

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Тюрликов Андрей Михайлович

Санкт-Петербург — 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОПИСАНИЕ СИСТЕМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ С ЗАВИСИМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ МОДЕЛЯМИ С ПОЯВЛЕНИЕМ АБОНЕНТОВ И МОДЕЛЯМИ С ПОЯВЛЕНИЕМ СОБЫТИЙ	12
1.1 Вводные замечания	12
1.2 Сценарии и показатели качества работы систем Интернета вещей с большим числом устройств	14
1.3 Сравнительный анализ существующих моделей систем Интернета вещей с зависимыми источниками	24
1.4 Модели с появлением абонентов и модели с появлением событий .	29
1.5 Анализ устойчивости системы с доступом к каналу по алгоритму «Адаптивная синхронная Алоха»	33
1.6 Подход для уменьшения среднего числа повторных передач в алгоритме «Адаптивная синхронная Алоха»	37
1.7 Оценка среднего возраста информации в алгоритме «Адаптивная синхронная Алоха»	42
1.8 Выводы по разделу	45
2 СПОСОБЫ ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ ЗАДЕРЖКИ И СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИ С ПОЯВЛЕНИЕМ АБОНЕНТОВ	49
2.1 Вводные замечания	49
2.2 Модель системы с появлением абонентов и множественным выходом	49
2.3 Верхняя оценка средней задержки	52
2.4 Нижняя оценка средней задержки	54
2.5 Численный метод вычисления верхней оценки средней задержки	57
2.6 Сравнение результатов имитационного моделирования с оценками средней задержки	60
2.7 Сравнение понятий среднего возраста информации в СМО и системах СМД	65

2.8	Оценка среднего возраста информации в системе с множественным выходом	68
2.9	Выводы по разделу	72
3	ОЦЕНКА СРЕДНЕГО ЧИСЛА УСПЕШНО ПЕРЕДАННЫХ СООБЩЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИ С ПОЯВЛЕНИЕМ СОБЫТИЙ	73
3.1	Вводные замечания по разделу	73
3.2	Модель системы с появлением событий	73
3.3	Среднее число успешно переданных сообщений об одном событии	75
3.4	Оценка среднего числа успешно переданных сообщений об одном событии	77
3.5	Методика выбора числа сенсоров в системе с появлением событий	81
3.6	Верхняя оценка вероятности доставки информации о событии . .	84
3.7	Учет краевых эффектов при использовании модели с появлением событий	91
3.8	Выводы по разделу	92
4	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ С ПОЯВЛЕНИЕМ СОБЫТИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СИСТЕМ МОНИТОРИНГА, ПОСТРОЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ LoRa	94
4.1	Вводные замечания по разделу	94
4.2	Особенности технологии LoRa	95
4.3	Описание системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, моделью с появлением событий	100
4.4	Применение методики определения подоптимального числа сенсоров в системе мониторинга, построенной по технологии LoRa	102
4.5	Расчет вероятности доставки информации о событии в системе мониторинга, построенной по технологии LoRa	105
4.6	Моделирование систем, построенных по технологии LoRa, в симуляторе ns-3	111
4.7	Выводы по разделу	113
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115

	Стр.
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	119
СПИСОК РИСУНКОВ	133
СПИСОК ТАБЛИЦ	137
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт об использовании от ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт об использовании от АО «Концерн «Гранит-Электрон»	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт об использовании от ООО «НПО ПКРВ»	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	144

ВВЕДЕНИЕ

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. Гайдаки, 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. Hajek, 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 неограничено 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. Zappanò 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,

Н. Т. Reda, Y. Jia, M. Ragnolli, F. Van den Abeele, F. Н. 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 Н. Т. Reda, Y. Jia, M. Ragnolli, F. Van den Abeele и F. Н. 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 показа-

тель 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.

1 ОПИСАНИЕ СИСТЕМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ С ЗАВИСИМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ МОДЕЛЯМИ С ПОЯВЛЕНИЕМ АБОНЕНТОВ И МОДЕЛЯМИ С ПОЯВЛЕНИЕМ СОБЫТИЙ

1.1 Вводные замечания

Системы случайного множественного доступа (СМД) появились задолго до систем Интернета вещей (ИВ). Случайный доступ, в отличие от методов статического разделения канала и доступа по запросу, способен обеспечить стабильную работу системы при потенциально неограниченном числе абонентов. Основная идея случайного доступа заключается в том, что абоненты, у которых есть данные для передачи, отправляют их в канал с некоторой вероятностью. В работах [1–5] исследовались алгоритмы случайного доступа к каналу в системах с большим числом абонентов и троичной обратной связью, а в работах [6–9] – с двоичной обратной связью. В работе [2] доказано, что системы СМД стабильны при интенсивности входного потока меньше, чем e^{-1} . Базовым алгоритмом СМД является алгоритм АЛОНА, в котором абонент независимо от ситуации в канале передает данные с вероятностью p . На практике чаще используются два модифицированных алгоритма АЛОНА: «Оптимальный» и «Адаптивный». «Оптимальный» алгоритм АЛОНА основан на предположении о том, что в каждом окне t известно число абонентов N_t , имеющих готовое для передачи сообщение. Вероятность передачи в этом алгоритме равняется $1/N_t$. В 1988 году в работе [5] был предложен «Адаптивный» алгоритм АЛОНА. Данный алгоритм работает при условии, что число абонентов в системе, имеющих готовое для передачи сообщение, неизвестно. Но в то же время при определенных параметрах системы он остается стабильным при той же интенсивности входного потока, что и «Оптимальная» АЛОНА ($\lambda < e^{-1}$).

Впервые концепция «Интернет вещей» была сформулирована в 1999 году. Приблизительно в то же время появился сценарий массовой межмашинной связи. При делении ресурсов канала между большим числом устройств в любых системах можно использовать только случайный доступ. В связи с этим исследования систем СМД вновь стали востребованы.

В первом десятилетии XXI века было замечено, что в системах Интернета вещей данные, передаваемые от разных сенсоров, имеют высокую корреляцию. Начались исследования таких систем с целью использования зависимости данных для улучшения качества их работы. В 2017 году в работе [10] было предложено решение проблемы стабильности за счет учета зависимости данных от разных абонентов. Так появилась система с множественным выходом, которая устойчива к любым интенсивностям входного потока. Кроме того, в первом десятилетии XXI века был введен новый показатель качества работы систем передачи данных [11], который, в отличие от средней задержки, в полной мере отражает актуальность передаваемой информации. Данный показатель получил название – средний возраст информации.

На данный момент системы СМД с зависимыми источниками мало исследованы, в том числе и система с множественным выходом. Для таких систем не исследовалась как средняя задержка, так и средний возраст информации. На рисунке 1.1 приведены ключевые моменты истории развития систем СМД.



Рисунок 1.1 — История развития систем СМД

Данный раздел организован следующим образом. В подразделе 1.2 дается определение Интернета вещей, а также приводится описание основных сценариев и ключевых показателей качества работы систем Интернета вещей. В подразделе 1.3 приводится сравнительный анализ работ, в которых исследуются системы с зависимыми источниками. В подразделе 1.4 предлагается разделить модели систем с зависимыми источниками на два класса и вводится обобщенная система допущений для обоих классов моделей. В подразделах 2.6 и 1.6 рассматривается система СМД без зависимых источников и исследуется вопрос уменьшения энергозатрат и среднего возраста информации путем выбора параметров алгоритма «Адаптивная» АЛОНА.

Основные результаты данного раздела опубликованы в работах [12] и [13].

1.2 Сценарии и показатели качества работы систем Интернета вещей с большим числом устройств

В предварительном национальном стандарте Российской Федерации «Информационные технологии. Интернет вещей. Термины и определения» [14] Интернет вещей определяется как «Инфраструктура взаимосвязанных сущностей, систем и информационных ресурсов, а также служб, позволяющих обрабатывать информацию о физическом и виртуальном мире и реагировать на нее». В англоязычной литературе используется термин Internet of Things (IoT).

Первые системы Интернета вещей были основаны на системах радиочастотной идентификации (RFID – Radio Frequency IDentification) [15]. В настоящее время в системах Интернета вещей используются такие технологии, как Bluetooth, Zigbee, WiFi и OWC (Optical Wireless Communication) – в сетях с небольшой зоной покрытия, SigFox, LoRa (Long Range), NB-IoT и LTE MTC (LTE-M) – в сетях с широкой зоной покрытия [16].

Системы Интернета вещей используются во различных областях, например (рисунок 1.2):

- сельское хозяйство (удаленный мониторинг сельскохозяйственной деятельности);
- медицина (дистанционный контроль состояний пациентов, роботизированная хирургия);
- экология (удаленный мониторинг показателей окружающей среды);
- промышленное производство (дистанционный мониторинг производственных процессов, удаленное управление оборудованием);
- городская инфраструктура (дистанционный контроль функционирования городской инфраструктуры, системы видеонаблюдения);
- транспорт (интеллектуальная парковка, мониторинг транспортных средств, анализ плотности трафика и т.д.)
- «умный» дом (автоматизированные системы управления отоплением и освещением, системы видеонаблюдения, системы безопасности и т.д.)

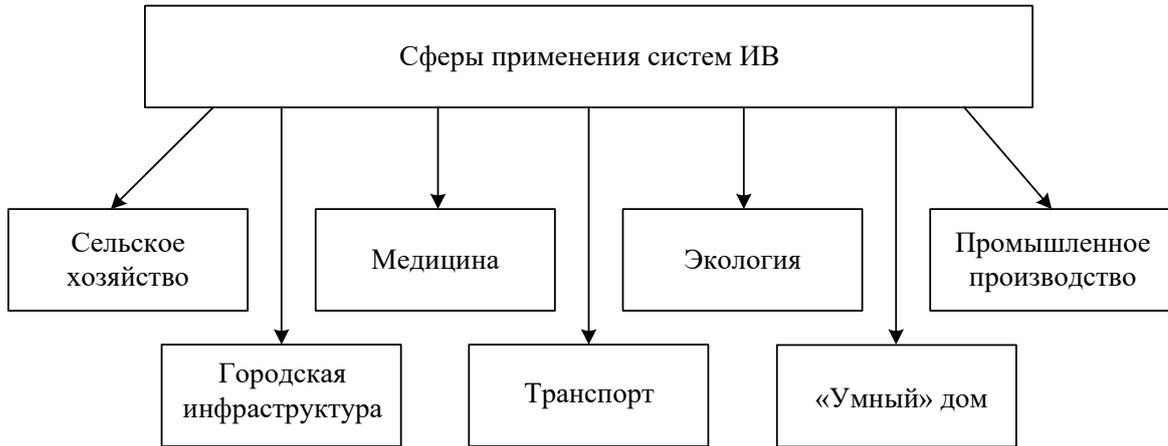


Рисунок 1.2 — Области использования систем ИВ

Интернет вещей - это широкое понятие, в рамках которого существует множество различных сценариев. Согласно рекомендациям международного союза электросвязи [17] выделяют три сценария сетей пятого поколения (5G): усовершенствованная подвижная широкополосная связь (enhanced Mobile Broadband – eMBB), потоковая связь машинного типа (massive Machine-Type Communications – mMTC) и сверхнадежная передача данных с малой задержкой (Ultra-Reliable Low Latency Communications – URLLC). Два последних сценария относятся к Интернету вещей. Стоит отметить, что сценарий mMTC принято называть массовой межмашинной связью, а не потоковой связью машинного типа (как в [17]), т.к. в данном сценарии используется передача отдельных сообщений, а не потоковая передача данных. В сетях шестого поколения (6G) выделяют следующие сценарии [18]: повсеместную мобильную сверхширокополосную связь (ubiquitous Mobile Ultra-Broadband – uMUB), сверхвысокую плотность данных (ultra-High Data Density – uHDD) и связь со сверхвысокой скоростью и малой задержкой (ultra-High Speed and Low-Latency Communications – uHSLLC). Сценарии uHDD и uHSLLC будут усовершенствованным продолжением сценариев mMTC и URLLC соответственно. В сценарии uHDD планируется увеличить плотность устройств с 10^6 (как в сетях 5G) до 10^7 в расчете на один квадратный километр, а в сценарии uHSLLC планируется уменьшить задержку с 1 мс (как в сетях 5G) до 0.01-0.1 мс. Согласно концепции «Network 2030», представленной в документе [19], основными областями использования сценариев 6G будут следующие направления: связь голографического типа (Holographic Type Communications – HTC) для удаленного проецирова-

ния голографических объектов, мульти-чувственные сети (Multi-Sense Networks – MSN) для передачи запаха и вкуса еды, температуры поверхности, текстуры ткани в цифровом виде, спроектированные временем приложения (Time Engineered Applications – ТЕА) для реагирования на непредсказуемые и незапрограммированные события и автономного решения возникающих проблем без вмешательства человека, и критическая инфраструктура (Critical Infrastructure – CI) для обеспечения безопасности при возникновении чрезвычайных ситуаций. Основные требования к использованию сценариев шестого поколения представлены в стандарте ITU-T Technical Report on «Network 2030 - Additional Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030» [20].

Как в одном, так и в другом поколении есть сценарии Интернета вещей с большим числом устройств. В данной диссертационной работе рассматриваются системы Интернета вещей, которые описываются сценарием mMTC [21, 22]. Этот сценарий является основополагающим сценарием систем Интернета вещей с большим числом устройств и не имеет жестких требований к задержке и надежности доставки. Сценарий mMTC также называют массовым ИВ (massiveIoT – mIoT). В данном сценарии системы Интернета вещей состоят из большого числа маломощных устройств для наблюдения за изменениями в системе. Такие системы принято называть системами мониторинга [23], а изменения, происходящие в системе, – событиями. Под изменениями системы имеются в виду изменения некоторых показателей окружающей обстановки, например, изменения температуры, влажности или степени загрязненности воздуха.

В системах связи, в том числе и в системах Интернета вещей, с большим числом абонентов для передачи данных используется случайный множественный доступ (СМД). Одной из современных технологий, основанных на СМД, является технология LoRa [24, 25]. Она позволяет передавать данные в нелицензируемом частотном диапазоне и поддерживает несколько частотных каналов. Для передачи данных она использует алгоритм СМД – АЛОХА. Базовые станции, работающие по технологии LoRa, могут обслуживать большое число устройств, т.к. обладают высокой помехоустойчивостью и большим радиусом действия. Эта технология используется во многих сценариях Интернета вещей с большим числом устройств.

В реальных системах Интернета вещей число устройств конечно, однако в некоторых системах это число настолько большое, что при исследовании этих

систем можно считать его бесконечным. В таком случае систему с большим числом устройств принято описывать моделью, которая характеризуется пуассоновским входным потоком и имеет один параметр λ – интенсивность входного потока. В этой модели у каждого устройства имеется ровно одно сообщение для передачи, поэтому понятия сообщения и устройства в рамках такой модели можно считать эквивалентными.

Большое число устройств в системах ИВ приводит к различного рода проблемам (рисунок 1.3). Самая распространенная проблема систем Интернета вещей – снижение пропускной способности канала. В системах с потенциально неограниченным числом устройств возникают две проблемы: инициализация устройств и нестабильная работа при больших значениях интенсивности входного потока. В системах с повторными передачами возможны еще две проблемы: высокие энергозатраты и несвоевременное получение информации. В системах без повторных передач возникают потери сообщений, что снижает надежность передачи данных. Рассмотрим каждую из этих проблем более подробно.



Рисунок 1.3 — Проблемы, возникающие в системах ИВ с большим числом устройств

В системах с потенциально неограниченным количеством устройств существует проблема их идентификации [26]. Для однозначной идентификации при

подключении к сети каждому устройству необходимо иметь уникальный адрес (идентификатор). Предположим, что к сети подключаются N устройств. В этом случае уникальный адрес устройства будет состоять из $\log_2 N$ бит. Однако, если $N \rightarrow \infty$, то адрес устройства невозможно передать в сообщении, т.к. количество бит в сообщении ограничено. В классических работах по случайному множественному доступу, например [2], рассматривалась модель системы с бесконечным числом абонентов, но не акцентировалось внимание на идентификации пользователя. В работе [27] был предложен подход «non-identifiable users», который в дальнейшем получил название - случайный доступ без идентификации источника (Unsourcesd Random Access – U-RA). Улучшения и расширения данной концепции исследовались в работах [28–30]. U-RA позволяет передавать сообщения пользователей, в которых отсутствует поле с адресом источника. В работе [10] для идентификации устройства используется его местоположение. Такой подход может быть применен в системах, в которых не требуется однозначная идентификация пользователя, в том числе и в системах Интернета вещей.

Число устройств в системах Интернета вещей постоянно увеличивается. С ростом числа устройств растет и количество конфликтов в таких системах. Большое число конфликтов может привести к нестабильной работе системы. Вопросы стабильности систем со случайным доступом и неограниченным числом абонентов исследуются давно [2–5]. В работах [2–5] показано, что системы стабильны при $\lambda < e^{-1}$. При $\lambda \geq e^{-1}$ задержка в таких системах сильно возрастает. После появления концепции Интернета вещей проблема стабильности исследовалась снова в работе [10]. В этой работе была предложена модель с множественным выходом, которая работает устойчиво при любой интенсивности входного потока за счет учета зависимости данных от разных устройств.

Как при конечном, так и при бесконечном количестве устройств, конфликты в системах Интернета вещей приводят к снижению пропускной способности канала. Эта проблема характеризуется средним числом успешных передач в единицу времени и тесно связана с проблемой стабильности.

При возникновении конфликта устройствам приходится повторять передачу сообщений. Повторные передачи сообщений увеличивают время работы приема-передатчиков устройств. Следовательно, большое количество повторных передач приводит к увеличению энергопотребления. Для увеличения времени работы источников питания устройств можно, например, изменять

мощность передачи. Однако во многих системах мощность передачи и кодово-модуляционная схема зафиксированы и влиять на энергоэффективность можно только за счет уменьшения числа попыток передачи одного сообщения. Вопросы энергоэффективности систем Интернета вещей исследовались в работах [31, 32].

В системах мониторинга необходимо получать информацию о всех изменениях, происходящих в системе, а также получать эту информацию вовремя. По этим причинам возникают ещё две проблемы: обеспечение надежной передачи данных и оценка актуальности полученной информации. Если сенсоров в системе будет слишком мало, то некоторые важные изменения могут быть пропущены. С другой стороны, если сенсоров будет слишком много, то количество конфликтов возрастет, что тоже повлечет за собой потерю информации об изменениях в системе. Увеличить надежность передачи данных можно за счет выбора оптимального числа сенсоров при создании системы мониторинга. Однако данный вопрос пока остается открытым, как и вопрос об оценке актуальности полученной информации.

