроводных решений

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», 117198, Россия, г. Москва, ул. Миклуха-Маклая, д. 6

Защита состоится 01.10.2024 в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.384.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А и на сайте [www.guar.ru](http://www.guar.ru)

Автореферат разослан 27.08.2024.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.384.01,  
канд. тех. наук, доцент



А.М. Сергеев

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В настоящее время системы Интернета вещей набирают популярность в различных областях. Они уже используются в промышленности, сельском хозяйстве, здравоохранении и системах «умного дома». Одним из наиболее распространенных сценариев Интернета вещей является сценарий массовой межмашинной связи. Данный сценарий описывает работу систем с большим числом маломощных устройств и лежит в основе большинства современных систем мониторинга.

Во многих системах мониторинга используется случайный множественный доступ (СМД) устройств к общему каналу связи. При выборе числа устройств, необходимых для обеспечения требуемой оперативности доставки данных и других показателей качества работы системы, возникает следующее **противоречие**. С одной стороны большое число устройств увеличивает вероятность обнаружения событий отдельными устройствами, а с другой стороны большое число устройств увеличивает количество конфликтов в общем канале связи, что снижает вероятность доставки данных о событиях, т.е. может ухудшить работу системы мониторинга в целом. **Для устранения данного противоречия** можно использовать тот факт, что в системах мониторинга устройства, находящиеся недалеко друг от друга, часто обнаруживают одно и то же явление. Поэтому данные от соседних устройств могут рассматриваться как данные, сформированные **зависимыми источниками**. Качество работы систем мониторинга можно улучшить, если учитывать зависимость данных от разных устройств. В настоящее время отсутствуют модели, позволяющие исследовать влияние учета зависимости данных от разных устройств на оперативность доставки данных и другие показатели качества работы таких систем.

Таким образом, задача повышения качества в системах Интернета вещей при учете зависимости данных от разных устройств является актуальной.

**Степень разработанности темы.** Сценарий массовой межмашинной связи и системы мониторинга, основанные на концепции Интернета вещей, рассматривались в работах отечественных и зарубежных авторов Ю. В. Гайдамаки, Р. В. Киричка, А. Е. Кучерявого, Е. А. Кучерявого, А. И. Ляхова, А. И. Парамонова, К. Е. Самуйлова, Т. М. Татарниковой, Е. М. Хорова, F. Van den Abeele, Y. H. Bae, H. Chen, J. Choi, J. Feng, Y. Jia, A. Munary, P. Popovski, H. T. Reda. и многих других.

В исследованиях сценария массовой межмашинной связи можно выделить два направления. Одно направление – системы мониторинга, в которых число устройств потенциально ничем неограничено и в процессе работы может меняться случайным образом. Другое направление – системы, в которых число устройств фиксированно и в процессе работы не меняется.

Вопросы стабильности систем со случайным множественным доступом и неограниченным числом абонентов исследовались Б. С. Цыбаковым, J. Carpetanakis, В. Najek, В. А. Михайловым. В отличие от других методов множественного доступа таких, как разделение канала по времени или частоте, использование случайного множественного доступа позволяет обеспечить конечную среднюю задержку при потенциально неограниченном числе абонентских устройств. В этих исследованиях было показано, что конечная средняя задержка обеспечивается при интенсивности входного потока меньше, чем  $e^{-1}$ . В противном случае с течением времени задержка в таких системах неограниченно возрастает, т.е. система перестает работать стабильно.

Системы СМД исследуются давно, а системы с зависимыми источниками стали исследоваться относительно недавно. С. Г. Фоссом, А. М. Тюрликовым и М. А. Гранкиным впервые была предложена модель системы со случайным доступом и множественным выходом. В отличие от ранее исследованных систем СМД она стабильна при любой интенсивности входного потока за счет учета зависимости данных от разных устройств. Однако такой показатель качества, как средняя задержка, в такой системе не исследовался.

Понятие среднего возраста информации, как показателя качества обслуживания, применительно к системам массового обслуживания впервые было сформулировано в работах S. K. Kaul, R. D. Yates, M. Gruteser, Y. Sun. Средний возраст информации в системах случайного множественного доступа, включая системы Интернета вещей, исследовался А. Фроловым, А. Munari, J. Feng, D. Fiems, S. Asvadi, D. S. Atabay, H. Chen, Y. H. Bae, H. Wang, Q. Abbas. В работах А. Zaccanago проводились исследования среднего возраста информации в системах с зависимыми источниками. Для системы с множественным выходом средний возраст информации не исследовался.

Сценарии массовой межмашинной связи с фиксированным числом устройств рассматривались в работах А. Ляхова, Е. Хорова, Д. Банкова, H. T. Reda, Y. Jia, M. Ragnolli, F. Van den Abeele, F. H. Khan, P. Popovski, J. Choi, L. Chetot, P. Agostini.