Для улучшения качества работы систем ИВ с большим числом устройств необходимо исследовать показатели качества работы систем, отражающие выделенные выше проблемы. Соответствие проблем и показателей качества работы систем ИВ представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Соответствие проблем и показателей качества работы систем Интернета вещей

Проблемы	Показатели качества работы
Стабильность	Предельная (критическая) интенсивность входного потока
Энергоэффективность	Среднее число повторных передач
Пропускная способность канала	Среднее число успешных передач в единицу времени
Надежность передачи данных	Вероятность доставки сообщений
Актуальность информации	Средняя задержка
	Средний возраст информации

В теории массового обслуживания (СМО) основным показателем качества работы систем является средняя задержка [33], а в теории СМД – предельная интенсивность входного потока, средняя задержка, среднее число успешных передач в единицу времени. В системах СМД без повторных передач при большом числе абонентов могут возникать потери данных, поэтому в таких системах еще одним ключевым показателем качества работы является вероятность доставки сообщений, а в системах СМД с повторными передачами – среднее число повторных передач, т.е. среднее число попыток передачи одного сообщения. Все эти показатели исследуются давно для различных систем связи, включая и системы Интернета вещей [34].

Относительно недавно появился новый показатель качества работы систем связи – средний возраст информации. Впервые термин возраст информации (AoI – Age of Information) был введен в работе [11]. Он показывает актуальность полученной информации и является значимой характеристикой для систем Интернета вещей [35].

В теории СМО возрастом информации называют некоторую функцию от времени, которая растет линейно и убывает до некоторой величины в момент завершения обслуживания очередной заявки, и обозначают – $\Delta(t)$. Предполагается, что в начальный момент времени возраст информации равен нулю, т.е. $\Delta(0) = 0$. Пусть t_i и t_{i-1} – моменты времени, в которые появились заявки i и $i - 1$ соответственно, а l_i – момент времени, в который обслуживание заявки i было завершено. С учетом данных обозначений значение возраста информации в точке l_i уменьшится на величину $t_i - t_{i-1}$.

Отношение площади под графиком функции $\Delta(t)$ к интервалу времени работы системы T называют средним возрастом информации на интервале $[0, T]$

$$\bar{\Delta}_T = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta(t) dt. \quad (1.1)$$

Средним возрастом информации на полубесконечном интервале $[0, +\infty]$ называют

$$\bar{\Delta} = \lim_{T \rightarrow \infty} \bar{\Delta}_T. \quad (1.2)$$

Опишем подход для определения среднего возраста информации на примере простейшей СМО с прямым порядком и случайным временем обслуживания. Будем наблюдать за системой некоторый интервал времени T . Будем считать,

что в нулевой момент времени заявки в системе отсутствуют. Примем за n число заявок, обслуживание которых завершилось к концу интервала времени T . На рисунке 1.4 представлен пример функционирования такой системы на интервале $[0, T]$ и типовой вид зависимости возраста информации от времени. Из выражения (1.1) следует, что определение среднего возраста информации на интервале $[0, T]$ равносильно вычислению отношения площади под графиком функции $\Delta(t)$ к длине интервала $[0, T]$. Покажем, как это можно сделать, зная моменты поступления заявок T_i и моменты завершения их обслуживания L_i .

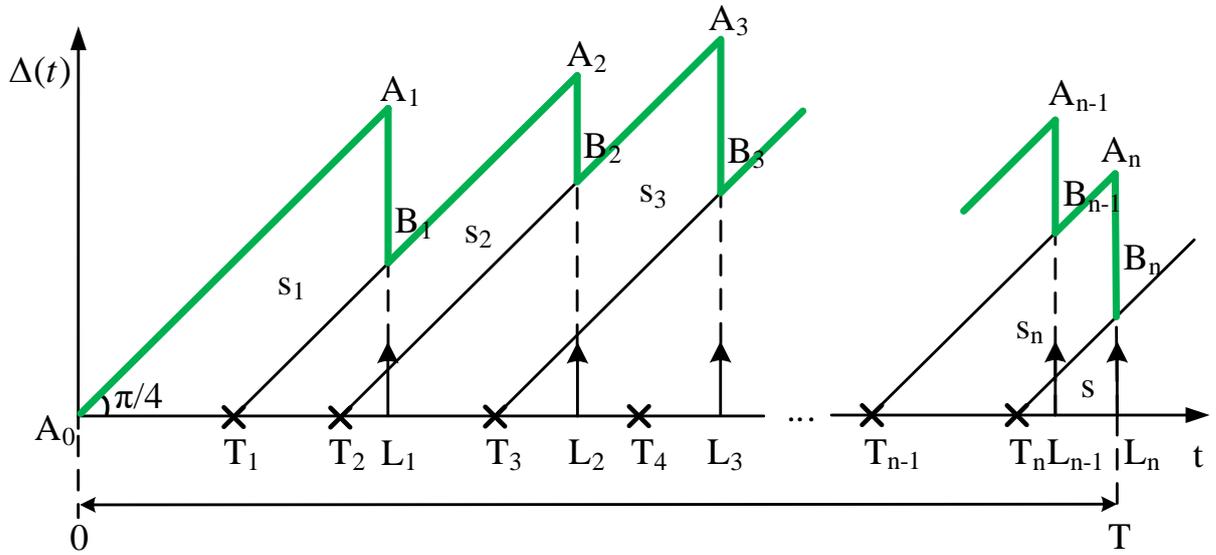


Рисунок 1.4 – Пример изменения возраста информации от времени

Пусть s_1 – площадь трапеции $A_0A_1B_1T_1$, s_i – площадь трапеции $T_{i-1}A_iB_iT_i$, где $i = \overline{2, n}$, а s – площадь треугольника $T_nB_nL_n$. Тогда значение среднего возраста информации на интервале $[0, T]$ можно получить как

$$\bar{\Delta}_T = \frac{1}{T} \left(\sum_{i=1}^n s_i + s \right). \quad (1.3)$$

Площадь трапеции s_1 можно найти как разность площадей двух прямоугольных равнобедренных треугольников $A_0A_1L_1$ и $T_1B_1L_1$

$$s_1 = \frac{1}{2}L_1^2 - \frac{1}{2}(L_1 - T_1)^2. \quad (1.4)$$

Аналогичным образом можно найти площади остальных трапеций

$$s_i = \frac{1}{2}(L_i - T_{i-1})^2 - \frac{1}{2}(L_i - T_i)^2, i = \overline{2, n}. \quad (1.5)$$

Площадь треугольника $T_n B_n L_n$ вычисляется как

$$s = \frac{1}{2} (L_n - T_n)^2. \quad (1.6)$$

Подставив (1.4), (1.5) и (1.6) в (1.3), получим итоговое выражение для среднего возраста информации на интервале $[0, T]$

$$\bar{\Delta}_T = \frac{1}{2T} \left(L_1^2 - (L_1 - T_1)^2 + \sum_{i=2}^n \left((L_i - T_{i-1})^2 - (L_i - T_i)^2 \right) + (L_n - T_n)^2 \right). \quad (1.7)$$

Стоит отметить, что выражение (1.7) будет справедливо и для СМО с постоянным временем обслуживания.

В работах [11, 36–38] предложены методы расчета среднего возраста информации для простейших СМО M|D|1 и M|M|1 с прямым порядком обслуживания (FCFS – First-Come-First-Served) и получены следующие результаты:

$$\bar{\Delta}_{M|D|1} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{2(1-\rho)} + \frac{1}{2} + \frac{(1-\rho)e^\rho}{\rho} \right), \quad (1.8)$$

$$\bar{\Delta}_{M|M|1} = \frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1-\rho} \right), \quad (1.9)$$

где $\rho = \lambda/\mu$, μ – интенсивность обслуживания заявок, λ – интенсивность поступления заявок в систему.

Стоит отметить, что формула (1.8) справедлива для обычной M|D|1. В большинстве современных систем связи присутствует синхронизация передачи данных по времени, поэтому в настоящее время представляет интерес синхронная система M|D|1.

Исследования среднего возраста информации для СМО с обратным порядком обслуживания (LCFS – Last-Come-First-Served) приведены в работах [39, 40]. В работе [41] представлен анализ этого показателя для СМО с множеством очередей. В настоящее время этот показатель активно исследуется для систем СМД [42–52], включая системы Интернета вещей [53–60] и системы с зависимыми источниками [61, 62]. В большинстве исследований рассматривается синхронный алгоритм АЛОНА (Slotted АЛОНА), но существуют работы, например, [63], в которых проводится анализ среднего возраста информации для асинхронного алгоритма АЛОНА (Unslotted АЛОНА). Существует алгоритм АЛОНА, в котором все время работы разделено на кадры, состоящие из нескольких окон. В англоязычной литературе этот алгоритм называют – Frame

ALOHA. В работе [46] исследуется средний возраст информации для алгоритма Frame ALOHA, а в работах [64, 65] – для алгоритма Frameless ALOHA. Однако замкнутые выражения для среднего возраста информации в системах СМД отсутствуют.

Определения ключевых показателей качества работы систем СМД и систем Интернета вещей, основанных на случайном доступе, представлены в таблице 2. Кроме того, в таблице 2 приведены общепринятые обозначения для этих показателей.

Таблица 2 — Основные показатели качества работы систем Интернета вещей, основанных на случайном множественном доступе.

Название	Определение
Предельная (критическая) интенсивность входного потока, λ_c	Интенсивность входного потока, при которой система работает стабильно, т.е. имеет конечную задержку.
Средняя задержка, \bar{D}	Математическое ожидание интервала времени от момента появления сообщения в системе до момента выхода сообщения из системы.
Среднее число повторных передач, \bar{s}	Математическое ожидание количества попыток передать одно и то же сообщение.
Среднее число успешных передач в единицу времени, \bar{M}	Математическое ожидание количества успешно переданных сообщений в единицу времени (например, в одном окне).
Вероятность доставки сообщений, P	Предел при $T \rightarrow \infty$ отношения количества успешно доставленных сообщений к общему числу сообщений, появившихся в системе.
Средний возраст информации на конечном интервале $[0, T]$, $\bar{\Delta}_T$	Отношение площади под графиком функции возраста информации $\Delta(t)$ к длине интервала $[0, T]$.
Средний возраст информации на полубесконечном интервале $[0, +\infty]$, $\bar{\Delta}$	Предел при $T \rightarrow \infty$ среднего возраста информации на интервале $[0, T]$.

В системах мониторинга, как и в других системах СМД, возникают проблемы обеспечения надежности передачи данных и обеспечения хорошей пропускной способности сети. В системах СМД эти проблемы характеризуются вероятностью доставки сообщений и средним числом успешных передач в единицу времени соответственно. В отличие от систем СМД в системах мониторинга есть события, о каждом из которых необходимо сообщить на общий центр. Однако высокие значения вероятности доставки сообщений и среднего числа успешных передач в единицу времени не гарантируют получения сообщений обо всех событиях. Пусть в системе возникло n событий и одно из них (например, с номером i) возникло в месте, где не оказалось ни одного сенсора. Предположим, что сообщения о $n - 1$ событиях были переданы успешно. В такой ситуации сообщение об i -ом событии не будет передано на базовую станцию, но при этом вероятность доставки сообщений будет равна единице, а среднее число успешных передач в единицу времени будет максимальным. Поэтому для систем мониторинга можно выделить еще два важных показателя качества работы систем: вероятность доставки информации о событии и среднее число успешно переданных сообщений об одном событии в единицу времени. Определения данных показателей будут введены в разделе 3.

1.3 Сравнительный анализ существующих моделей систем Интернета вещей с зависимыми источниками

В системах Интернета вещей, работающих по сценарию mMTC, соседние устройства часто передают одну и ту же информацию. Примером такой системы может быть система мониторинга лесных пожаров. Она представляет собой множество сенсоров, расположенных на огромной территории и измеряющих температуру воздуха. Если измеренная температура превышает некоторый порог, то сенсор активизируется и передает сообщение, содержащее значение температуры и время измерения, на базовую станцию. Лесной пожар – это быстро распространяющееся явление, особенно в условиях ветренной погоды. Поэтому, скорее всего, повышение температуры зафиксирует не один сенсор, а сразу несколько соседних сенсоров. В этом случае на базовую станцию одновременно поступят несколько сообщений с одинаковыми данными. Однако

температура воздуха может изменяться на несколько градусов даже в близких по расстоянию точках. Значения температуры, полученные разными устройствами, также могут отличаться из-за погрешности измерений. Таким образом, показания соседних сенсоров могут быть различными, но будут иметь высокую корреляцию. В англоязычной литературе для таких устройств используются термины: «correlated sources» и «correlated activation». «Correlated sources» – это устройства, данные которых одинаковы или почти одинаковы, а «correlated activation» – устройства, которые были затронуты одним и тем же событием, но данные у них при этом могут отличаться. В русскоязычной литературе устоявшийся термин для таких устройств отсутствует. В данной диссертационной работе близкорасположенные устройства будем называть зависимыми источниками, так как отсутствие корреляции данных не означает отсутствие зависимости. Таким образом, понятие «зависимые источники» объединяет понятия «correlated sources» и «correlated activation».

Учет зависимости данных от разных устройств является одним из путей решения некоторых проблем систем Интернета вещей. Поэтому исследование систем со случайным множественным доступом и зависимыми источниками является актуальной задачей. Далее приведем сравнительный анализ работ по данной тематике.

В работе [66] рассматривается модель беспроводной сенсорной сети, в которой сигналы устройств имеют высокую корреляцию. Для передачи данных в этой модели используется алгоритм случайного множественного доступа «многоканальная АЛОХА». В работе [66] предложен адаптивный подход к передаче данных с использованием кодирования Slepian-Wolf для повышения энергоэффективности системы.

В работе [67] рассматривается модель случайного доступа с зависимыми источниками. В этой модели используется модифицированный алгоритм «АЛОХА». Также в работе [67] рассматривается обобщенная модель с несколькими подканалами, т.е. «многоканальная АЛОХА». Работа [68] посвящена системам промышленного ИВ (Industrial IoT - IIoT). Рассматривается модель системы с зависимыми источниками, зависимость которых описывается за счет гауссовских коррелированных случайных величин. В работах [67] и [68] применительно к рассматриваемым моделям исследуются алгоритмы декодирования сигналов от зависимых источников с целью повышения пропускной способности канала и энергоэффективности.

В работе [69] рассматривается модель беспроводной сети с коррелированной активацией устройств. В работе [69] предложены два алгоритма, в которых авторы используют корреляцию между парами пользователей для уменьшения вероятности конфликтов при передаче. В этих алгоритмах всем активным пользователям по некоторому правилу назначаются определенные слоты для передачи. Результаты моделирования, приведенные в работе [69], показывают, что данные сценарии позволяют увеличить пропускную способность канала по сравнению со случайным доступом.

Авторы работ [70] и [71] предлагают способы декодирования сообщений, переданных одновременно от разных устройств, данные которых имеют высокую корреляцию. В основе этих способов лежит технология последовательного подавления помех (SIC – Successive Interference Cancellation). Предложенные способы тестируются на модели из работы [69] и на такой же модели с добавлением повторных передач [71]. Результаты, полученные в данных работах, показали, что за счет декодирования сообщений зависимых источников можно повысить пропускную способность канала и снизить энергопотребление в системе.

В работе [72] рассматривается модель системы сочетающая в себе два разных трафика: случайный доступ с зависимыми источниками и случайный доступ без идентификации источника. Для распознавания сигналов в случае конфликта в модели применяется разреженное кодирование с байесовским обнаружением. С помощью имитационного моделирования исследуется вопрос взаимодействия данных видов трафика и их влияния на параметры системы.

В работе [73] рассматривается сценарий массового случайного доступа с обычными и аварийными сообщениями, который учитывает корреляцию как в активации устройств, так и в содержании сообщений. За счет введения аварийных сообщений повышается надежность их декодирования, а также увеличивается вероятность того, что аварийные сообщения не будут декодированы в случае ложного срабатывания.

В работе [74] рассматривается модель системы Интернета вещей с большим числом устройств. Исследуются вопросы обнаружения активных устройств и оценки пропускной способности канала за счет временной корреляции активности устройств. Подход основан на предположении, что устройство, передающее в текущем окне, будет активным в течение еще нескольких окон. Результаты моделирования, представленные в работе [74], показывают, что

предложенные алгоритмы могут значительно повысить точность обнаружения активности устройства и уменьшить ошибку оценки канала.

В работе [61] рассматривается модель системы с зависимыми источниками, в которой возможны разные виды доступа: случайный и с разделением времени. Вариант модели со случайным доступом авторы представляют в виде Марковской цепи и исследуют влияние числа соседей одного источника на средний возраст информации. Кроме того, в работе [61] предлагается стратегия передачи сообщений, позволяющая эффективно использовать ресурсы канала. Эта стратегия основана на методах машинного обучения.

Работа [62] посвящена исследованию ценности информации (VoI – Value of Information) в системе с зависимыми источниками. Ценность информации – это показатель качества работы системы, который содержит в себе AoI одного источника, AoI его соседей и стоимость передачи информации. Авторы работы [62] рассматривают две модели, показывают как представить их в виде цепей Маркова и исследуют влияние вероятности передачи и коэффициента стоимости на ценность информации путем теоретического анализа и имитационного моделирования.

Модели, рассматриваемые в работах [61, 62, 66–74] являются централизованными. Однако существуют работы, в которых рассматриваются децентрализованные системы со случайным доступом и зависимыми источниками, например, [75]. В данной диссертационной работе будут исследоваться централизованные системы, поэтому работу [75] подробно рассматривать не будем.

В работах [61, 62, 66–74] не рассматриваются вопросы стабильности систем, т.к. в этих системах число устройств ограничено. В работе [10] рассматривается модель системы с зависимыми источниками и потенциально неограниченным числом абонентов. Данная модель называется моделью с множественным выходом и устроена следующим образом. События в данной модели не моделируются. Считается, что абоненты передают одну и ту же информацию, если они находятся на расстоянии меньше, чем r друг от друга. Если абоненты находятся на расстоянии больше, чем r , то считается, что сообщения у них различны. В работе [10] рассматривается вопрос стабильности системы с множественным выходом и доказывается, что она работает устойчиво независимо от интенсивности входного потока. Даже при больших значениях интенсивности задержка в системе конечна за счет множественного выхода абонентов из системы.

Актуальность информации (AoI)	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

1.4 Модели с появлением абонентов и модели с появлением событий

В теории СМД абонентские устройства принято называть абонентами, поэтому устройства для сбора информации (сенсоры, датчики и т.д.) в системах Интернета вещей мы будем называть *абонентами*. Из приведенного в предыдущем подразделе сравнительного анализа следует, что модели со случайным доступом и зависимыми источниками можно разделить на два класса:

- модели с появлением событий [61, 62, 66–74];
- модели с появлением абонентов [10].

Приведем общую систему допущений для обоих классов моделей в виде таблицы (таблица 4). Данная таблица состоит из трех столбцов. В первом столбце приводится номер допущения, во втором – допущения для модели с появлением событий, а в третьем – допущения для модели с появлением абонентов. Среди всех допущений большинство являются общими для обоих видов моделей (1–8) и только некоторые отличаются (5, 7 и 9). Если допущение одинаково для обоих классов моделей, то оно приводится один раз в ячейке, объединяющей два столбца «Модель с появлением событий» и «Модель с появлением абонентов».