В работах А. Ляхова, Е. Хорова и Д. Банкова для таких систем были выявлены предельные характеристики скорости передачи данных с учетом особенностей технологии LoRa, широко используемой в настоящее время. Системы мониторинга на основе LoRa также исследовались в работах H. T. Reda, Y. Jia, M. Ragnolli, F. Van den Abeele и F. H. Khan. Однако модели с зависимыми источниками с учетом особенностей технологии LoRa в данных работах не рассматривались.

В работах P. Popovski, J. Choi, L. Chetot, P. Agostini рассматривались модели систем с фиксированным числом устройств и зависимыми источниками, но без учета специфики конкретной технологии. Основные

результаты были получены только с использованием имитационного моделирования.

Таким образом, в настоящее время существуют два направления исследований систем интернета вещей со случайным доступом и зависимыми источниками: системы со случайным и потенциально неограниченным числом устройств и системы с фиксированным числом устройств. В рамках данных направлений отсутствует связь между существующими моделями систем с зависимыми источниками, а также исследования влияния зависимости данных от разных устройств на показатели качества работы таких систем.

**Объектом исследования** являются системы Интернета вещей со случайным доступом и зависимыми источниками.

**Предметом исследования** являются модели, позволяющие исследовать влияние учета зависимости данных от разных устройств на показатели качества работы систем Интернета вещей со случайным доступом.

**Целью** диссертационной работы является повышение качества работы систем Интернета вещей при учете зависимости данных от разных источников.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

- 1) выполнить сравнительный анализ работ, в которых исследуются системы Интернета вещей с зависимыми источниками, и выявить общие особенности существующих моделей таких систем;
- 2) разработать модели для определения значений показателей качества работы систем со случайным доступом, зависимыми источниками и потенциально неограниченным числом устройств;
- 3) разработать модель и методику, позволяющие выбирать количество устройств, максимизирующее показатель качества работы систем мониторинга со случайным доступом, зависимыми источниками и фиксированным числом устройств;
- 4) выбрать наиболее распространенную технологию, которая используется для построения современных систем мониторинга, и предложить модель, позволяющую оценивать показатели качества работы таких систем с учетом особенностей этой технологии.

#### **Научная новизна.**

1. Впервые для систем со случайным доступом и зависимыми источниками введены два класса моделей: модели с появлением абонентов (число абонентов потенциально ничем не ограничено, процесс появления абонентов описывается пространственным точечным пуассоновским процессом) и модели с появлением событий (число абонентов фиксированно, процесс появления событий описывается пространственным точечным пуассоновским процессом).

2. Предложены модели с появлением абонентов, позволяющие, в отличие от ранее известных, получать верхнюю и нижнюю оценки средней задержки для системы со случайным доступом и множественным выходом.
3. Впервые предложен способ оценки среднего возраста информации для систем со случайным доступом и множественным выходом и исследована зависимость этого показателя от интенсивности потока сообщений в таких системах.
4. Разработана модель с появлением событий, отражающая основные особенности систем мониторинга, для которой, в отличие от ранее известных, получено в явном виде выражение для показателя качества работы таких систем.
5. Впервые предложена модель системы мониторинга, отражающая особенности технологии LoRa и в то же время учитывающая зависимость данных от разных источников.

**Теоретическая значимость.** Предложенные в диссертационной работе модели могут быть использованы при теоретическом анализе систем Интернета вещей со случайным доступом и зависимыми источниками.

**Практическая значимость.** Способы оценки средней задержки и среднего возраста информации в системах с появлением абонентов и методика для выбора числа сенсоров в системах с появлением событий позволяют оценить качество работы как существующих систем Интернета вещей, так и систем на стадии разработки.

**Внедрение результатов диссертационной работы.** Результаты диссертационной работы были использованы в опытно-конструкторских работах АО «Концерн «Гранит-Электрон» и ООО «Научно-производственное объединение программные комплексы реального времени», а также в рамках научно-исследовательских работ в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП): гос. задания от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга» и гранта Российского научного фонда № 22-19-00305 «Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом абонентов».

**Методология и методы исследования.** Методы исследования, которые использовались в диссертационной работе: теория информации, теория связи, теория случайных процессов, теория вероятностей, теория

Марковских цепей, методы математической оптимизации и методы имитационного моделирования.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Предложенные классы моделей – **модели с появлением абонентов и модели с появлением событий** – позволяют описывать, анализировать и сравнивать между собой различные системы массовой межмашинной связи с зависимыми источниками.
2. Разработанные способы оценки таких показателей качества, как средняя задержка и средний возраст информации, для **модели с появлением абонентов** позволяют исследовать зависимость этих показателей от параметров модели с помощью имитационного моделирования, а для средней задержки получать верхнюю оценку в явном виде.
3. Разработанные **модель с появлением событий** и методика позволяют выбирать количество устройств, максимизирующее такой показатель качества, как среднее число успешно переданных сообщений об одном событии.
4. Предложенная **модель с появлением событий, модифицированная с учетом особенностей технологии LoRa**, позволяет учитывать как специфику систем мониторинга, построенных по этой технологии, так и зависимость данных от разных источников.