Таблица 4 – Обобщенная система допущений

№	Модель с появлением событий	Модель с появлением абонентов
1	В системе имеется базовая станция. Зоной действия базовой станции считается территория, в пределах которой базовая станция способна принимать сообщения от абонентов.	

2	<p>Время работы системы разделено на окна. Все окна имеют одинаковую длину. В начале окна имеется интервал для передачи сообщения, а также могут выделяться интервалы для других действий (например, для анализа экологической обстановки). Моменты начала окон известны всем абонентам. Абонент может начинать передачу только в начале окна.</p>	
3	<p>В системе имеется K каналов. Моменты разделения окон во всех каналах одинаковые. В каждом окне и в каждом канале может произойти одна из трех ситуаций «успех» (передает один абонент), «пусто» (никто не передает) или «конфликт» (передает два или более абонентов).</p>	
4	<p>При наличии в системе обратной связи в конце каждого окна базовая станция передает по широкополосному каналу всем абонентам информацию о событиях в каналах. Базовая станция часто не может отличить ситуации в канале: «пусто» и «конфликт». Поэтому возможна как полная обратная связь, так и частичная «успех-неуспех».</p>	
5	<p>Событие затрагивает область в форме круга радиуса r. Абоненты, которые затронуты событием, становятся активными и передают данные на базовую станцию.</p>	<p>Все абоненты, которые находятся в системе, являются активными и передают данные на базовую станцию.</p>
6	<p>При отсутствии обратной связи активные абоненты с вероятностью единица передают сообщение на базовую станцию. При наличии обратной связи 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.</p>	

7	Количество абонентов зафиксировано и равно N . Абоненты распределены равномерно в зоне действия базовой станции. Процесс появления событий в системе описывается пространственным точечным пуассоновским процессом интенсивности λ .	Процесс появления абонентов в системе описывается пространственным точечным пуассоновским процессом интенсивности λ . В момент появления абонент содержит единственное сообщение. После успешной передачи абонент покидает систему. В данной модели абонент и сообщение являются тождественными понятиями.
8	Идентификация абонентов в системе осуществляется по координатам их местоположения.	
9	Количество сообщений, покидающих систему, равняется числу каналов, в которых был «успех».	Количество абонентов, покидающих систему, зависит от количества соседей абонента, у которого был «успех». Систему покидают абоненты, находящиеся на расстоянии не больше чем r от абонента, у которого был «успех».

В обеих моделях присутствует пространственный точечный пуассоновский процесс интенсивности λ (допущение №7). В англоязычной литературе такой процесс принято называть «spatial Poisson point process». Математическое определение этого процесса приведено в книге [76]. На качественном уровне применение данного процесса при моделировании систем Интернета вещей означает, что интервалы времени между появлениями абонентов/событий в системе распределены по экспоненциальному закону, а количество абонентов/событий, появившихся в одном окне на единице площади, распределено по закону Пуассона с параметром λ .

Во многих работах зону действия базовой станции описывают некоторой ограниченной территорией (как правило, в форме круга или квадрата). На практике зона действия базовой станцией в форме круга встречается в случае, если

базовая станция расположена на открытой местности, а квадрат – в случае, если базовая станция расположена в городе. При анализе и моделировании таких моделей могут возникать проблемы, так называемые «краевые эффекты». Существуют различные способы учета краевых эффектов. В работах [69–71] для учета краевых эффектов предлагается увеличить область появления событий. При таком подходе вероятность активности для всех абонентов станет одинаковой, но увеличится сложность анализа моделей.

В модели с появлением абонентов из работы [10] в качестве зоны действия базовой станции рассматривается поверхность сферы. Это позволяет избежать краевых эффектов. Однако моделирование и анализ такой модели тоже являются сложной задачей.

Для исследования обоих классов моделей, можно рассматривать зону действия базовой станции в виде окружности. Окружность можно использовать для моделирования и анализа как систем с появлением абонентов, так и систем с появлением событий. При таком подходе не будет краевых эффектов и будет проще моделировать и анализировать модели. Основные свойства систем при этом сохраняются.

Схематичное представление упрощенных моделей обоих классов с зоной действия базовой станции в виде окружности приведены на рисунке 1.5.

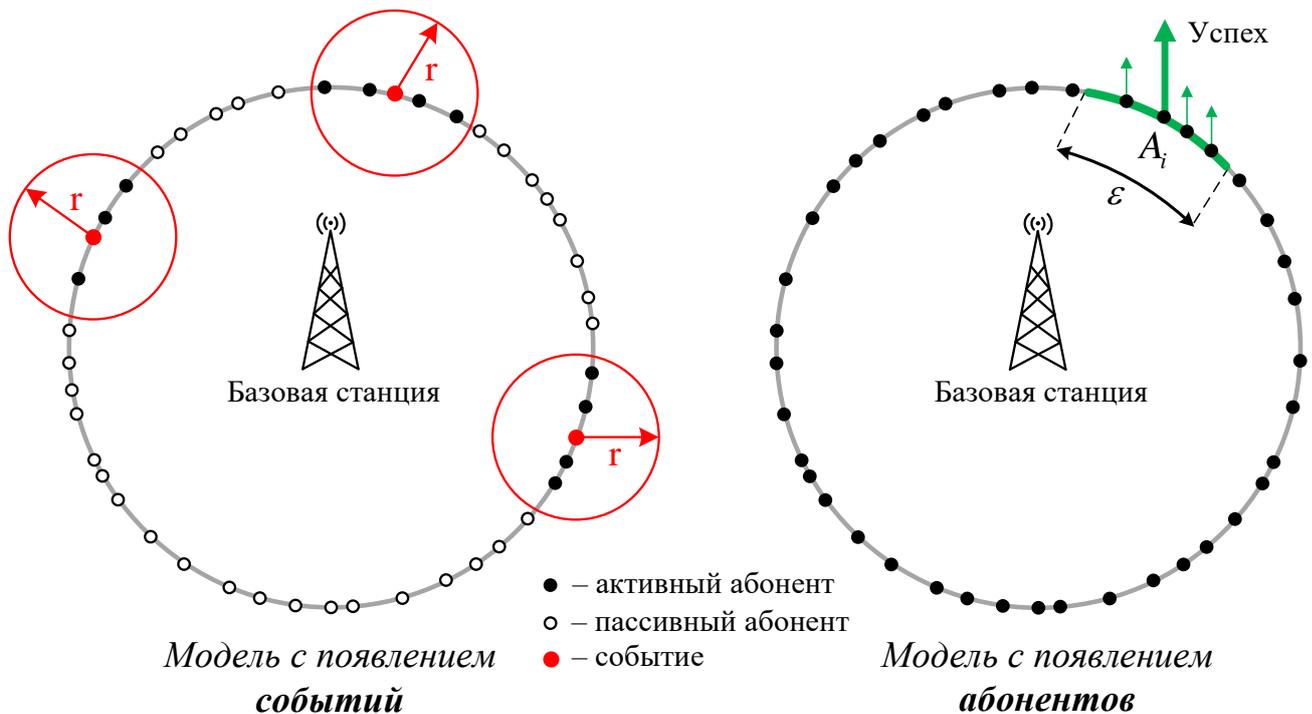


Рисунок 1.5 – Схематичное представление моделей с окружностью

Данная диссертационная работа посвящена исследованию обоих классов систем ИВ с зависимыми источниками. Основное внимание уделяется проблемам обеспечения надежности передачи данных и оценке актуальности полученной информации в таких системах (разделы 2,3 и 4). Также рассматриваются, вопросы уменьшения энергозатрат и вычисления среднего возраста информации в «Адаптивном» алгоритме АЛОНА (подразделы 2.6, 1.6 и 1.7).

1.5 Анализ устойчивости системы с доступом к каналу по алгоритму «Адаптивная синхронная Алоха»

Как было отмечено ранее, в системах с потенциально неограниченным числом устройств возникает большое количество конфликтов, которые приводят к повторным передачам сообщений. Большое количество повторных передач приводит к увеличению времени работы приема-передатчиков устройств, т.е. к увеличению энергозатрат. В данном подразделе рассматривается модель системы Интернета вещей с потенциально неограниченным числом устройств. Эта модель является моделью с появлением абонентов при $\varepsilon = 0$. Для доступа к каналу в этой модели используется «Адаптивный» алгоритм АЛОНА. Применительно к рассматриваемой модели в подразделе 1.6 предлагается метод, который при заданной интенсивности входного потока позволяет уменьшить среднее число повторных передач и, как следствие, уменьшить энергозатраты. Данный подход использует как численные вычисления, так и имитационное моделирование. Он может быть применен к задаче уменьшения других показателей качества, например, среднего возраста информации (подраздел 1.6).

Рассмотрим систему с бесконечным числом устройств, которую можно описать моделью из работы [2]. В этой модели понятия «устройство» и «абонент» можно считать эквивалентными, поэтому далее будем использовать понятие «абонент», следуя терминологии в работе [2]. Приведем ряд допущений, описывающих данную модель:

1. В системе имеется базовая станция и бесконечное число абонентов. Система является централизованной и описывается пуассоновским входным потоком интенсивности λ .

2. Все время работы системы разбито на окна. Предполагается, что все абоненты знают моменты разделения окон и могут передавать сообщения только в начале окна.
3. Размеры сообщений у всех абонентов одинаковы. В течение одного окна может быть передано ровно одно сообщение.
4. В окне может возникнуть одна из трёх ситуаций: «Успех», «Пусто» или «Конфликт». В конце окна абонентам становится известно, какая ситуация была в окне, т.е. рассматривается система с трюичной обратной связью.
5. Абоненты не знают количество абонентов, имеющих готовое для передачи сообщение.

Схематичное представление данной модели приведено на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 — Схематичное представление модели системы с потенциально неограниченным числом абонентов

Применительно к данной модели были предложены различные алгоритмы случайного множественного доступа [77], в том числе «Адаптивная синхронная Алоха» [5]. В основе большинства алгоритмов лежит один и тот же подход, идея которого заключается в следующем: абонент некоторым образом меняет вероятность передачи в зависимости от событий в канале. В работе [5] доказано, что алгоритм «Адаптивная синхронная Алоха» может обеспечить стабильную работу системы при бесконечном числе абонентов. Поэтому далее будем рассматривать именно этот алгоритм.

Основная идея алгоритма «Адаптивная синхронная Алоха» заключается в следующем [5]: в окне с номером t абонент, имеющий готовое для передачи сообщение, передает его с вероятностью p_t , которую вычисляет по некоторому правилу. Для вычисления вероятности вводится дополнительная величина L_t , которую можно рассматривать как оценку количества абонентов, имеющих готовое для передачи сообщение. Предполагается, что $L_1 = 1$. Значение L_t в следующие моменты времени вычисляется рекуррентно

$$L_{t+1} = \max[1, L_t + aI\{\Pi\} + bI\{Y\} + cI\{K\}], \quad (1.10)$$

где $I\{\Pi\}$ - индикатор события «Пусто», $I\{Y\}$ - индикатор события «Успех», $I\{K\}$ - индикатор события «Конфликт», а a , b и c - некоторые константы (параметры алгоритма). Таким образом, оценивая в каждом окне L_t абонент передает сообщение в канал с вероятностью $p_t = \frac{1}{L_t}$.

В работе [5] приведен анализ устойчивости системы с бесконечным числом абонентов. Для передачи данных в этой системе применяется алгоритм «Адаптивная синхронная Алоха». В работе показано, что эту систему можно представить в виде Марковской цепи с двумя измерениями, первым из которых будет число абонентов N_t , у которых есть данные для передачи, а вторым - оценка L_t . Из выражения (1.10) следует, что данная цепь Маркова будет иметь счетное число состояний. Значения переходных вероятностей этой Марковской цепи будут зависеть от интенсивности входного потока λ , а также от параметров алгоритма a , b и c . Задача поиска условий устойчивости системы сводится к задаче поиска условий эргодичности Марковской цепи. Для этого необходимо найти решение следующего уравнения при заданных значениях параметров системы λ , a , b и c [5]:

$$\mu_n(k) = k\mu_s(k). \quad (1.11)$$

Здесь $\mu_n(k) = \lambda - ke^{-k}$, а $\mu_s(k) = c + (a - c)e^{-k} + (b - c)ke^{-k}$. Данное уравнение может быть решено только численным путем и иметь не более трех корней. Обозначим через k_i - корень уравнения (1.11). Тогда условие эргодичности данной цепи Маркова будет иметь следующий вид:

$$\forall k_i : \mu_n(k_i) < 0 \ (\mu_s(k_i) < 0), i = \overline{0, 2}.$$

Следовательно, система будет работать устойчиво, если выполнено условие эргодичности цепи Маркова, и неустойчиво в противном случае. Иллюстрации к

решению уравнения (1.11) приведены на рисунках 1.7 и 1.8 для случая, когда система устойчива и неустойчива соответственно.

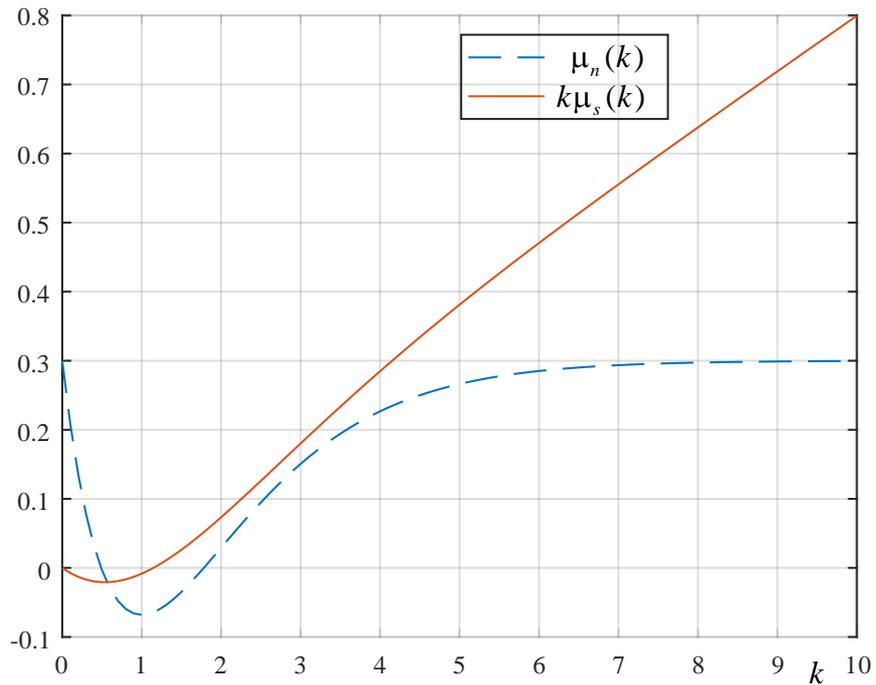


Рисунок 1.7 — Пример численного решения уравнения $\mu_n(k) = k\mu_s(k)$, когда система устойчива

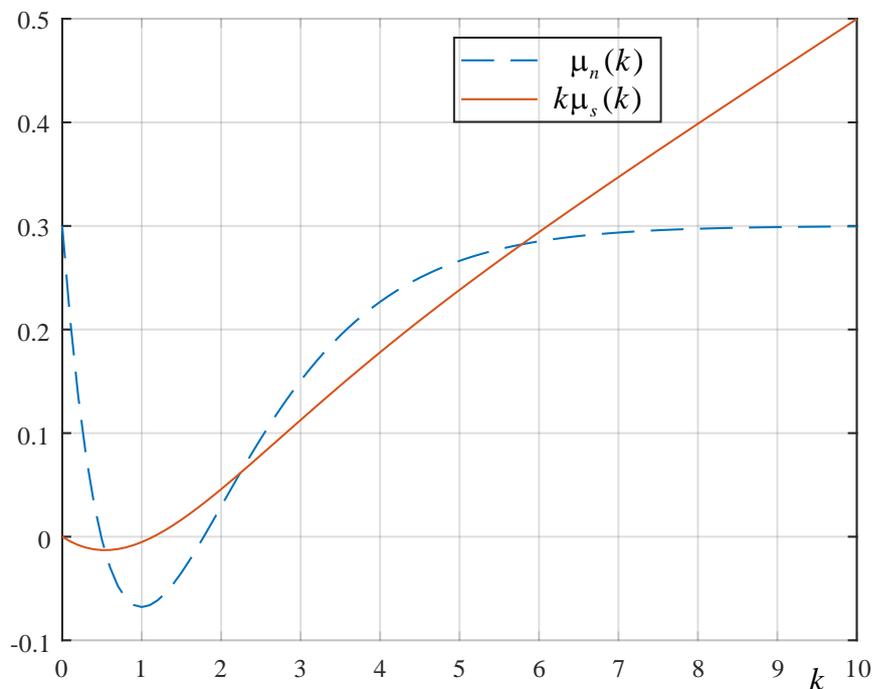


Рисунок 1.8 — Пример численного решения уравнения $\mu_n(k) = k\mu_s(k)$, когда система неустойчива

В примере на рисунке 1.7 уравнение (1.11) имеет только один корень и этот корень меньше нуля, следовательно, система устойчива. В примере на рисунке 1.8 уравнение (1.11) имеет три корня, два из которых больше нуля и один меньше нуля, следовательно, система неустойчива.

В работе [5] рассмотрены три частных случая и для каждого из них вычислена верхняя граница интенсивности входного потока ($\lambda_{кр}$).

№1: $a = -z$, $b = 1$, $c = 1$, $z > 0$. Если $z = e - 1$, то $\lambda_{кр} = e^{-1} \approx 0.368$.

№2: $a = -1$, $b = -1$, $c = z$, $z > 0$. Если $z = 2/(e - 2)$, то $\lambda_{кр} = e^{-1} \approx 0.368$.

№3: $a = -z$, $b = 0$, $c = z$, $z > 0$. При больших значениях z : $\lambda_{кр} \approx 0.364 < e^{-1}$.

В работе [5] утверждается, что в случае №3 $\lambda_{кр} \approx 0.364 < e^{-1}$ при больших значениях z , однако не говорится при каких именно. Помимо этого, в работе [5] не исследуется влияние параметров алгоритма a , b и c на показатели качества работы системы (среднюю задержку и среднее число повторных передач).

1.6 Подход для уменьшения среднего числа повторных передач в алгоритме «Адаптивная синхронная Алоха»

Функционирование системы, рассматриваемой в подразделе 2.6, можно представить в виде цепи Маркова со счетным числом состояний. В этом случае задачу поиска наилучших параметров алгоритма можно свести к задаче анализа Марковской цепи, т.е. получения матрицы переходных вероятностей и стационарного распределения. Поиск стационарного распределения данной цепи Маркова является трудной задачей из-за большого количества состояний, поэтому проще найти наилучшие параметры алгоритма путем имитационного моделирования. Однако применять имитационное моделирование можно только для Марковской цепи, которая является эргодической.

Система с бесконечным количеством абонентов может находиться в двух состояниях: устойчивом и неустойчивом. В устойчивом состоянии ключевыми показателями качества работы системы с бесконечным количеством абонентов являются средняя задержка и среднее число повторных передач. Такой показатель, как средняя задержка, исследуется давно [2], начиная с 1978 года. На

среднее число повторных передач стали обращать внимание недавно, когда стали рассматривать вопросы энергопотребления [31]. Среднее число повторных передач определяют как математическое ожидание числа возможных попыток отправить сообщение на базовую станцию и обозначают следующим образом: $\bar{s} = M[s]$ [31]. Заметим, что снижение средней задержки в системе не всегда способствует снижению среднего числа повторных передач.

В данном подразделе предлагается подход, который позволяет минимизировать среднее число повторных передач и, как следствие, снизить уровень энергопотребления в системе. Он заключается в выборе параметров алгоритма «Адаптивная синхронная Алоха» a , b и c , при которых среднее число повторных передач будет минимальным. Данный подход включает в себя как численные вычисления (для анализа устойчивости системы), так и имитационное моделирование (для выбора наилучших параметров алгоритма). Данный подход состоит из трех шагов.

Шаг I. Зафиксировать интенсивность входного потока и параметры алгоритма «Адаптивная синхронная Алоха» a , b и c , кроме одного, который выражается через параметр z .

Шаг II. Найти диапазон значений параметра z , при которых система будет находиться в устойчивом состоянии, используя численные вычисления.

Шаг III. С помощью имитационного моделирования осуществить поиск оптимальных значений параметра z , т.е. значений, при которых среднее число повторных передач минимально.

Стоит отметить, что нет формализованного правила для выбора начальных значений параметров на I этапе. Выбор начальных значений параметров – это отдельная задача. В данном разделе рассматриваются три набора параметров, соответствующие трем случаям из работы [5]. Не исключено, что существуют наборы параметров a , b и c , которые позволят сделать среднее число повторных передач еще меньше, однако ответа на этот вопрос пока нет.

Зависимости среднего числа повторных передач от параметра z для каждого из трех случаев приведены на рисунках 1.9, 1.10 и 1.11 соответственно. В первом случае среднее количество попыток передать сообщение принимает минимальное значение при $z = 0.7$, во втором случае – при $z = 10.3$ и в третьем случае – при $z = 0.79$.

Количество экспериментов для имитационного моделирования было выбрано таким, что масштаб представления графиков не позволяет отобразить доверительный интервал.

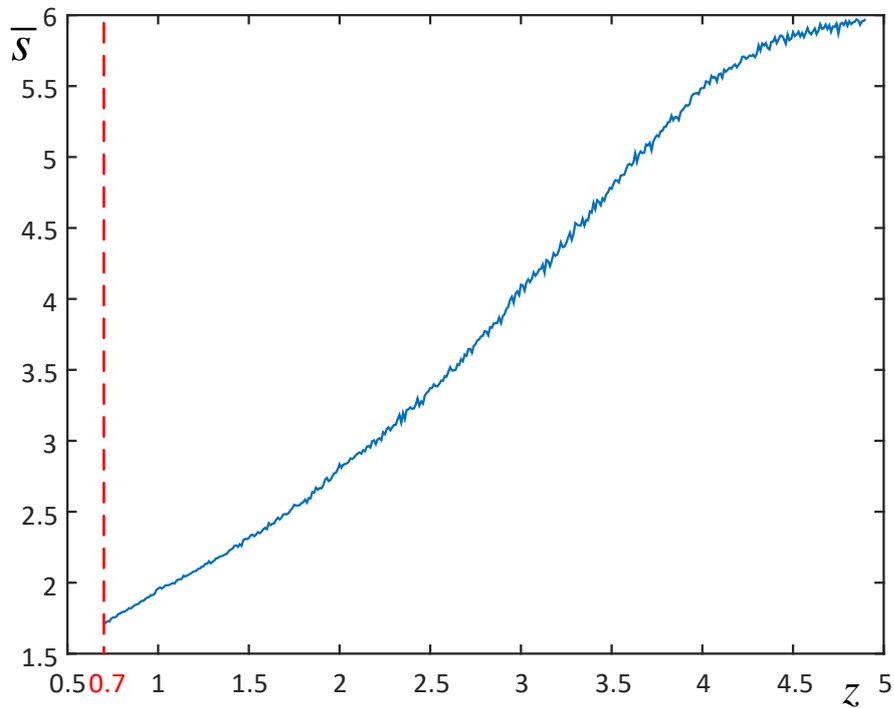


Рисунок 1.9 — Среднее число повторных передач от параметра z (случай 1)

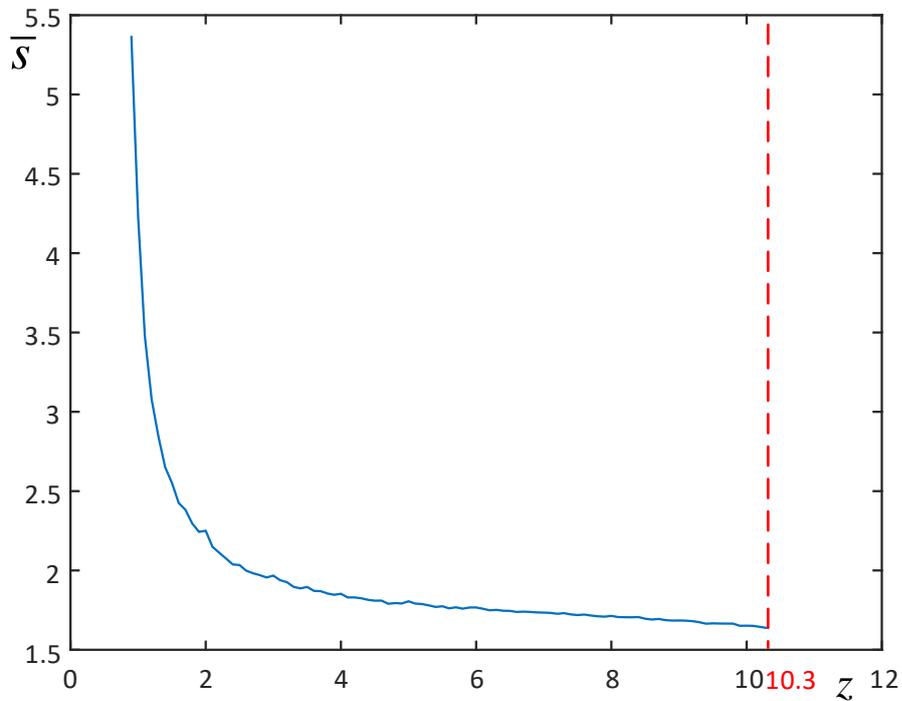


Рисунок 1.10 — Среднее число повторных передач от параметра z (случай 2)

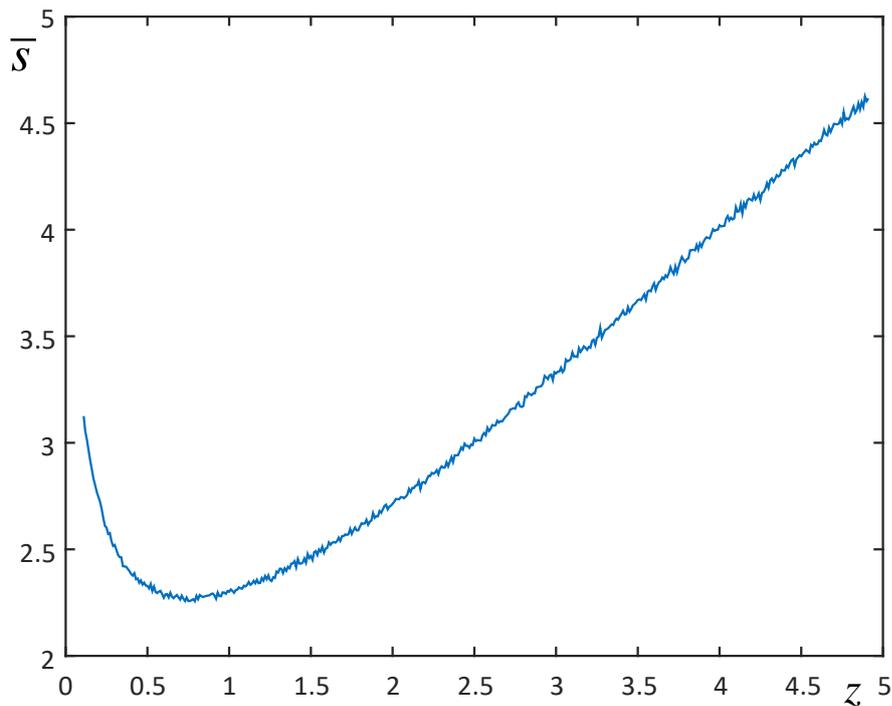


Рисунок 1.11 — Среднее число повторных передач от параметра z (случай 3)

Для каждого из трех случаев, рассмотренных в работе [5], с помощью предложенного подхода были выбраны наборы оптимальных параметров алгоритма «Адаптивная синхронная Алоха» a , b и c . Путем имитационного моделирования были получены зависимости среднего числа повторных передач от интенсивности входного потока для выбранных наборов параметров. Эти зависимости представлены на рисунке 1.12. Выбор параметров был сделан для интенсивности входного потока $\lambda = 0.3$, поэтому на рисунке 1.12 зависимости приведены только до $\lambda = 0.3$. На данном рисунке также приведены две зависимости среднего числа повторных передач от интенсивности входного потока для параметров a , b и c из работы [5], при которых $\lambda_{кр} \approx e^{-1}$. Кроме того, на рисунке 1.12 представлены результаты моделирования для случая, когда в системе известно число абонентов, имеющих готовое для передачи сообщение, т.е. для случая, когда вероятность передачи вычисляется как $p = 1/N_t$.

Результаты, представленные на рисунке 1.12, показали, что значения параметров $a = -1$, $b = -1$ и $c = 10.3$ являются наилучшими для системы, в которой количество абонентов, имеющих данные для передачи, неизвестно. Предложенный подход, позволил получить значения параметров a , b и c , при которых среднее число повторных передач меньше, чем в случае из работы [5], когда $\lambda_{кр} \approx e^{-1}$. Таким образом, рассмотренный подход дает возможность сни-

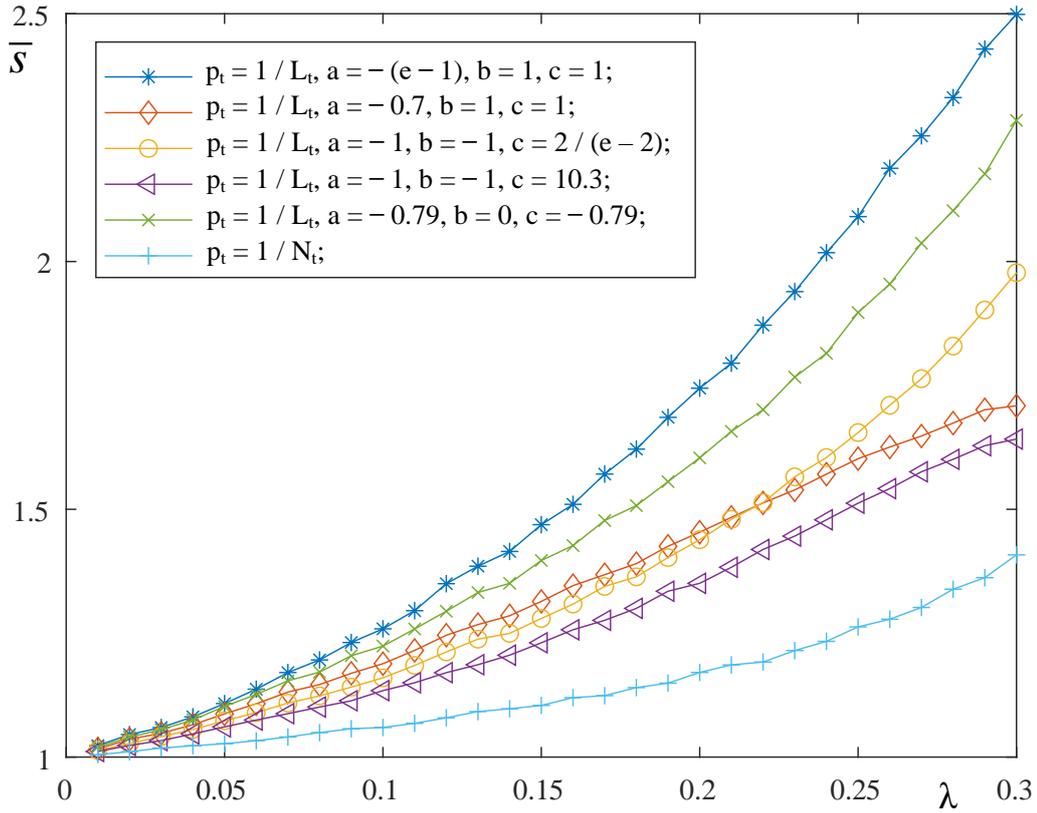


Рисунок 1.12 — Среднее число повторных передач от интенсивности входного потока при различных значениях параметров алгоритма (a , b и c)

зитель уровень энергопотребления в системе за счет уменьшения числа повторных передач.

Кроме того, для выбранных ранее наборов параметров алгоритма «Адаптивная синхронная Алоха» путем имитационного моделирования были построены зависимости средней задержки от интенсивности входного потока. Данные зависимости представлены на рисунке 1.13.

Параметры алгоритма были выбраны для интенсивности входного потока $\lambda \leq 0.3$. Однако при некоторых значениях параметров a , b и c средняя задержка неограниченно возрастает при $\lambda = 0.3$, т.е. система перестает быть устойчивой. По этой причине зависимости средней задержки от интенсивности входного потока приведены только для $\lambda \leq 0.25$.

Стоит отметить, что при $a = -1$, $b = -1$ и $c = 10.3$ среднее число повторных передач уменьшается, а средняя задержка увеличивается. При $a = -1$, $b = -1$, $c = 2/(e-2)$ и при $a = -0.79$, $b = 0$, $c = 0.79$ среднее число повторных передач отличается, а средняя задержка практически одинаковая. Из данных результатов следует, что оптимальные параметры для среднего числа повторных передач, не являются оптимальными для средней задержки. Однако

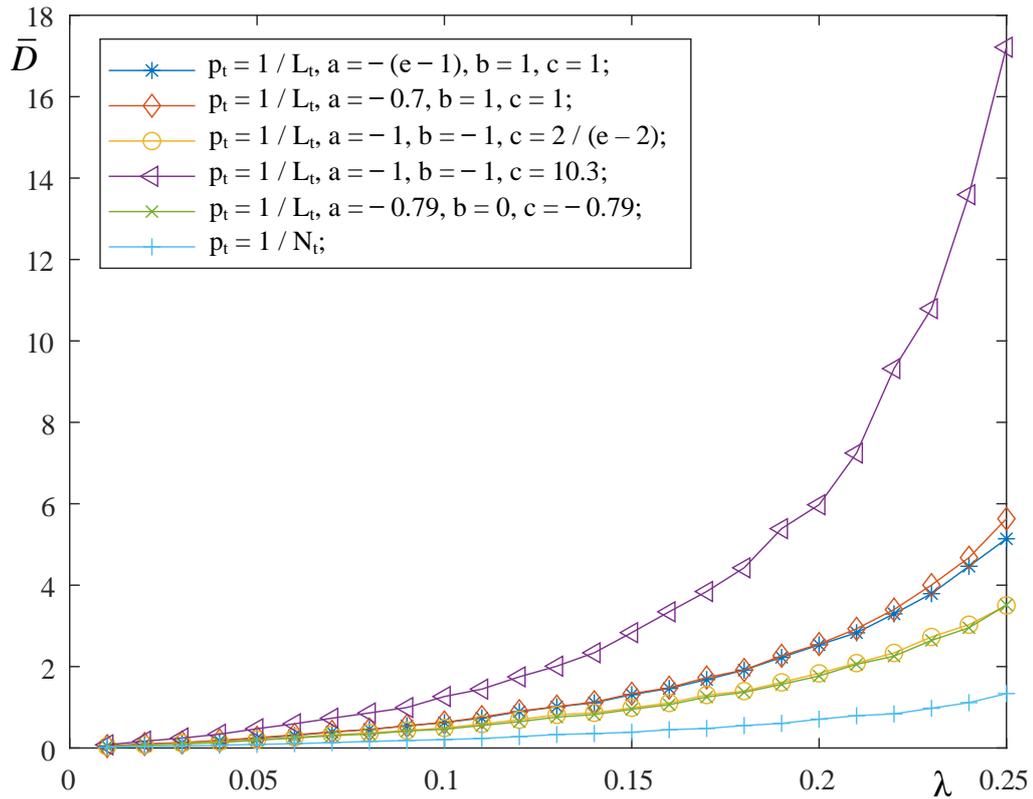


Рисунок 1.13 — Средняя задержка от интенсивности входного потока при различных значениях параметров алгоритма (a , b и c)

данный метод поиска оптимальных параметров можно применить и для задачи уменьшения средней задержки.

1.7 Оценка среднего возраста информации в алгоритме «Адаптивная синхронная Алоха»

Также описанный подход можно применить к задаче уменьшения среднего возраста информации. Покажем, как это можно сделать. На первом этапе зафиксируем те же параметры системы, которые были зафиксированы в задаче уменьшения среднего числа повторных передач ($\lambda = 0.3$). И, как следствие, на втором этапе получим ту же область значений параметра z , при которых система работает устойчиво для каждого из трех случаев. Зависимости среднего возраста информации от параметра z , полученные на третьем этапе, приведены на рисунках 1.14, 1.15 и 1.16 для трех рассмотренных случаев соответственно.