**Достоверность.** Результаты диссертационной работы получены на основе общепринятых математических методов, согласуются с ранее известными результатами в области случайного множественного доступа и подтверждены результатами имитационного моделирования. Основные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях и доложены на крупных международных конференциях и симпозиумах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах в период с 2021 по 2023 гг.: на международной научной конференции «Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах» 2022 г.; на конференциях «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)» 2021–2023 гг.; на симпозиуме «XVII International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY)» 2021 г.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» (пунктам 1, 8 и 18). В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль в решении задач.

**Личный вклад.** Все результаты, представленные в тексте диссертационной работы, получены автором лично.

**Публикации.** Материалы, отражающие основные результаты диссертации, опубликованы в 11 печатных работах: 4 работы – в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе 2 из них без соавторов; 3 – в изданиях, индексируемых Scopus, и 3 – в сборниках конференций, индексируемых РИНЦ. По теме диссертации получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения и 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 144 страницы, включая 57 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 128 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, описывается степень разработанности темы, формулируются цель и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **первом разделе** рассматривается сценарий систем Интернета вещей с большим числом устройств и случайным множественным доступом (СМД). Отмечается, что в теории СМД абонентские устройства принято называть абонентами, поэтому устройства для сбора информации (сенсоры, датчики и т.д.) в системах Интернета вещей в диссертационной работе предлагается называть абонентами. Приводится сравнительный анализ работ, в которых исследуются системы Интернета вещей со случайным множественным доступом и зависимыми источниками. По результатам сравнительного анализа делается вывод, что множество различных моделей можно разделить на два класса: **модели с появлением абонентов и модели с появлением событий**. Предлагается обобщенная система допущений для обоих классов моделей. Основные допущения приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Обобщенная система допущений

	Модель с появлением абонентов	Модель с появлением событий
1	В системе имеется базовая станция и $K$ каналов.	
2	Процесс появления абонентов в системе описывается	Имеется $N$ абонентов, которые распределены равномерно в зоне действия базовой станции. Процесс появления событий в системе описывается
	Пространственным Точечным Пуассоновским Процессом с параметром $\lambda$	

3	Абоненты, которые появились в системе, становятся активными.	Абоненты, которые затронуты событием, становятся активными.
4	Время работы системы разделено на окна. В начале каждого окна активные абоненты в соответствии с некоторым алгоритмом принимают решение о передаче сообщения. Абоненты, которые приняли решение передавать, выбирают случайным образом один из $K$ каналов для передачи сообщения.	
5	В каждом окне и в каждом канале может произойти одна из трех ситуаций «успех», «пусто» или «конфликт». Ошибки, вызванные шумами в канале, отсутствуют и искажение сообщения может произойти только из-за конфликта в канале.	
6	После успешной передачи абонент перестает быть активным. Также перестают быть активными абоненты, находящиеся на расстоянии не больше чем $r$ от абонента, у которого был «успех». Абоненты, которые перестали быть активными, дальше в системе не участвуют.	В конце окна все абоненты перестают быть активными.

Общим в данных классах моделей является использование пространственного точечного пуассоновского процесса с параметром  $\lambda$  (в моделях с появлением абонентов – для описания процесса появления абонентов, а в моделях с появлением событий – для описания процесса появления событий) и алгоритма передачи данных, основанного на случайном множественном доступе. Основным отличием данных классов моделей является поведение абонентов. В моделях с появлением абонентов абоненты случайным образом появляются в системе, передают данные на базовую станцию и покидают систему. В моделях с появлением событий абоненты постоянно находятся в зоне действия базовой станции и передают данные на базовую станцию о событиях, происходящих в системе.

Основные параметры моделей и исследуемые в работе показатели качества работы систем приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Параметры моделей и исследуемые в работе показатели качества работы систем

	Модель с появлением абонентов	Модель с появлением событий
<b>Параметры моделей</b>		
1	Параметр или набор параметров, задающих форму зоны действия базовой станции	
2	Число каналов – $K$	

3	Радиус области распространения события – $r$	
4	Число абонентов – $N$	
5	Интенсивность пространственного точечного пуассоновского процесса – $\lambda$	
	[число абонентов, появившихся в единицу времени на единице площади]	[число событий, появившихся в единицу времени на единице площади]
<b>Исследуемые в работе показатели качества работы систем</b>		
1	Средняя задержка – $\bar{D}$	Среднее число успешно переданных сообщений об одном событии – $\bar{T}$
2	Средний возраст информации – $\frac{\bar{D}}{\Delta}$	Вероятность доставки информации о событии – $P$

В первом разделе даются определения показателей качества работы систем с зависимыми источниками, исследуемых в данной диссертационной работе. Определение появившегося относительно недавно показателя – среднего возраста информации – поясняется на примере системы массового обслуживания.