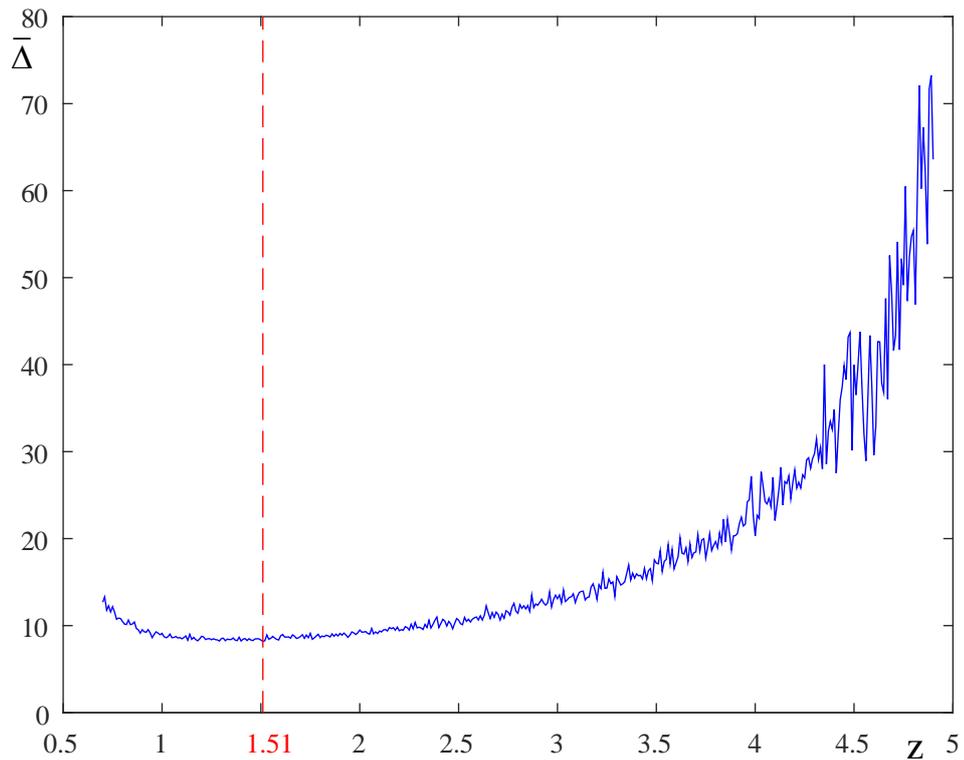


Рисунок 1.14 — Средний возраст информации от параметра z (случай 1)

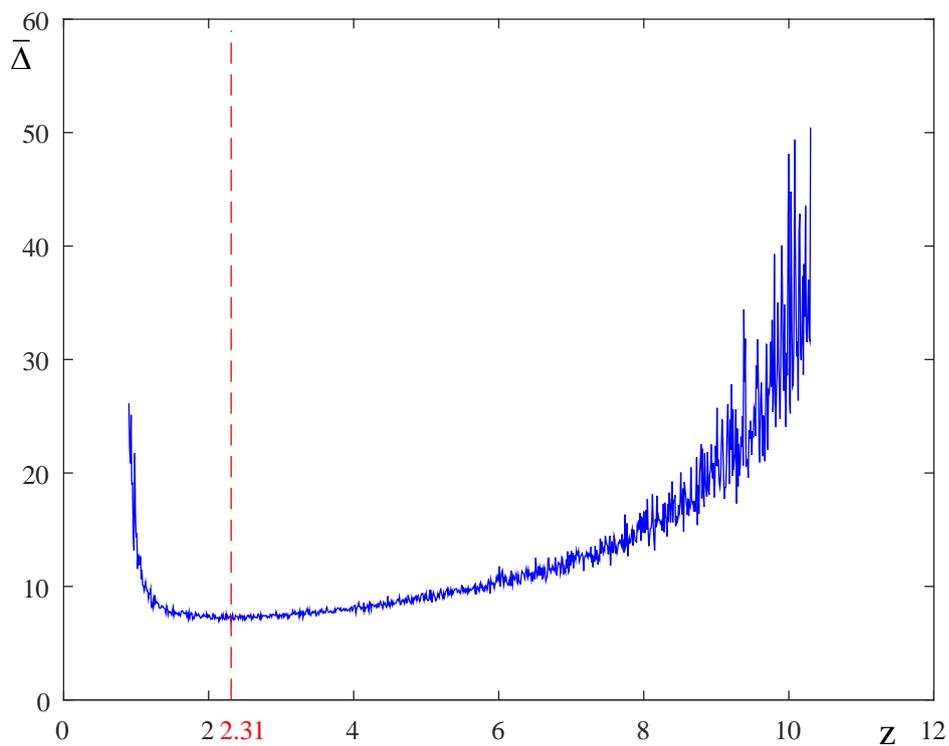


Рисунок 1.15 — Средний возраст информации от параметра z (случай 2)

В каждом из трех случаев средний возраст информации также, как среднее число повторных передач имеет минимум. В первом случае минимум достигается при $z = 1.51$, во втором — при $z = 2.31$ и в третьем при $z = 1$.

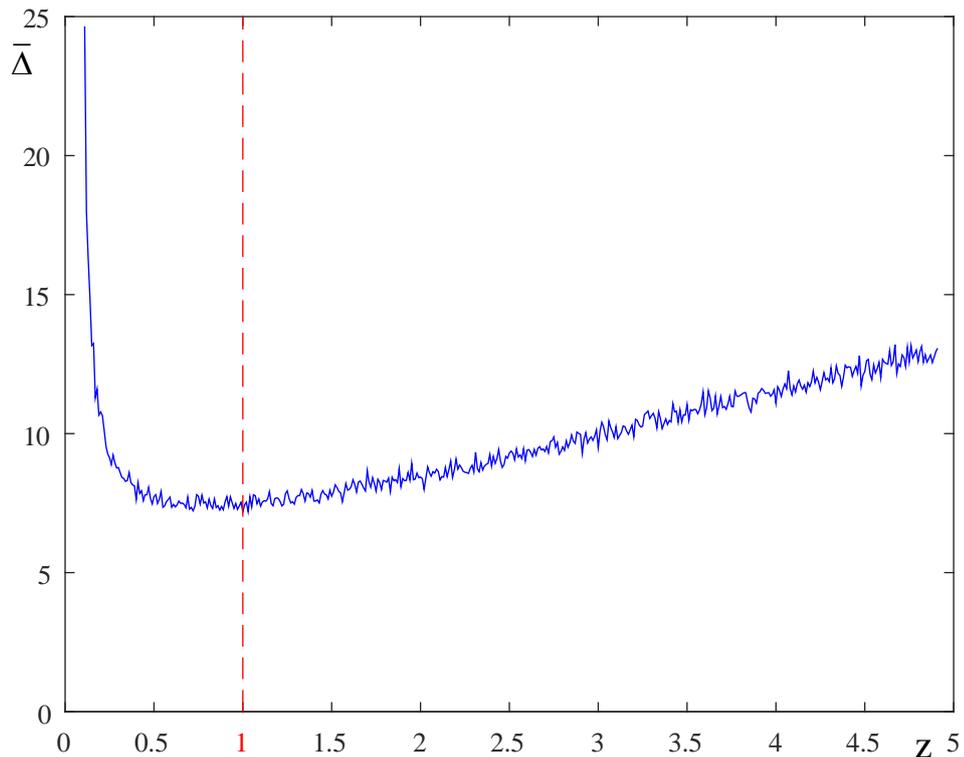


Рисунок 1.16 — Средний возраст информации от параметра z (случай 3)

На рисунке 1.17 представлены зависимости среднего возраста информации от интенсивности входного потока при подобранных значениях параметров алгоритма a , b и c . Для сравнения на рисунке 1.17 представлены такие же зависимости для двух наборов параметров a , b и c из работы [5] и для случая, когда в системе известно число абонентов, имеющих готовое для передачи сообщение ($p = 1/N_t$). Результаты моделирования показали, что зависимости, полученные при различных наборах параметров имеют незначительные отличия друг от друга, т.е. значения параметров алгоритма a , b и c не влияют на средний возраст информации.

Таким образом, предложенный в данном подразделе метод поиска оптимальных параметров алгоритма «Адаптивная» АЛОНА:

- позволяет уменьшить энергозатраты приблизительно на 30% для приложений, в которых не важна средняя задержка;
- может быть применен к задаче уменьшения средней задержки;
- не применим для задачи уменьшения среднего возраста информации.

В данном подразделе проводились исследования для модели с появлением абонентов при $\varepsilon = 0$. Однако предложенный для этой модели подход может быть применен для модели с появлением абонентов при любом значении ε .

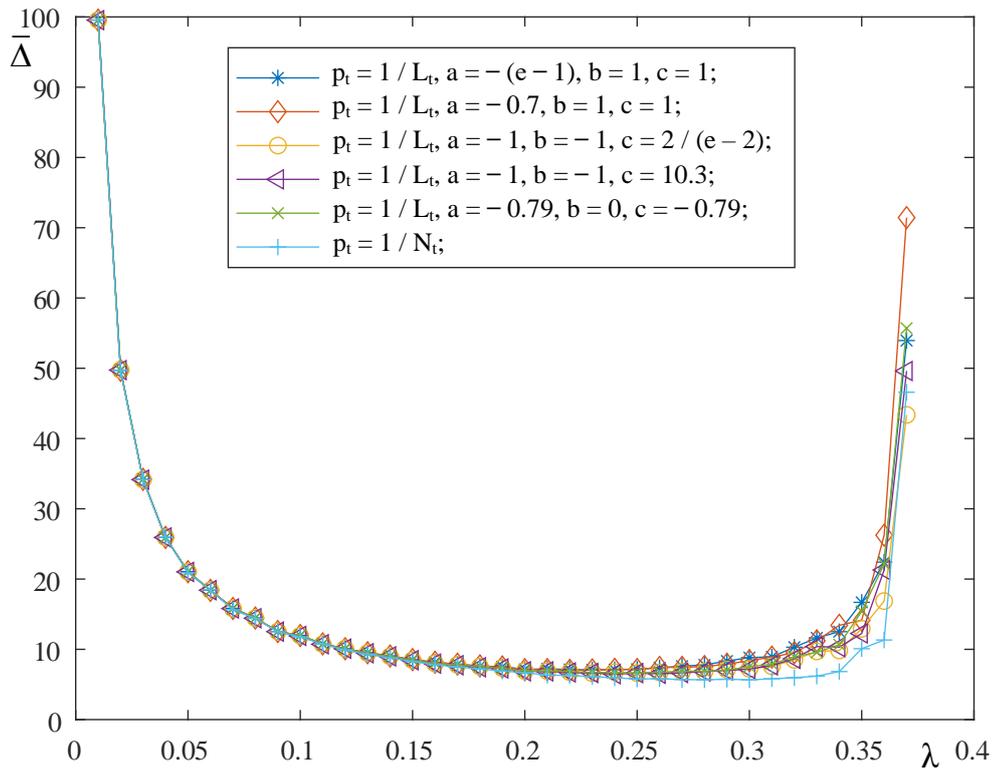


Рисунок 1.17 — Средний возраст информации от интенсивности входного потока при различных значениях параметров алгоритма (a , b и c)

1.8 Выводы по разделу

В данном разделе описаны основные сценарии и показатели качества работы систем Интернета вещей. Приведен сравнительный анализ работ, в которых исследуются системы Интернета вещей с большим числом устройств и зависимыми источниками. На основе сравнительного анализа введены два класса моделей с зависимыми источниками и предложена обобщенная система допущений для обоих классов моделей. Предложена новая модель, максимально упрощенная с точки зрения анализа, но сохраняющая основные свойства систем Интернета вещей с зависимыми источниками.

Также в данном разделе рассматривалась система с большим числом абонентов и алгоритмом доступа к каналу «Адаптивная» АЛОНА. Для этого алгоритма предложен подход, который дает возможность уменьшить среднее число повторных передач и, как следствие, снизить уровень энергопотребления. Данный подход основан на выборе оптимальных параметров алгоритма с помощью численных вычислений и имитационного моделирования, однако он

не учитывает зависимость данных от разных источников. Показано, что при применении этого подхода к задаче уменьшения среднего возраста информации не удастся получить значительного выигрыша.

По результатам сравнительного анализа, приведенного в разделе 1.2, можно выделить ряд нерешенных задач в рамках введенных классов моделей (таблица 5).

Таблица 5 — Решенные и нерешенные задачи в рамках моделей с зависимыми источниками

Задачи	Модель с появлением событий	Модель с появлением абонентов
Вычисление среднего числа успешных передач в единицу времени	Исследуется в работах [69–71]. Результаты получены с помощью имитационного моделирования.	Задача не рассматривалась для модели с множественным выходом.
Определение вероятности доставки информации о событии	Не исследовалась.	В модели с множественным выходом отсутствуют потери данных, поэтому данная задача не актуальна для этой модели.
Оценка среднего числа успешно переданных сообщений об одном событии	Не исследовалась.	В модели с множественным выходом отсутствуют потери данных, поэтому данная задача не актуальна для этой модели.

Исследование стабильности	Отсутствует проблема стабильности.	Задача решена. Предложен подход, обеспечивающий стабильность при любой интенсивности входного потока [10].
Анализ средней задержки	Не исследовалась.	Задача не рассматривалась для модели с множественным выходом.
Оценка среднего возраста информации	Исследуется в работах [61, 62].	Для модели с множественным выходом не исследовался.
Исследование энергоэффективности (среднего числа повторных передач)	В большинстве моделей отсутствуют повторные передачи. В работах [66–68, 70–72] исследуются подходы к уменьшению энергозатрат за счет декодирования сигналов от разных источников в случае конфликта.	На качественном уровне повышение энергоэффективности для модели из [10] достигается за счет множественного выхода абонентов из системы. Количественные показатели энергоэффективности не исследовались.

В моделях с появлением событий отсутствует проблема стабильности, т.к. число абонентов в этих системах ограничено и нет повторных передач. Для моделей с появлением абонентов в работе [10] предложена модель с зависимыми источниками и доказано, что средняя задержка в этой системе конечна при любой интенсивности входного потока. Однако зависимость средней задержки от интенсивности входного потока в данной модели не исследовалась. Вопросы уменьшения энергоэффективности для обоих классов моделей в настоящее время остаются открытыми.

В системах Интернета вещей выделяют ряд показателей, исследование которых может улучшить качество работы таких систем: среднее число успешных передач в единицу времени, вероятность доставки информации о событии, среднее число успешно переданных сообщений об одном событии, среднее число повторных передач, средняя задержка и средний возраст информации. Для моделей с появлением событий важными показателями являются: среднее число успешных передач в единицу времени, вероятность доставки информации о событии и среднее число успешно переданных сообщений об одном событии, а для моделей с появлением абонентов - среднее число повторных передач, средняя задержка и средний возраст информации. В работах [69–71] исследуется среднее число успешных передач в единицу времени для модели с появлением событий, в работах [61, 62] исследуется средний возраст информации для модели с появлением событий, а остальные показатели для систем Интернета вещей с зависимыми источниками еще не исследовались.

Далее в текущей диссертационной работе исследуются различные показатели качества систем Интернета вещей с большим числом устройств и зависимыми источниками. В разделе 2 рассматривается модель с появлением абонентов (модель с множественным выходом) и исследуются средняя задержка и средний возраст информации. Разделы 3 и 4 посвящены исследованиям моделей с появлением событий. В разделе 3 оценивается среднее число успешно переданных сообщений об одном событии и вероятность доставки информации о событии. В разделе 4 предлагается модель системы с зависимыми источниками, учитывающая особенности технологии LoRa, и исследуется вероятность доставки информации о событии.

2 СПОСОБЫ ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ ЗАДЕРЖКИ И СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИ С ПОЯВЛЕНИЕМ АБОНЕНТОВ

2.1 Вводные замечания

В данном разделе рассматривается модель системы СМД с зависимыми источниками. Количество устройств в системе потенциально ничем неограничено. Для передачи используется случайный доступ без идентификации источника. В случае успешной передачи устройства, данные которых зависимы, одновременно покидают систему. Эта модель относится к классу моделей с появлением абонентов.

В рамках данной модели исследуются показатели качества системы с неограниченным количеством пользователей и зависимыми источниками, такие как средняя задержка и средний возраст информации.

Применительно к рассматриваемой модели формулируются некоторые гипотезы. На основе гипотез предлагаются вспомогательные модели для построения верхней и нижней оценок средней задержки. Кроме того, в данном разделе исследуется средняя задержка в системе при отсутствии информации о числе абонентов, имеющих готовое для передачи сообщение.

Также в данном разделе уточняется понятие среднего возраста информации для системы с множественным выходом и исследуется зависимость этого показателя от интенсивности входного потока.

Результаты, полученные в данном разделе, опубликованы в работах [78–81].

2.2 Модель системы с появлением абонентов и множественным выходом

Система СМД, в которой выполняется одновременный выход абонентов, имеющих зависимые данные, рассматривалась в работе [10] и получила назва-

ние – система с множественным выходом. Для этой системы авторы работы [10] предложили модель, в которой зона действия базовой станции является поверхностью сферы, и доказали, что данная система работает стабильно независимо от интенсивности появления абонентов. В отличие от работы [10] будем рассматривать в качестве зоны действия базовой станции окружность. Это позволит упростить анализ системы.

Схематичное представление данной модели проиллюстрировано на рисунке 2.1. Приведем ряд допущений для модели системы с множественным выходом.

Допущение 1. Обмен сообщениями между абонентами и базовой станцией происходит по радиоканалу. Базовая станция способна получать сообщения от абонентов, которые находятся на расстоянии R от неё. Следовательно, расположение абонентов в системе представляет собой окружность радиуса R и длины C , как показано на рисунке 2.1. Будем считать, что $R = 1/2\pi$, т.е. $C = 1$.

Допущение 2. Абоненты входят в систему в соответствии с пространственным точечным пуассоновским процессом, который имеет единственный параметр λ . Каждый абонент характеризуется временем входа в систему и координатами местоположения на окружности. Периоды времени между входами абонентов являются случайными величинами, распределенными по экспоненциальному закону. Координаты местоположений абонентов на окружности являются случайными величинами, распределенными по равномерному закону.

Допущение 3. Время в системе разбито на одинаковые интервалы времени, которые будем называть окнами. Время, за которое сообщение будет отправлено на базовую станцию, эквивалентно длительности ровно одного окна. Абоненты умеют определять начало следующего окна – момент времени для отправки сообщений.

Допущение 4. Всех абонентов в системе будем называть активными, так как при входе в систему у каждого из них есть сообщение для передачи. Базовая станция определяет количество активных абонентов N_t к началу окна t и отправляет эту информацию абонентам. Абоненты отправляют сообщения на базовую станцию с вероятностью: $p_t = 1/N_t$.

Допущение 5. В окне могут возникнуть следующие ситуации: «успех» (решил отправить сообщение ровно один абонент), «пусто» (все абонен-

ты решили не отправлять сообщение), «конфликт» (число абонентов, решивших отправить сообщение, больше или равно двум). В конце окна абоненты узнают какая ситуация возникла в окне.

Допущение 6. Абонент выходит из системы после успешной передачи сообщения. Остальные абоненты узнают от базовой станции координаты местоположения этого абонента и вычисляют длину дуги окружности между своими и его координатами δ . Если получилось, что $\delta \leq \varepsilon/2$, то данный абонент тоже выходит из системы. Через ε обозначим долю окружности, на которой расположены абоненты, одновременно выходящие из системы (рисунок 2.1).

Для удобства изложения материала будем называть описанную выше модель моделью M_0 .

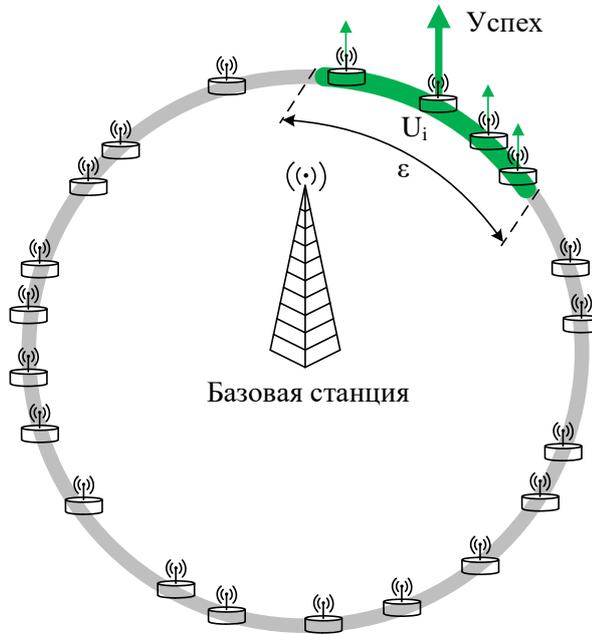


Рисунок 2.1 — Схематичное представление модели M_0

Обозначим через \mathbb{U}_t – множество координат местоположений активных абонентов в начале окна t ; через \mathbb{X}_t – множество координат местоположений абонентов, которые вошли в систему в окне t ; через \mathbb{Y}_t – множество координат местоположений абонентов, которые вышли из системы в окне t . Тогда функционирование модели M_0 можно представить многомерной цепью Маркова и описать следующим образом:

$$\mathbb{U}_{t+1} = (\mathbb{U}_t \setminus \mathbb{Y}_t) \cup \mathbb{X}_t. \quad (2.1)$$

Введенная ранее величина N_t показывает количество элементов в множестве \mathbb{U}_t , т.е. $N_t = |\mathbb{U}_t|$. Введем еще две величины $V_t = |\mathbb{X}_t|$ и $L_t = |\mathbb{Y}_t|$, которые будут отражать количество элементов в множествах \mathbb{X}_t и \mathbb{Y}_t соответственно. Для данных величин верно следующее равенство:

$$N_{t+1} = N_t - L_t + V_t. \quad (2.2)$$

Стоит отметить, что равенство (2.2) не описывает функционирование модели M_0 .

В работе [10] исследовалась стабильность более общей модели, по сравнению с M_0 . На основе результатов работы [10] для модели M_0 может быть сформулировано и доказано следующее утверждение.

Утверждение 2.1. *Если интенсивность появления абонентов в системе λ конечна, то цепь Маркова, отражающая работу модели M_0 , будет эргодической.*

Утверждение 2.1 говорит о том, что цепь Маркова, отражающая работу модели M_0 , имеет стационарное распределение независимо от интенсивности появления абонентов в системе. Для того чтобы получить среднюю задержку в модели M_0 , потребуется найти стационарное распределение этой Марковской цепи. Однако решить данную задачу достаточно сложно, так как число состояний данной Марковской цепи несчетно. Далее будут рассмотрены способы получения верхней и нижней оценок средней задержки, не требующие рассмотрения Марковских цепей с несчетным числом состояний.

2.3 Верхняя оценка средней задержки

Введем вспомогательную модель M_1 , которая позволит построить верхнюю оценку средней задержки. Единственным отличием модели M_1 от модели M_0 является дополнительное допущение.

Допущение 7. В конце окна, в котором было успешно отправлено сообщение, расположение абонентов на окружности изменяется в соответствии с равномерным распределением.

Обозначим через \bar{N}_{M0} и \bar{N}_{M1} — среднее количество абонентов в системах $M0$ и $M1$ соответственно. Исходя из допущения №7, можно выдвинуть гипотезу.

Гипотеза 2.1. *Независимо от интенсивности появления абонентов в системе λ для моделей $M0$ и $M1$ будет справедливо следующее неравенство:*

$$\bar{N}_{M0} < \bar{N}_{M1}.$$

Согласно допущению №7 координаты местоположений абонентов будут всегда распределены равномерно по окружности. Поэтому в отличие от модели $M0$ работу модели $M1$ можно представить одномерной Марковской цепью и описать как равенством (2.2), так и равенством (2.1). Для удобства изложения материала для модели $M1$ будем использовать такие же обозначения, как для модели $M0$.

Опираясь на результаты работы [10] для модели $M1$ будет справедливо утверждение аналогичное утверждению 2.1. Следовательно, цепь Маркова, отражающая работу модели $M1$, тоже будет иметь стационарное распределение. Поэтому рассмотрим $t \rightarrow \infty$ и вычислим математическое ожидание от левой и правой частей выражения (2.2):

$$M [N_{t+1}] = M [N_t - L_t + V_t].$$

Если $t \rightarrow \infty$, то $M [N_{t+1}] = M [N_t]$. Следовательно,

$$M [L_t] = M [V_t]. \quad (2.3)$$

Так как случайная величина, равная количеству абонентов, которые вошли в систему в окне t , имеет распределение Пуассона, то

$$M [V_t] = \lambda. \quad (2.4)$$

Обозначим через θ_t индикатор ситуации, которая возникла в окне t . Индикатор θ_t может принимать следующие значения:

$$\theta_t = \begin{cases} 1, & \text{если в окне } t \text{ возникла ситуация «успех»} \\ 0, & \text{если в окне } t \text{ возникла ситуация «пусто»} \\ 2, & \text{если в окне } t \text{ возникла ситуация «конфликт»} \end{cases}.$$

Тогда $M [L_t]$ можно найти по формуле

$$M [L_t] = Pr \{ \theta_t = 1 \} (1 + (M [N_t] - 1) \varepsilon),$$

Вероятность, что в окне возникла ситуация «успех», можно вычислить как

$$Pr \{ \theta_t = 1 \} = \left(1 - \frac{1}{N_t} \right)^{N_t-1}.$$

При больших значениях интенсивности входного потока λ количество абонентов, имеющих в системе в окне t , будет принимать большие значения. Можно показать, что при больших N_t вероятность «успеха» будет приблизительно равна e^{-1} :

$$\left(1 - \frac{1}{N_t} \right)^{N_t-1} \approx e^{-1}.$$

Тогда

$$M [L_t] \approx e^{-1} (1 + (M [N_t] - 1) \varepsilon). \quad (2.5)$$

Подставим (2.4) и (2.5) в (2.3) и выразим $M [N_t]$:

$$M [N_t] \approx \frac{\lambda e + \varepsilon - 1}{\varepsilon}.$$

Т.к. $t \rightarrow \infty$, то $\lim_{t \rightarrow \infty} M [N_t] = \bar{N}_{M1}$. Следовательно,

$$\bar{N}_{M1} \approx \frac{\lambda e + \varepsilon - 1}{\varepsilon}. \quad (2.6)$$

Зная \bar{N} , можно найти среднюю задержку \bar{D} с помощью формулы Литтла

$$\bar{D} = \frac{\bar{N}}{\lambda}. \quad (2.7)$$

Таким образом,

$$\bar{D}_{M1} \approx \frac{\lambda e + \varepsilon - 1}{\varepsilon \lambda}. \quad (2.8)$$

2.4 Нижняя оценка средней задержки

Введем вспомогательную модель $M2$, которая позволит построить нижнюю оценку средней задержки. Модель $M2$ будет отличаться от модели $M0$ только допущением №6. Приведем допущение №6 для модели $M2$.

Допущение 6. Предположим, что окружность разбита на несколько секций. Обозначим через Q их количество. Абонент выходит из системы после успешной передачи сообщения. Остальные абоненты узнают от базовой станции координаты местоположения этого абонента и определяют в какой секции он находился. Если он находился в той же секции, то данный абонент тоже выходит из системы. Через ε обозначим секцию окружности, на которой расположены абоненты, одновременно выходящие из системы. Пример схематичного представления модели $M2$ при ($Q = 4$) представлен на рисунке 2.2.

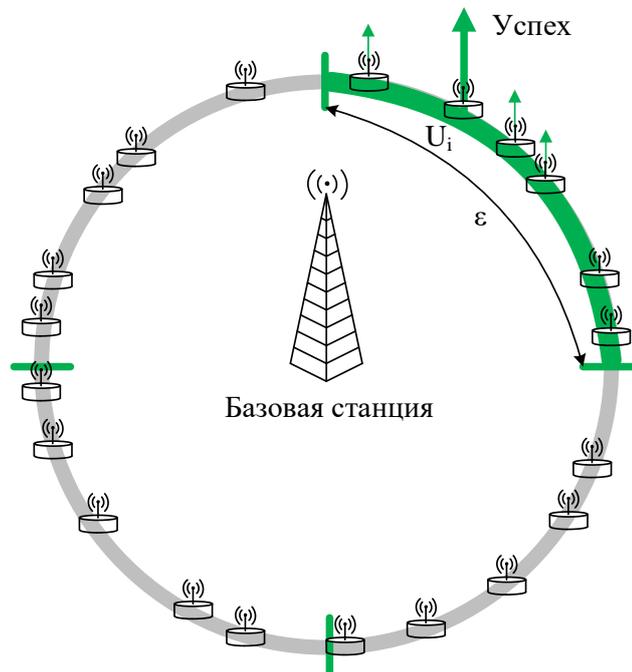


Рисунок 2.2 — Схематичное представление модели $M2$ при $Q = 4$

Обозначим через \bar{N}_{M2} – среднее количество абонентов в системе $M2$. Исходя из допущения №6 для модели $M2$, можно выдвинуть гипотезу.

Гипотеза 2.2. Независимо от интенсивности появления абонентов в системе λ для моделей $M0$ и $M2$ будет справедливо следующее неравенство:

$$\bar{N}_{M0} > \bar{N}_{M2}.$$

Обозначим через U_t^j множество координат местоположений абонентов, которые находятся в j -й секции окружности, а через $N_t^j = |U_t^j|$ – количество элементов множества U_t^j . Тогда множество U_t можно разбить на Q подмножеств: $U_t^1, U_t^2, \dots, U_t^j, \dots, U_t^Q$. Поведение модели $M2$ можно представить в виде

цепи Маркова с Q измерениями и описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} N_{t+1}^1 = N_t^1 - F^1(N_t^1, N_t^2, \dots, N_t^Q) + V_t^1 \\ N_{t+1}^2 = N_t^2 - F^2(N_t^1, N_t^2, \dots, N_t^Q) + V_t^2 \\ \dots \\ N_{t+1}^Q = N_t^Q - F^Q(N_t^1, N_t^2, \dots, N_t^Q) + V_t^Q \end{cases},$$

где V_t^j – количество абонентов, которые вошли в систему в окне t и попали в секцию j . Стоит отметить, что данная система уравнений будет справедлива для модели $M2$, так как координаты местоположений абонентов в каждой секции будут распределены равномерно.

Так как случайная величина V_t^j имеет распределение Пуассона с параметром $\lambda\varepsilon$, то

$$M[V_t^j] = \lambda\varepsilon.$$

Величины F^j вычисляются в соответствии со следующей процедурой, состоящей из двух шагов.

Шаг I. Сгенерировать значение случайной величины X в соответствии с правилом

$$X = \begin{cases} 0, & \text{с вероятностью } 1 - \left(1 - \frac{1}{N_t}\right)^{N_t-1} \\ 1, & \text{в противном случае} \end{cases}, N_t = \sum_{j=1}^Q N_t^j.$$

Шаг II. Определить значения F^j , $j = 1, \dots, Q$.

– Если $X = 1$, то

$$F^j = \begin{cases} 0, & \text{с вероятностью } 1 - \frac{N_t^j}{N_t} \\ N_t^j, & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

– Если $X = 0$, то $F^j = 0$.

Имитационное моделирование модели $M2$ путем моделирования вышеописанной Марковской цепи дает возможность получить нижнюю оценку средней задержки для модели $M0$, а также упростить и ускорить процесс моделирования по сравнению с непосредственным моделированием модели $M2$. Вопрос о получении математического замкнутого выражения для нижней оценки средней задержки на данный момент не имеет ответа.

2.5 Численный метод вычисления верхней оценки средней задержки

В подразделе 2.3 была введена модель $M1$ и была получена формула (2.8), которая дает близкое к точному значение средней задержки для этой модели. Согласно гипотезе 2.1 значение, полученное по формуле (2.8), будет оценкой сверху для средней задержки в модели $M0$. Насколько близким к точному будет это значение определить сложно. В данном подразделе будет представлен способ построения нижней оценки средней задержки для модели $M1$. Данный подход позволит получать оценку с любой требуемой точностью.

Модель $M1$ можно представить в виде одномерной цепи Маркова. Поиск стационарного распределения этой Марковской цепи является трудной задачей из-за бесконечного числа состояний. В работе [82] рассматривается система с неограниченным количеством абонентов и алгоритмом передачи данных «оптимальная» АЛОНА. Предлагается подход, позволяющий получать значения показателей качества работы системы, таких как средняя задержка и среднее число абонентов в системе, с различной точностью. При применении этого подхода к системе с множественным выходом, нарушается её устойчивость при $\lambda > e^{-1}$. Поэтому подход из работы [82] не применим для системы с множественным выходом. Чтобы найти стационарное распределение Марковской цепи ограничим число её состояний до $K + 1$, как показано на рисунке 2.3. Это означает, что количество абонентов в системе не будет превышать K .

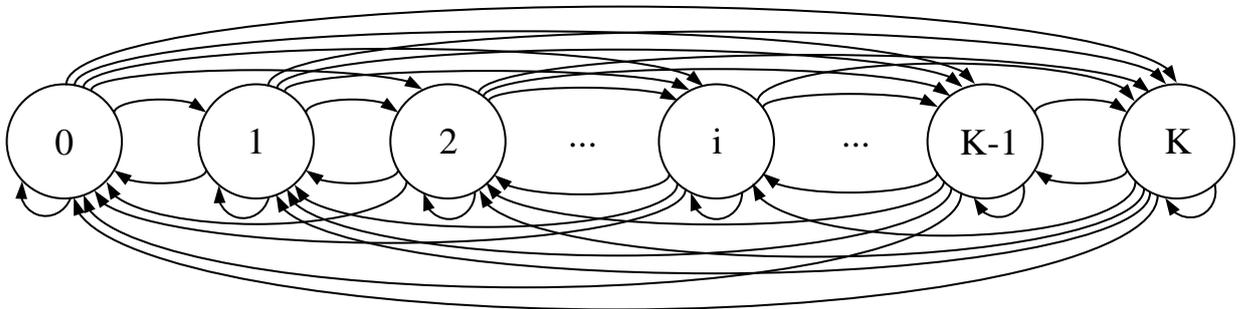


Рисунок 2.3 — Марковская цепь для модели $M1$ с $K + 1$ состояниями

Переходные вероятности описанной выше цепи Маркова p_{ij} для любых двух произвольно выбранных состояний i и j будут иметь следующий вид:

– если $i = 0$

$$p_{ij} = \frac{\lambda^j}{j!} e^{-\lambda};$$

– если $i > 0, j \geq i$

$$p_{ij} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{i}\right)^{i-1}\right) \frac{\lambda^{j-i}}{(j-i)!} e^{-\lambda} + \left(1 - \frac{1}{i}\right)^{i-1} \sum_{m=1}^i \left(C_{i-1}^{m-1} \varepsilon^{m-1} (1 - \varepsilon)^{i-m} \frac{\lambda^{j-i+m}}{(j-i+m)!} e^{-\lambda}\right);$$

– если $i > 0, j < i$

$$p_{ij} = \left(1 - \frac{1}{i}\right)^{i-1} \sum_{m=0}^j \left(C_{i-1}^{i-j+m-1} \varepsilon^{i-j+m-1} (1 - \varepsilon)^{j-m} \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}\right).$$

Пусть π_i – вероятность, что система пребывает в состоянии i . Она эквивалентна вероятности того, что количество абонентов в системе равняется i : $\pi_i = \Pr\{N_t = i\}$. Для того чтобы найти стационарные вероятности данной цепи Маркова, необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_0 = \pi_0 p_{00} + \pi_1 p_{10} + \pi_2 p_{20} + \dots + \pi_K p_{K0} \\ \pi_1 = \pi_0 p_{01} + \pi_1 p_{11} + \pi_2 p_{21} + \dots + \pi_K p_{K1} \\ \pi_2 = \pi_0 p_{02} + \pi_1 p_{12} + \pi_2 p_{22} + \dots + \pi_K p_{K2} \\ \dots \\ \pi_{K-1} = \pi_0 p_{0K-1} + \pi_1 p_{1K-1} + \pi_2 p_{2K-1} + \dots + \pi_K p_{KK-1} \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \dots + \pi_K = 1 \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Получив стационарные вероятности, найдем среднее количество абонентов в системе, следующим образом:

$$\bar{N} = \sum_{i=0}^K i \pi_i.$$

Используя выражение (2.7), вычислим среднюю задержку в системе

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=0}^K i \pi_i}{\lambda}. \quad (2.10)$$

Вычислительная сложность решения системы уравнений (2.9) зависит от числа состояний Марковской цепи. На рисунке 2.4 представлены зависимости

оценки средней задержки от количества состояний Марковской цепи. Данные результаты были получены при $\varepsilon = 0.1$ и трех значениях интенсивности: $\lambda = 2$, $\lambda = 5.2$ и $\lambda = 10$. Заметим, что для получения одной и той же точности оценки для разных значений интенсивности появления абонентов необходимо разное число состояний. Если требуемая точность равняется 0.01, тогда для $\lambda = 2$ необходимо ≈ 100 состояний, а для $\lambda = 10 - \approx 500$.