Также в этом разделе предлагается использовать упрощенную модель с зоной действия базовой станции в виде окружности для изучения свойств моделей с зависимыми источниками. Данная модель легче анализируется и при этом сохраняет основные свойства систем с зависимыми источниками. На рисунке 1 приведены примеры упрощенных моделей с зоной действия базовой станции в виде окружности для обоих классов моделей.

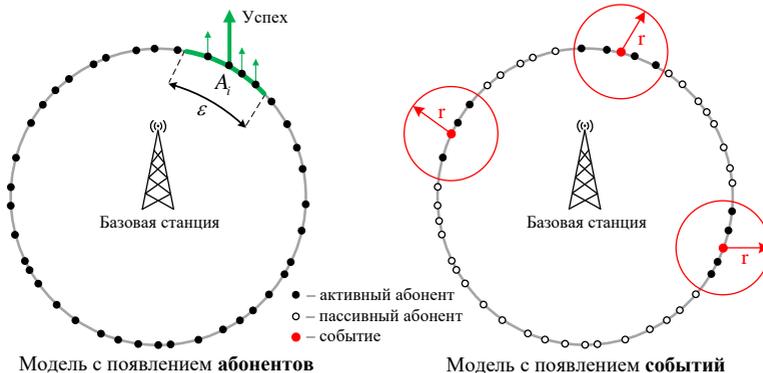


Рисунок 1 — Представление зоны действия базовой станции в виде окружности для изучения свойств моделей с зависимыми источниками

При исследовании систем случайного множественного доступа предполагается, что известно число активных абонентов. Однако в реальных системах это допущение не действует. Во второй части первого раздела

рассматривается алгоритм «Адаптивная синхронная АЛОНА», в котором вероятность передачи не зависит от количества активных абонентов. В данном алгоритме абоненты некоторым образом меняют вероятность передачи в зависимости от событий в канале.

Предложенные в первом разделе классы моделей (модели с появлением абонентов и модели с появлением событий) отражают основные особенности систем Интернета вещей со случайным доступом и зависимыми источниками. Данные модели позволяют описывать, анализировать и сравнивать между собой такие системы.

Во втором разделе рассматривается модель системы со случайным доступом и множественным выходом абонентов из системы при успешной передаче одного абонента. Число абонентов в данной модели потенциально ничем не ограничено.

Рассматриваемая модель удовлетворяет допущениям **модели с появлением абонентов**. Для нее предлагаются способы оценки показателей качества работы системы таких, как **средняя задержка и средний возраст информации**. В данной модели абоненты передают данные в канал с вероятностью  $p_t = 1/N_t$ , где  $N_t$  – число активных абонентов. Если в окне произошло событие «успех», то абонент, который передавал и абоненты, которые находятся на расстоянии  $\varepsilon/2$  от него, покидают систему.

Из работы С.Г. Фосса 2017 г. следует, что средняя задержка в системе с множественным выходом конечна при любой интенсивности входного потока, однако задача вычисления средней задержки в такой системе не исследовалась.

Функционирование данной модели задается следующим рекуррентным выражением:

$$\mathbb{U}_{t+1} = (\mathbb{U}_t \setminus \mathbb{Y}_t) \cup \mathbb{X}_t, \quad (1)$$

- $\mathbb{U}_t$  – множество, элементами которого являются координаты абонентов, имеющих в системе к окну  $t$ .  $N_t$  – мощность множества  $\mathbb{U}_t$ , т.е.  $N_t = |\mathbb{U}_t|$  ( $N_t$  – число активных абонентов);
- $\mathbb{Y}_t$  – множество, элементами которого являются координаты абонентов, которые перестали быть активными в окне  $t$ .  $L_t$  – мощность множества  $\mathbb{Y}_t$  т.е.  $L_t = |\mathbb{Y}_t|$ ;
- $\mathbb{X}_t$  – множество, элементами которого являются координаты абонентов, появившихся в системе в окне  $t$ .  $V_t$  – мощность множества  $\mathbb{X}_t$  т.е.  $V_t = |\mathbb{X}_t|$ .

Из выражения (1) следует, что эта модель описывается многомерной Марковской цепью с несчетным числом состояний. В настоящее время не существует подходов для анализа таких Марковских цепей. Для краткости изложения описанная выше модель в диссертационной работе называется моделью *МО*.

Для построения верхней и нижней оценок средней задержки для системы с множественным выходом предлагаются две вспомогательные модели  $M1$  и  $M2$  ( $M1$  – для построения верхней оценки,  $M2$  – для построения нижней оценки). В отличие от модели  $M0$  в модели  $M1$  в случае «успеха» все абоненты, оставшиеся в системе, равномерно перераспределяются по окружности. В модели  $M2$  окружность разделена на  $k$  частей. Если в окне произошло событие «успех», то абонент, который передавал, и абоненты, которые находятся в той же части, покидают систему.

Функционирование модели  $M1$  описывается следующим рекуррентным выражением:

$$N_{t+1} = N_t - L_t + V_t, \quad (2)$$

где  $N_t$  – число активных абонентов в окне  $t$ ;  $L_t$  – число абонентов, которые перестают быть активными в окне  $t$  и  $V_t$  – число абонентов, появившихся в системе в окне  $t$ .

Из выражения (2) следует, что данную модель можно описать одномомерной Марковской цепью со счетным числом состояний. В работе описывается подход для получения стационарного распределения такой Марковской цепи и описывается способ вычисления на основе этого распределения оценки средней задержки с любой заданной точностью. Также в работе получено приближенное выражение для средней задержки

$$\overline{D}_{M1} \approx \frac{\Lambda e + \varepsilon - 1}{\varepsilon \Lambda}.$$

Функционирование модели  $M2$  может быть описано следующими рекуррентными выражениями:

$$\begin{cases} N_{t+1}^1 = N_t^1 - T^1(N_t^1, N_t^2, \dots, N_t^k) + V_t^1 \\ N_{t+1}^2 = N_t^2 - T^2(N_t^1, N_t^2, \dots, N_t^k) + V_t^2 \\ \dots \\ N_{t+1}^k = N_t^k - T^k(N_t^1, N_t^2, \dots, N_t^k) + V_t^k \end{cases} \quad (3)$$

- $N_t^i$  – число активных абонентов в системе в окне  $t$  в части  $i$ ;
- $T^i$  – число абонентов, которые перестают быть активными в окне  $t$  в части  $i$ ;
- $V_t^i$  – число абонентов, появившихся в системе в окне  $t$  в части  $i$ .

Из (3) следует, что модель  $M2$  может быть описана  $k$ -мерной Марковской цепью со счетным числом состояний.

На рисунке 2 представлены зависимости средней задержки от интенсивности входного потока для моделей  $M0$ ,  $M1$  и  $M2$ . Полученные результаты иллюстрируют, что средняя задержка, полученная для модели  $M1$  двумя разными способами является верхней оценкой средней задержки

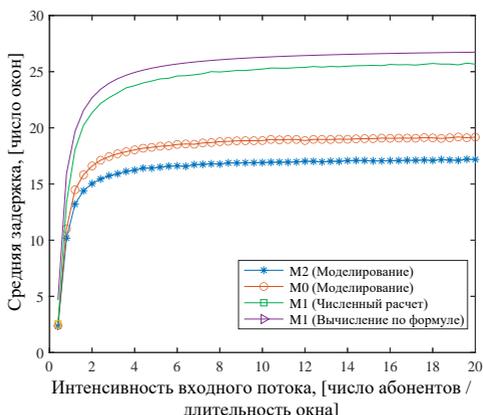


Рисунок 2 — Верхняя и нижняя оценки средней задержки для системы с множественным выходом

для модели  $M_0$ . А средняя задержка, полученная для модели  $M_2$  является нижней оценкой средней задержки для модели  $M_0$ .

Также в этом разделе предложен способ определения среднего возраста информации для системы с множественным выходом. С учетом предложенного способа определения среднего возраста информации в диссертационной работе получены зависимости этого показателя от интенсивности входного потока в системе с алгоритмом ALOHA и в системе с множественным выходом (рисунок 3).

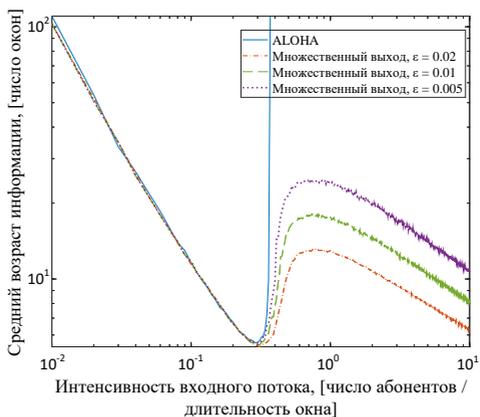


Рисунок 3 — Средний возраст информации в системах со случайным множественным доступом

Во втором разделе получены следующие результаты для модели с появлением абонентов.

- Предложены вспомогательные модели, которые позволяют получать нижнюю и верхнюю оценки такого традиционного показателя качества, как средняя задержка. При этом для верхней оценки получена явная зависимость от параметров исходной модели с появлением абонентов.
- Для среднего возраста информации, который относительно недавно стал рассматриваться, как показатель качества, предложен способ его определения и исследована его зависимость от интенсивности входного потока. Отмечено, что в отличие от других систем СМД средний возраст информации в системе с множественным выходом конечен при любой интенсивности входного потока, отличной от нуля, за счет учета зависимости данных от разных источников.

В **третьем разделе** предлагается модель системы мониторинга (рисунок 4). Эта модель удовлетворяет допущениям **модели с появлением событий** и описывается следующим набором параметров:  $N$  – число сенсоров,  $K$  – число частотных каналов,  $r$  – радиус области распространения события,  $\Lambda$  – среднее число событий, которые затрагивают зону действия базовой станции. Форма зоны действия базовой станции в данной модели может быть любой плоской выпуклой фигурой.