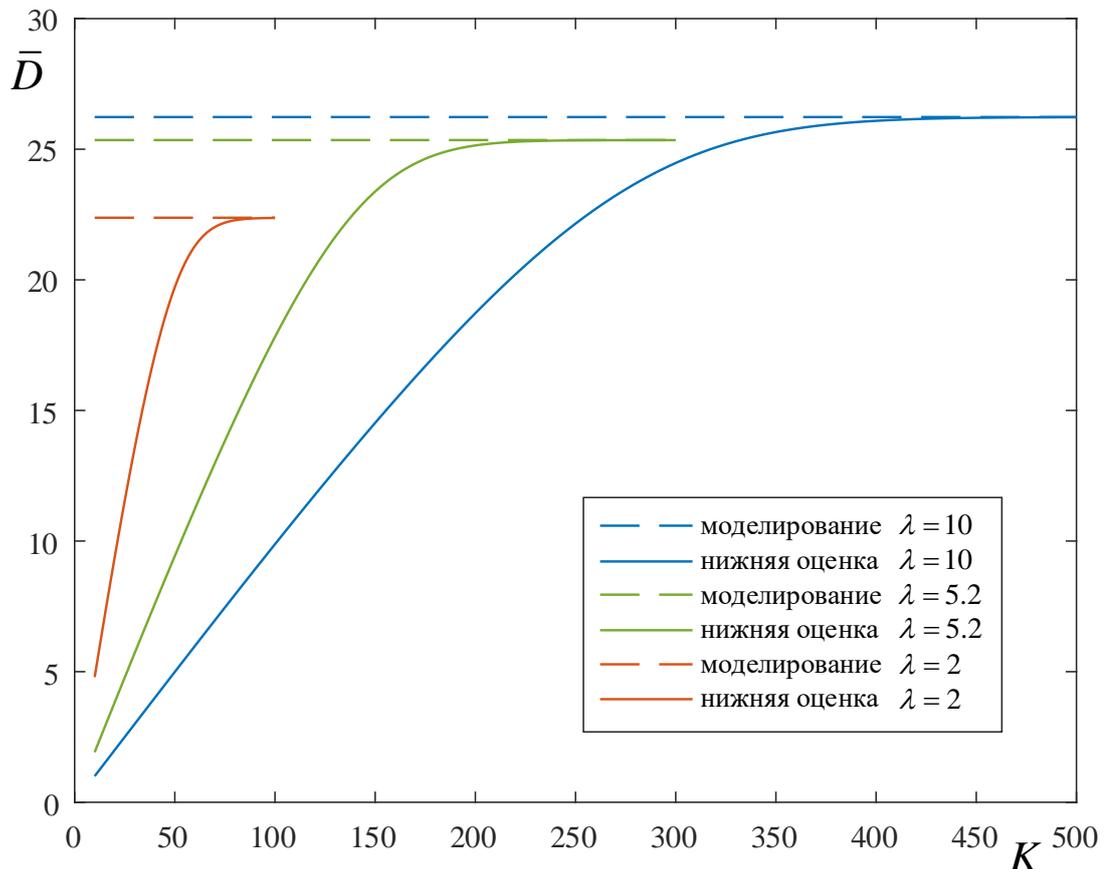


Рисунок 2.4 — Нижние оценки средней задержки от числа состояний Марковской цепи для модели $M1$, полученные при $\varepsilon = 0.1$ и трех значениях λ : $\lambda = 2$, $\lambda = 5.2$ и $\lambda = 10$

На рисунке 2.5 проиллюстрировано сравнение двух верхних оценок средней задержки для модели $M0$ с результатами моделирования. Одна из них получена с помощью подхода, описанного в подразделе 2.3 (по формуле (2.8)), а другая — получена с помощью подхода, описанного в этом подразделе (по формуле (2.10)).

Полученные результаты показали, что вышеописанный метод, в отличие от подхода из подраздела 2.3, дает возможность построить более близкую верхнюю оценку средней задержки для системы с множественным выходом.

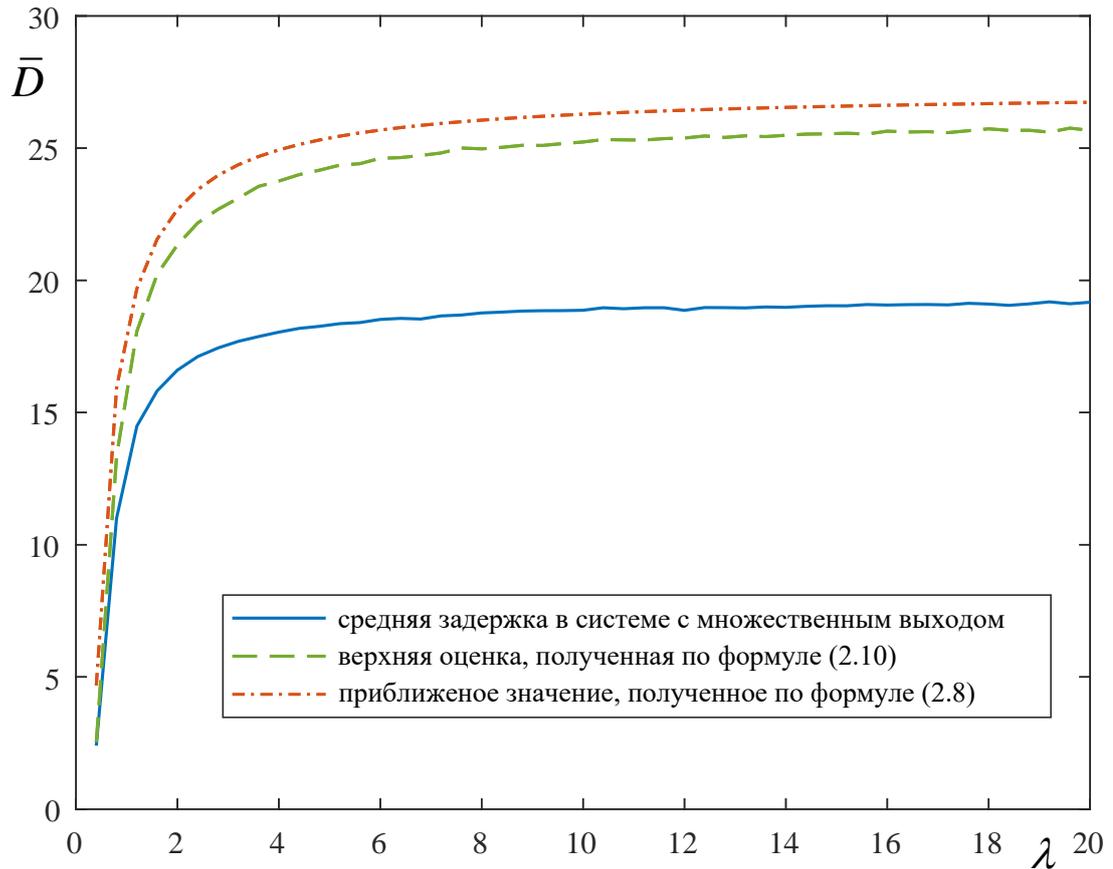


Рисунок 2.5 — Верхние оценки и точное значение средней задержки для модели M_0 при $\varepsilon = 0.1$

2.6 Сравнение результатов имитационного моделирования с оценками средней задержки

Путем имитационного моделирования модели M_0 и моделирования Марковской цепи, описывающей модель M_2 , были получены значения среднего числа абонентов и средней задержки от интенсивности появления абонентов в системе для двух моделей (рисунки 2.6 и 2.7). Помимо результатов, полученных с помощью моделирования, на рисунках 2.6 и 2.7 приведены верхние оценки среднего числа абонентов в системе и средней задержки, полученные с помощью теоретического расчета (по формулам (2.6) и (2.8) соответственно) и численного расчета (приведенного в подразделе 2.3). Данные зависимости подтверждают справедливость гипотез 2.1 и 2.2 при некоторых значениях параметров системы. Однако полученные результаты не являются доказательством

справедливости данных гипотез. В общем случае вопрос о доказательстве этих гипотез остается открытым.

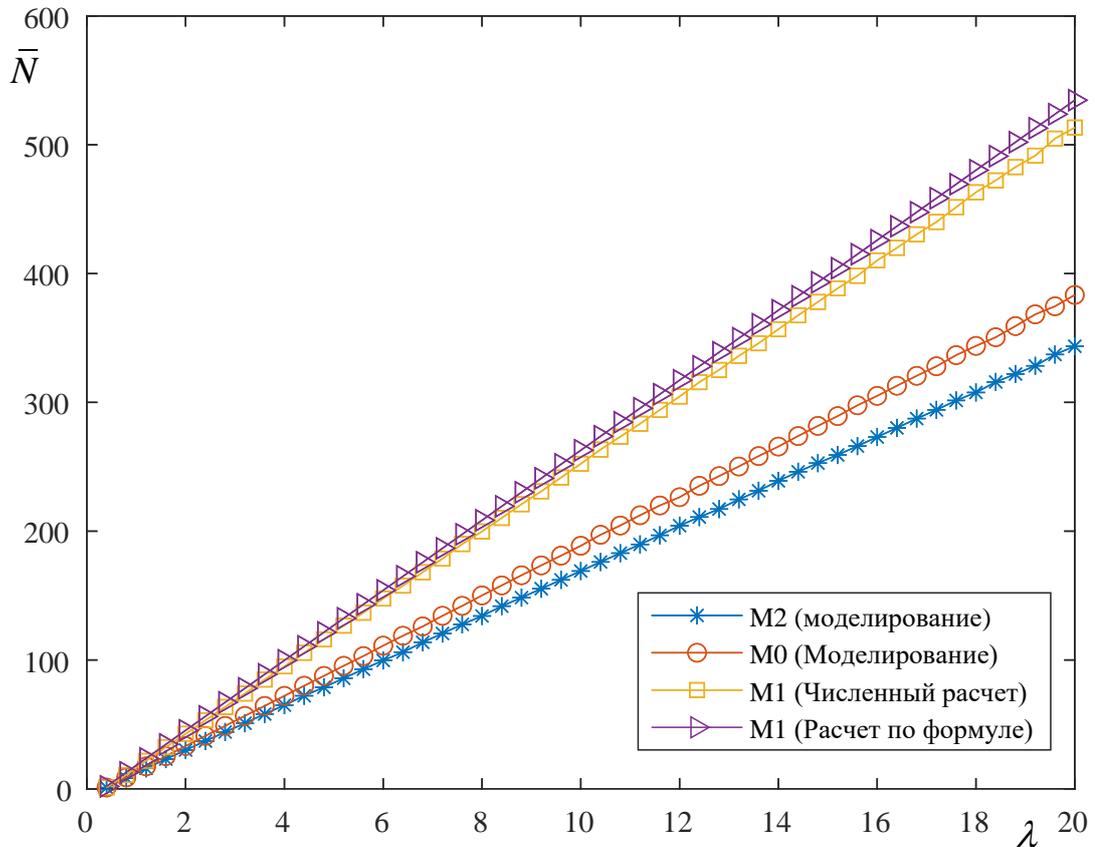


Рисунок 2.6 — Среднее число абонентов от интенсивности входного потока при $\varepsilon = 0.1$

На рисунке 2.8 приведены зависимости средней задержки от доли абонентов, покидающих систему, ε . Зависимости $\bar{D}(\varepsilon)$ для моделей $M0$ и $M2$ получены с помощью имитационного моделирования. Для модели $M1$ приведены две зависимости $\bar{D}(\varepsilon)$. Одна из них получена с помощью численного расчета, а другая — с помощью теоретического расчета. Из данных результатов видно, что при любом значении ε справедливо следующее неравенство:

$$\bar{D}_{M1}(\varepsilon) > \bar{D}_{M0}(\varepsilon) > \bar{D}_{M2}(\varepsilon).$$

Таким образом, данные примеры подтверждают, что модель $M1$ позволяет построить оценку средней задержки сверху, а модель $M2$ — снизу.

В настоящих системах мониторинга абоненты не могут получать информацию о количестве активных абонентов в системе. В подразделе был описан

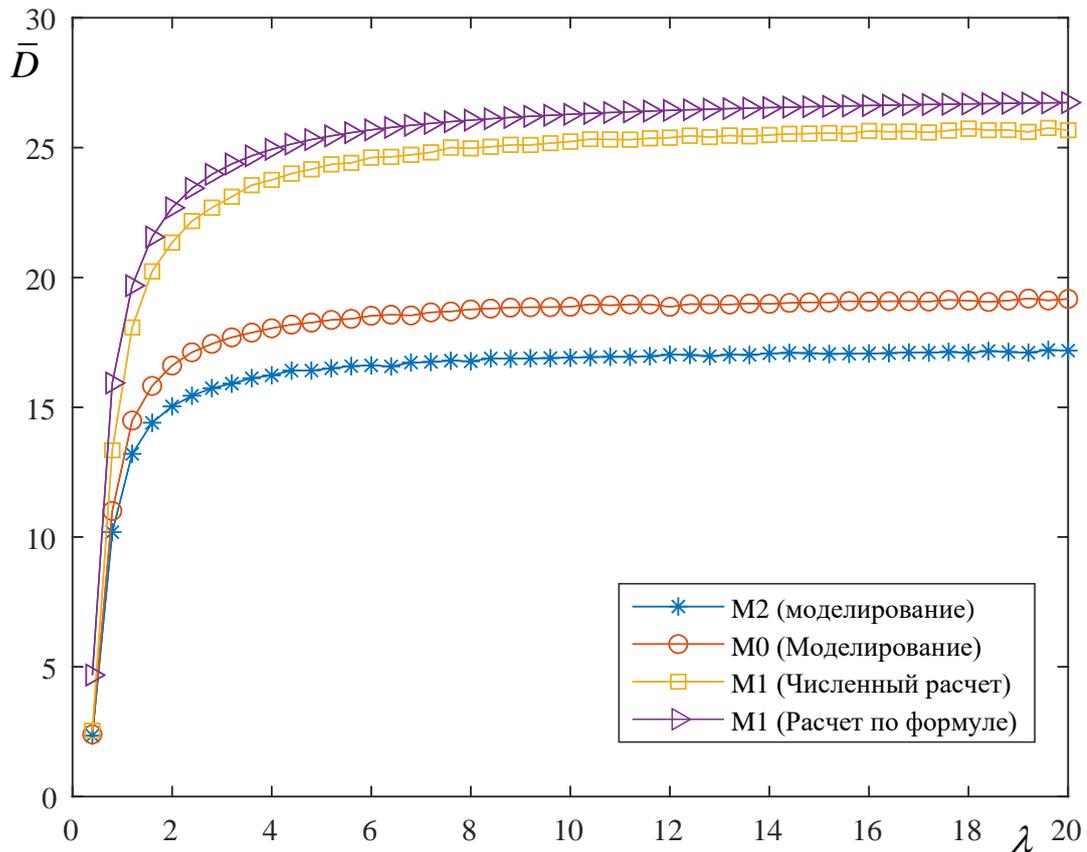


Рисунок 2.7 — Средняя задержка от интенсивности входного потока при $\varepsilon = 0.1$

алгоритм «Адаптивная синхронная Алоха» из работы [5]. В этом алгоритме вероятность передачи не зависит от количества активных абонентов. В данном алгоритме абоненты некоторым образом меняют вероятность передачи в зависимости от событий в канале.

Алгоритм «Адаптивная синхронная Алоха» можно применить в модели с множественным выходом. Для этого изменим допущение №4 следующим образом.

Допущение 4. Абоненты отправляют сообщения на базовую станцию согласно алгоритму «Адаптивная синхронная Алоха», который имеет три параметра a , b и c . Обозначим через $I\{\cdot\}$ — индикатор ситуации, которая возникла в окне (П - «пусто», У - «успех», К - «конфликт»). В конце каждого окна абоненты вычисляют оценку количества активных абонентов L_t по правилу

$$L_{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{если } t = 0 \\ \max[1, L_t + aI\{\text{П}\} + bI\{\text{У}\} + cI\{\text{К}\}], & \text{иначе} \end{cases}$$

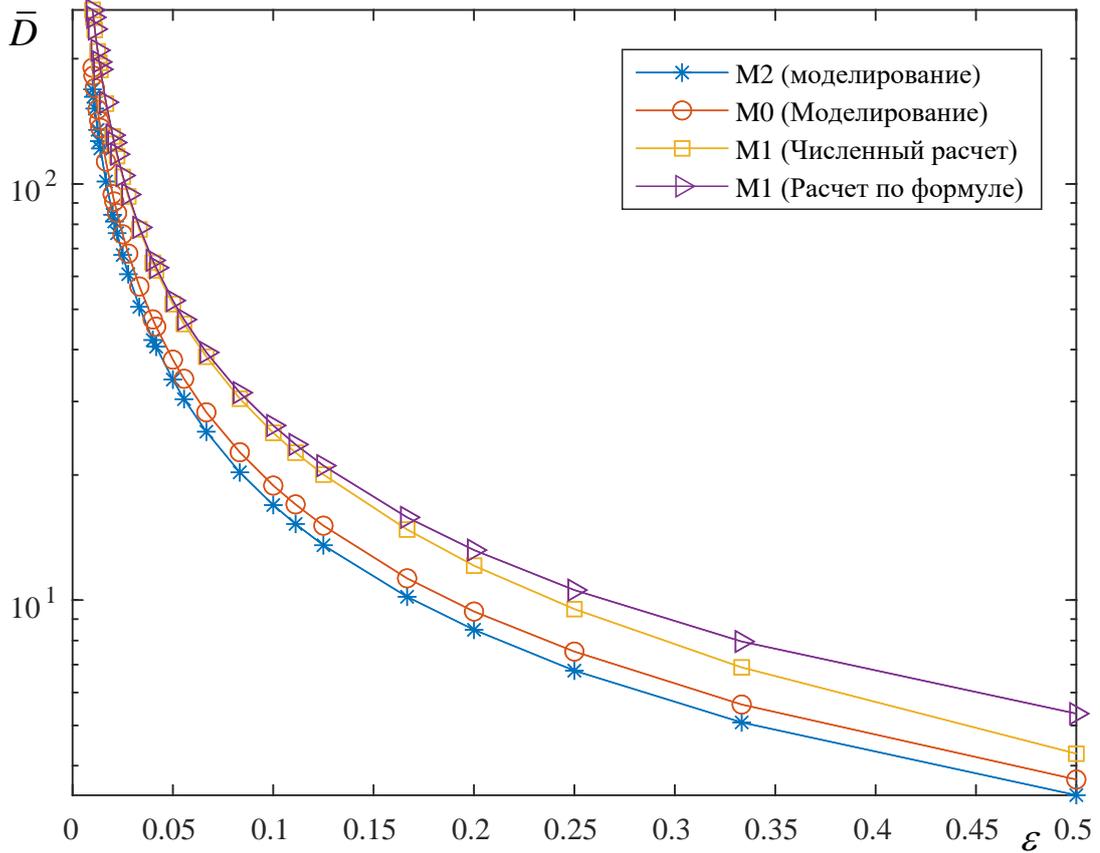


Рисунок 2.8 — Средняя задержка от доли абонентов, покидающих систему, $\lambda = 10$

и вычисляют вероятность передачи $p_t = \frac{1}{L_t}$.

Аналогично названиям предыдущих моделей дадим название этой модели — модель МЗ.

Похожий алгоритм рассматривался в работе [83]. В отличие от алгоритма из работы [5] в этом алгоритме необходимо вычислять оценку интенсивности появления абонентов в системе $\hat{\lambda}$ для получения значений параметров:

$$\begin{aligned} a &= -1 + \hat{\lambda}; \\ b &= -1 + \hat{\lambda}; \\ c &= (e - 2)^{-1} + \hat{\lambda}. \end{aligned}$$

При моделировании модели МЗ для алгоритма «Адаптивная синхронная Алоха» были выбраны параметры из работы [83], за исключением параметра b . Он был модифицирован в соответствии со спецификой системы с множественным выходом следующим образом:

$$b = -(1 + (L_t - 1)\varepsilon) + \hat{\lambda}.$$

В отличие от параметров a и c , параметр b в процессе моделирования принимал разные значения в каждом окне. Однако было решено не добавлять к нему нижний индекс t , как у L_t , чтобы обозначения параметров остались схожими.

В результате имитационного моделирования были получены значения средней задержки для модели $M3$. Также было проведено моделирование остальных моделей: $M0$, $M1$ и $M2$. Полученные результаты приведены на рисунке 2.9.