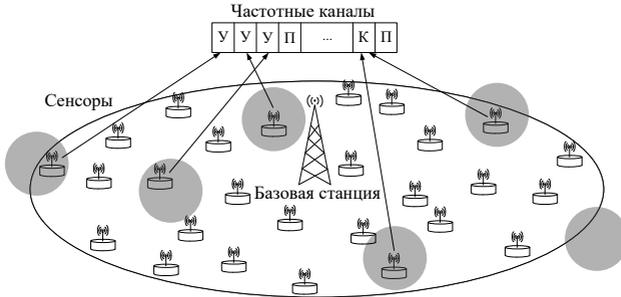


Рисунок 4 — Схематичное представление модели системы мониторинга

Для предложенной модели вводится показатель качества работы системы – среднее число успешно переданных сообщений об одном событии

$$T(N) = \frac{M(N)}{\Lambda},$$

где  $N$  – число сенсоров в системе, а  $M(N)$  – среднее число успешно переданных сообщений в окне.

В работе показано, как вывести выражение для точного значения показателя

$$T(N) = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\Lambda^n}{n!} e^{-\Lambda} \sum_{i=1}^N \left( \Pr \{i|n\} i \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{i-1} \right) \right)}{\Lambda},$$

где  $\Pr \{i|n\}$  – вероятность, что в произвольно выбранном окне, в котором возникло  $n$  событий, будут передавать  $i$  сенсоров. Эта вероятность зависит от форм и размеров зоны действия базовой станции и области распространения события. Поэтому в общем случае она может быть вычислена только с помощью метода Монте-Карло.

В разделе предлагается способ получения оценки данного показателя. Для этого вычисляется  $\phi(n)$  – доля площади зоны действия базовой станции, затронутая  $n$  событиями. В работе показано, как используя методы стохастической геометрии, получить выражение для  $\phi(n)$ :

$$\phi(n) = 1 - \left( \frac{2\pi S + lL}{2\pi(s + S) + lL} \right)^n, \quad (4)$$

где  $S$  и  $L$  – площадь и периметр зоны действия базовой станции;  $s$  и  $l$  – площадь и периметр области распространения события. Данное выражение справедливо для любых плоских выпуклых форм зоны действия базовой станции и области распространения событий.

На основе выражения (4) в работе получено следующее выражение для оценки показателя:

$$\tilde{T}(N) = \frac{\phi(\Lambda)N \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{\phi(\Lambda)N-1}}{\Lambda}. \quad (5)$$

Данная оценка позволяет сформулировать и решить в явном виде оптимизационную задачу по вычислению числа сенсоров, необходимого для обеспечения хорошего качества работы системы. Подоптимальное число сенсоров в системе – число сенсоров максимизирующее оценку (5):

$$\tilde{N}_{opt} = \arg \max_N \tilde{T}(N) = \frac{K}{\phi(\Lambda)}.$$

На рисунке 5 представлены зависимости точного значения и оценки показателя от числа сенсоров в системе. Число сенсоров, которое максимизирует оценку  $\tilde{T}(N)$ , близко к числу сенсоров, максимизирующему точное значение  $T(N)$ .

На основе полученной оценки (5) предлагается методика определения числа сенсоров в системе.

1. Зафиксировать параметры системы  $r$ ,  $\Lambda$  и  $K$  и форму зоны действия базовой станции.
2. Получить выражение для  $\phi(\Lambda)$  с учетом формы зоны действия базовой станции и радиуса области распространения события.
3. Если не задано пороговое значение показателя качества работы системы, то найти число сенсоров  $\tilde{N}_{opt}$  как

$$\tilde{N}_{opt} = \arg \max_N \tilde{T}(N) = \frac{K}{\phi(\Lambda)}.$$

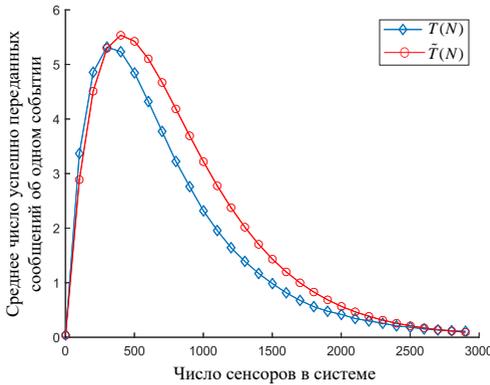


Рисунок 5 — Зависимость среднего числа успешно переданных сообщений об одном событии от числа сенсоров в системе

Если задано пороговое значение показателя качества работы системы  $T_{thr}$ , то найти число сенсоров  $\tilde{N}_{opt}$  как корень уравнения

$$\tilde{T}(N) = T_{thr}.$$

Модель и методика, предложенные в третьем разделе, позволяют выбирать количество устройств при проектировании систем мониторинга, максимизирующее показатель качества работы таких систем – среднее число успешно переданных сообщений об одном событии.

В четвертом разделе исследуется использование модели с появлением событий для анализа систем мониторинга, построенных по технологии LoRa. Отмечается, что технология LoRa является одной из самых гибких и распространенных технологий, используемых как в зарубежных, так и в отечественных системах мониторинга и при этом в 2024 году утвержден новый национальный стандарт ГОСТ Р 71168-2023 «Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU», основанный на технологии LoRa. В разделе предлагается модель системы мониторинга (рисунок 6), построенной по технологии LoRa. Предлагаемая модель учитывает ключевые особенности протокола LoRaWAN (Long Range Wide Area Network): использование алгоритма случайного доступа ALOHA, поддержка нескольких частотных каналов и применение специального вида модуляции сигналов с расширением спектра (Chirp Spread Spectrum – CSS).

Данный вид модуляции характеризуется параметром, который называют коэффициентом расширения спектра (SF - Spreading Factor). Значения SF лежат в диапазоне от 7 до 12. Чем меньше коэффициент расширения спектра, тем выше скорость передачи данных, но ниже помехозащищенность. Сигналы с разными значениями SF ортогональны.

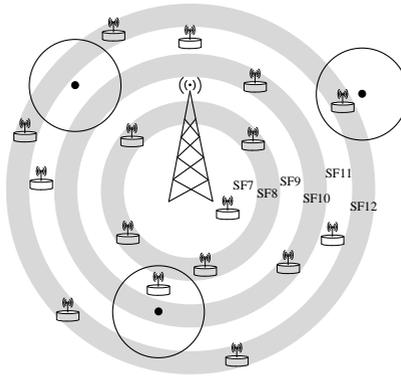


Рисунок 6 — Схематичное представление модели системы мониторинга, построенной по технологии LoRa

В предложенной модели предполагается, что сеть располагается на открытой местности, поэтому затухание сигнала зависит только от расстояния между сенсором и базовой станцией. Чем дальше от базовой станции расположен сенсор, тем большее значение SF ему назначается. Базовая станция способна различать сигналы, одновременно переданные от устройств с разными коэффициентами расширения спектра, т.к. сигналы, модулированные с разными SF, ортогональны. Таким образом, учет специфики используемого вида модуляции с расширением спектра позволяет представить данную модель в виде нескольких моделей, каждую из которых можно рассматривать отдельно (рисунок 7). В одной из моделей зона действия базовой станции будет иметь форму круга, а в остальных — форму кольца.

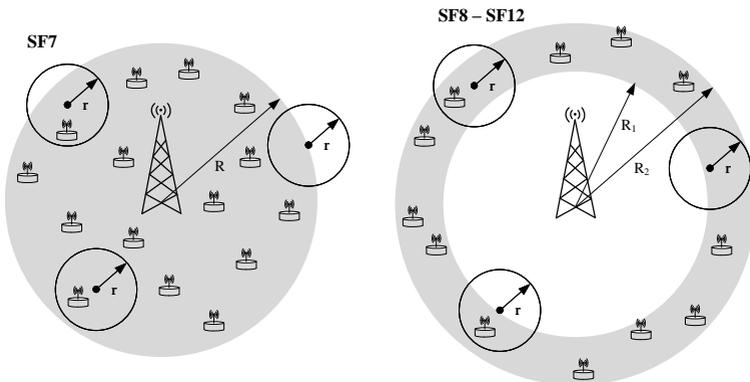


Рисунок 7 — Схематичное представление моделей для разных SF.

В работе показано, как для каждой упрощенной модели можно вычислить функцию  $\phi(\Lambda)$  и применить методику определения подоптимального числа сенсоров, предложенную в третьем разделе (таблица 3). Стоит отметить, что формула (4) справедлива для модели SF7, так как в этой модели зона действия базовой станции является кругом, но не может быть использована для моделей SF7-SF12, так как кольцо не является выпуклой фигурой. В работе получено обобщение для выражения (4) на случай кольцевидной формы зоны действия базовой станции.

Таблица 3 — Пример применения методики определения подоптимального числа сенсоров для системы мониторинга, построенной по технологии LoRa

<b>Зафиксируем параметры</b>	<b>SF7</b>	<b>SF8</b>	<b>SF9</b>
$K$ – число частотных каналов	8		
$\lambda$ – интенсивность появления событий [число событий/(м <sup>2</sup> ·с)]	$7 \cdot 10^{-7}$ (1/(100м <sup>2</sup> ·4ч))		
$r$ – радиус области распространения события, [м]	100		
$R$ – радиус зоны действия базовой станции, [км]	1.54	1.94	2.44
$\tau$ – длительность окна, [с]	0.134	0.247	0.453
$S$ – площадь зоны действия базовой станции, [км <sup>2</sup> ]	7.45	4.37	6.88
$\Lambda$ – среднее число событий, которые затрагивают зону действия базовой станции	0.79	1.13	3.05
<b>Вычислим <math>\phi(\Lambda)</math></b>	0.003	0.01	0.02
<b>Определим подоптимальное число сенсоров в системе по формуле <math>K/\phi(\Lambda)</math></b>	2714	805	442
$T$ – среднее число успешно переданных сообщений об одном событии	3.96	2.77	1.02
Число сенсоров при $T_{thr} = 1$	261	118	442

Также в этом разделе рассматривается вопрос оценки ещё одного показателя качества работы систем мониторинга, построенной по технологии LoRa – вероятности доставки информации о событии.

Предложенная в четвертом разделе модель системы мониторинга позволяет учитывать как особенности технологии LoRa, так и зависимость данных от разных источников.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

1. Выполнен сравнительный анализ работ, в которых исследуются системы Интернета вещей с зависимыми источниками.
2. По результатам сравнительного анализа введены два класса моделей для систем Интернета вещей с зависимыми источниками: модели с появлением абонентов и модели с появлением событий. Разработана обобщенная система допущений для обоих классов моделей. Предложена модель, максимально упрощенная с точки зрения аналитического анализа, но сохраняющая основные свойства систем Интернета вещей с зависимыми источниками.

3. Разработаны модели для построения верхней и нижней оценок средней задержки для систем со случайным доступом и множественным выходом абонентов из системы в случае успешной передачи.
4. Предложен способ оценки среднего возраста информации для систем со случайным доступом и множественным выходом. Показано, что в таких системах средний возраст информации, как и средняя задержка, конечен при любой интенсивности входного потока.
5. Введен показатель качества работы систем мониторинга с зависимыми источниками и предложен способ оценки этого показателя. Для данных систем разработана методика определения близкого к оптимальному числа сенсоров при заданных параметрах системы.
6. Предложена модель систем мониторинга, отражающая особенности технологии LoRa и в то же время учитывающая зависимость данных от разных источников. Для этой модели приведен пример применения методики определения подоптимального числа сенсоров в системе.

Предложенные модели систем Интернета вещей со случайным доступом и зависимыми источниками позволяют исследовать влияние учета зависимости данных от разных устройств на повышение качества работы таких систем.

## Публикации автора по теме диссертации

### Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК

1. *Борисовская, А. В.* Методика определения числа сенсоров в системах мониторинга экологической обстановки с использованием LPWAN сетей / *А. В. Борисовская, А. М. Тюрликов // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения.* 2022. — Т. 3. — С. 93–100.
2. *Борисовская, А. В.* Определение вероятности доставки информации о событии в системах мониторинга на основе сетей, построенных по технологии LoRaWAN / *А. В. Борисовская // Успехи современной радиоэлектроники.* — 2022. — Т. 76, № 12. — С. 82–89.
3. *Борисовская, А. В.* Оценка среднего возраста информации в системах со случайным доступом и множественным выходом / *А. В. Борисовская, А. М. Тюрликов // Информационно-управляющие системы.* — 2023. — Т. 1. — С. 51–60.
4. *Борисовская, А. В.* Модели сенсорных сетей с зависимыми источниками / *А. В. Борисовская // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт.* — 2023. — Т. 17, № 7. — С. 21–28.

### Работы в трудах, индексируемых Scopus

5. *Borisovskaya, A.* Reducing energy consumption in the IoT systems with unlimited number of devices / *A. Borisovskaya, A. Turlikov // Wave*

Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — 2021. — Pp. 1–6.

6. *Borisovskaya, A.* Estimation of average delay in systems with unsourced random access and multiple departure / A. Borisovskaya, A. Glebov, A. Turlikov // XVII International Symposium on Problems of Redundancy in Information and Control Systems. — 2021. — Pp. 28–33.
7. *Borisovskaya, A.* Numerical Calculation of Random Access Characteristics for Sensors with Correlated Activation / A. Borisovskaya, A. Turlikov, A. Fonfrygin // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — 2022. — Pp. 1–5.

### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

8. *Борисовская, А. В.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023619390 Российская Федерация. Программа для оценки вероятности доставки информации о событии в сенсорных сетях со случайным доступом и зависимыми источниками: № 2023618956; дата поступления 11.05.2023; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.05.2023; правообладатель ГУАП. / А. В. Борисовская, С. А. Сажаева

### **Научные статьи в журналах, включенных в РИНЦ, и доклады в материалах научных конференций**

9. *Борисовская, А. В.* Вычисление верхней оценки средней задержки для системы со случайным доступом и множественным выходом / А. В. Борисовская, А. М. Тюрликов // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах'22. — 2022. — С. 174–177.
10. *Белявский, В. С.* Обзор методов оценки среднего возраста информации в системах массового обслуживания / В. С. Белявский, А. В. Борисовская // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXVI Международной научной конференции. В 3-х частях. — 2023. — С. 16–20.
11. *Сажаева, С. А.* Оценка вероятности доставки информации о событии в сенсорных сетях со случайным множественным доступом / С. А. Сажаева, А. В. Борисовская // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXVI Международной научной конференции. В 3-х частях. — 2023. — С. 87–91.

---

Печатается в авторской редакции

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

---

Редакционно-издательский центр ГУАП

190000, Санкт-Петербург, Б. Морская улица, д. 67, лит. А