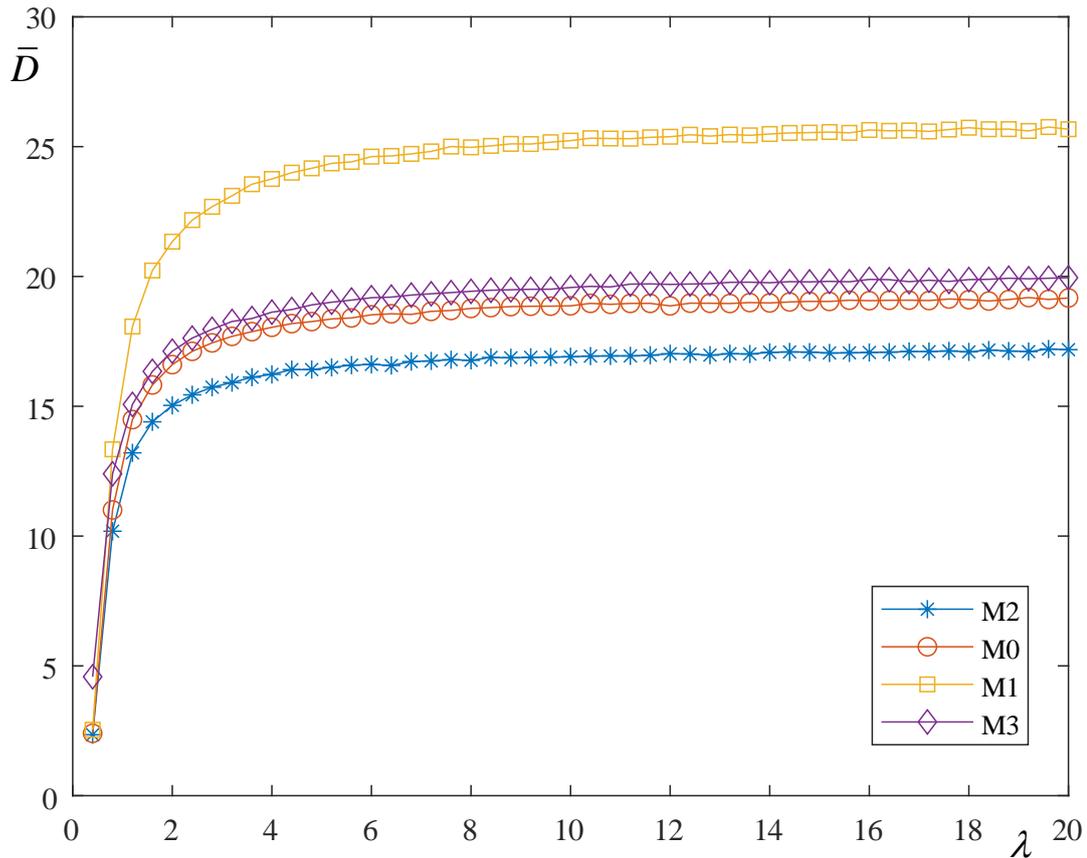


Рисунок 2.9 — Средняя задержка от интенсивности входного потока для моделей $M0$, $M1$, $M2$ и $M3$, $\varepsilon = 0.1$

Полученные зависимости $\bar{D}(\lambda)$ иллюстрируют, что модель $M3$ работает устойчиво при выбранных значениях параметров a , b и c . В модели $M3$ средняя задержка несущественно больше, чем в модели $M0$.

В ходе моделирования было установлено, что не для всех значений параметров алгоритма «Адаптивная синхронная Алоха» верно неравенство

$$\bar{D}_{M1} > \bar{D}_{M3} > \bar{D}_{M2}.$$

Например, при значениях параметров, предложенных в работе [5], система перестает работать устойчиво. Задача о нахождении независимых от λ параметров и при этом, обеспечивающих устойчивую работу системы, на данный момент не решена.

В процессе моделирования модели МЗ $\hat{\lambda}$ не вычислялась, так как считалось, что интенсивность появления абонентов известна. Вопрос об оценке интенсивности входного потока остается открытым.

2.7 Сравнение понятий среднего возраста информации в СМО и системах СМД

Пусть имеется система $M|D|1$, в которой время разбито на одинаковые отрезки времени, предназначенные для обслуживания заявок. Будем называть эти отрезки окнами, а систему – синхронной системой $M|D|1$. Примем длину одного отрезка за единицу. Мы будем рассматривать именно такую систему, т.к. во многих современных системах передачи данных моменты передачи сообщений от разных пользователей синхронизированы. На рисунке 2.10 представлен пример поведения возраста информации на интервале $[0, T]$ применительно к рассматриваемой системе. Стоит отметить, что из-за синхронизации времени, значение функции $\Delta(t)$ может понизиться только в конце окна.

Средний возраст информации в синхронной системе $M|D|1$ можно получить путем имитационного моделирования в соответствии со следующим порядком действий.

1. Зафиксировать интенсивность возникновения заявок в системе λ и период наблюдения за системой T , т.е. количество окон.
2. Получить моменты возникновения заявок в системе, используя пространственный точечный пуассоновский процесс с параметром λ , и посчитать число заявок, возникших на интервале $[0, T]$.
3. Определить моменты завершения обслуживания заявок. Посчитать число заявок, обслуживание которых было завершено на интервале $[0, T]$.
4. Найти значение среднего возраста информации на интервале $[0, T]$ с помощью формулы (1.7).

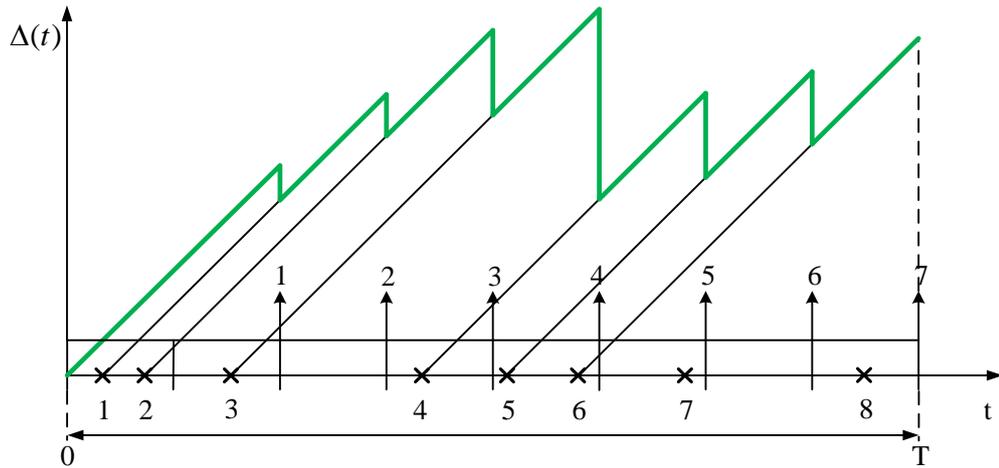


Рисунок 2.10 — Пример поведения возраста информации на интервале $[0, T]$ в синхронной системе $M|D|1$

В отличие от СМО в системах СМД могут быть конфликты, которые приводят к изменению порядка обслуживания. В процессе оценки среднего возраста информации в системах СМД не учитывают сообщения, которые были успешно переданы позже, чем появившиеся после них сообщения [42]. Иначе говоря, если сообщение с номером i было успешно передано позже сообщения с номером j и при этом $i < j$, то предполагается, что информация в сообщении j уже не является актуальной и средний возраст информации продолжает увеличиваться. На рисунке 2.11 приведен пример поведения возраста информации на интервале $[0, T]$ в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА.

Для систем СМД значительно труднее получить математическое выражение для среднего возраста информации, чем для СМО. В работе [42] предложены способы оценки этого показателя. Однако алгоритм имитационного моделирования, описанный выше может быть применен и к системам СМД. На рисунке 2.12 представлены зависимости $\bar{\Delta}(t)$ для синхронной системы $M|D|1$ и системы СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА в предположении, что число активных абонентов известно. Для построения этих зависимостей было проведено имитационное моделирование миллиона окон. Увеличивая количество окон в моделировании, можно получить значения среднего возраста информации с требуемой точностью.

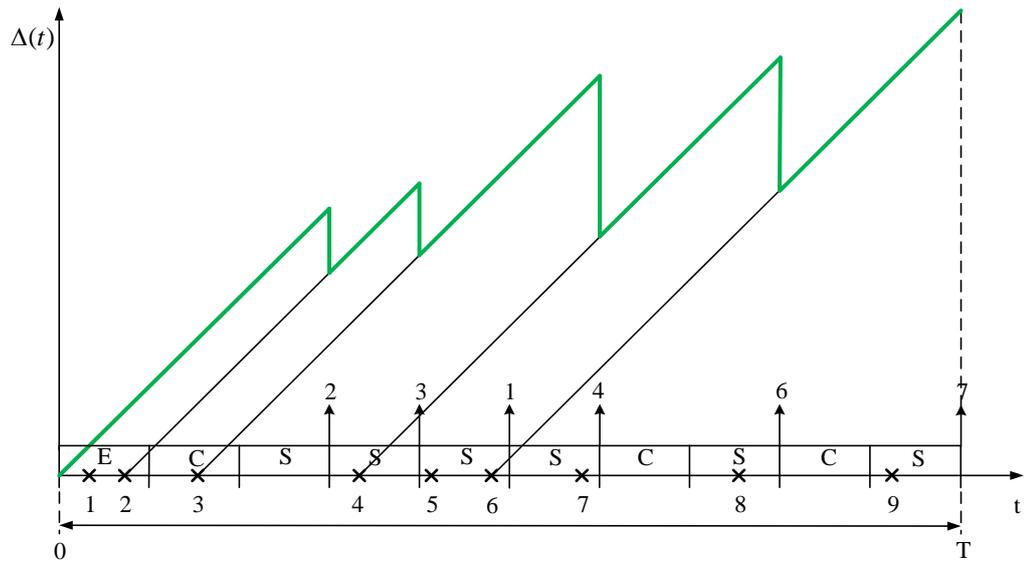


Рисунок 2.11 — Пример поведения возраста информации на интервале $[0, T]$ в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА

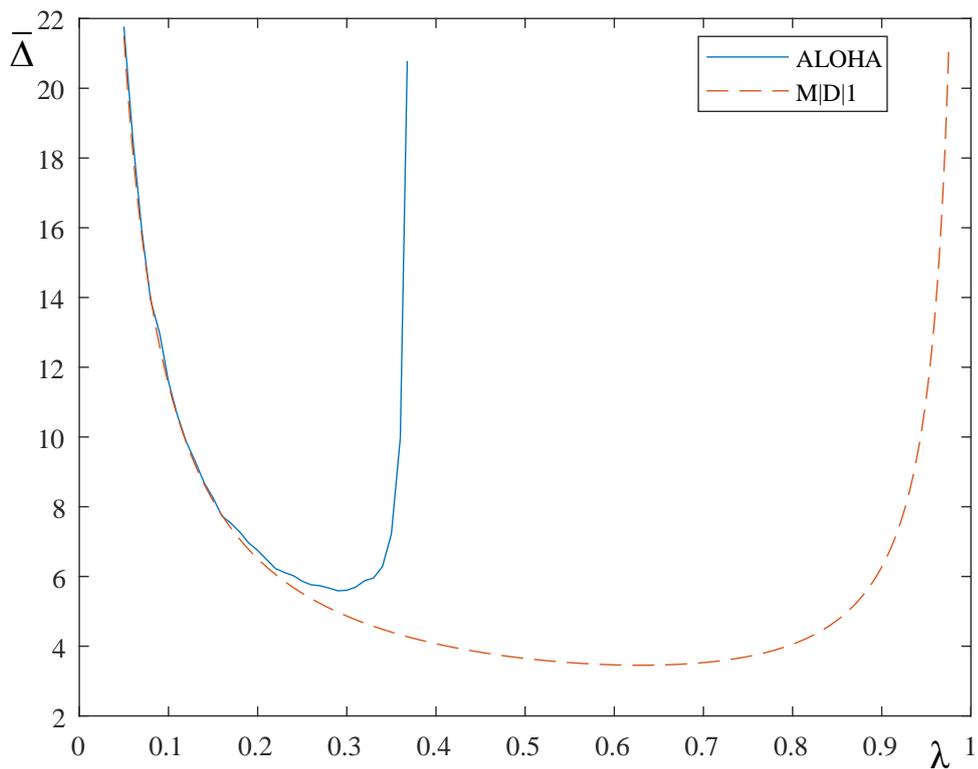


Рисунок 2.12 — Средний возраст информации от интенсивности входного потока в синхронной системе M|D|1 и в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА

Исследования устойчивости СМО и систем СМД с бесконечным количеством абонентов ведутся давно [2, 3]. Средней задержкой в таких системах называют время от момента появления сообщения в системе до момента его успешной передачи. Критической интенсивностью λ_c называют интенсивность появления абонентов в системе, до которой система способна работать устойчиво, т.е. до которой средняя задержка в системе конечна. Данное определение можно записать математически: $\lambda_c \triangleq \{\lambda : \bar{D}(\lambda) < \infty\}$. Известно, что в системе M|D|1 $\lambda_c = 1$, а в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА, $\lambda_c = e^{-1}$. Поэтому на рисунке 2.12 представлены значения функции $\bar{D}(\lambda)$ при $\lambda \in [0.05, 0.975]$ для синхронной системы M|D|1 и при $\lambda \in [0.05, 0.3678]$ для системы СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА. Заметим, что в обеих системах средний возраст информации конечен при $\lambda \in (0, \lambda_c)$ и не имеет предела при $\lambda = 0$ и $\lambda = \lambda_c$.

2.8 Оценка среднего возраста информации в системе с множественным выходом

В системе с множественным выходом, как и в других системах СМД, часто происходят конфликты, поэтому сообщения, которые были успешно переданы позже поступивших после них сообщений, в расчете среднего возраста информации не участвуют. Кроме того, в случае группового выхода абонентов из системы, принимается в расчет всего одно сообщение – то, которое поступило в систему позже всех. Поведение возраста информации на интервале $[0, T]$ в системе с множественным выходом проиллюстрировано на рисунке 2.13.

Путем имитационного моделирования были получены графики $\bar{D}(\lambda)$ для системы с множественным выходом при следующих значениях ε : $\varepsilon = 0.005$, $\varepsilon = 0.01$ и $\varepsilon = 0.02$, а так же график $\bar{D}(\lambda)$ для системы СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА. Данные графики приведены на рисунке 2.14. Моделирование длилось миллион окон. Представленные результаты подтверждают, что средняя задержка конечна при $\lambda \in [0, e^{-1})$ в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА, и конечна в системе с множественным выходом независимо от значений λ .

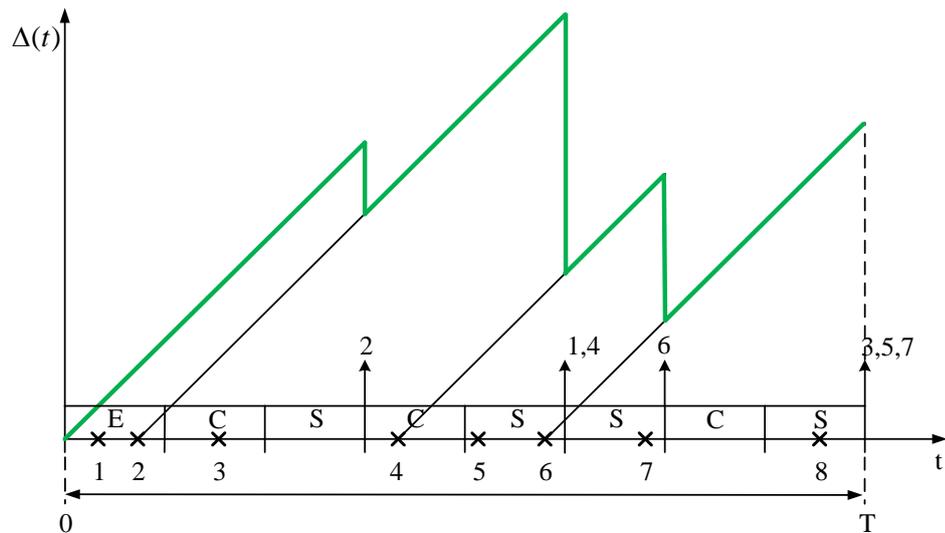


Рисунок 2.13 — Пример поведения возраста информации на интервале $[0, T]$ в системе с множественным выходом

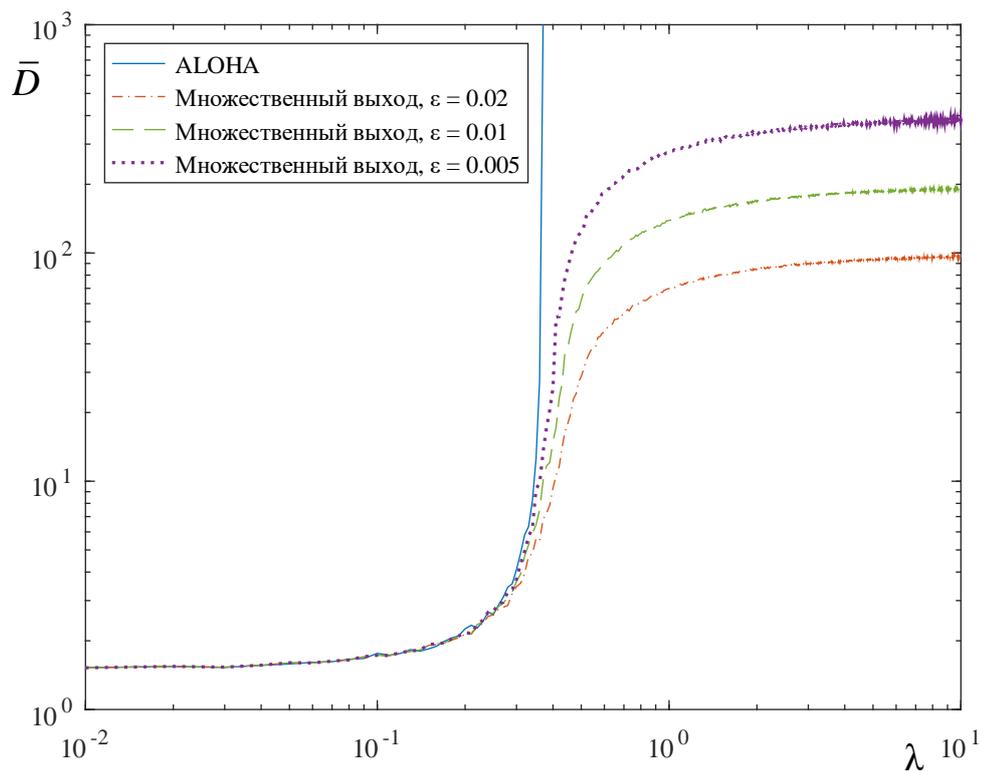


Рисунок 2.14 — Средняя задержка от интенсивности входного потока в системе с множественным выходом и в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных ALOHA

При тех же параметрах моделирования систем получены графики $\bar{\Delta}(\lambda)$ (рисунок 2.15). В системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА, $\bar{\Delta} < \infty$ при $\lambda \in (0, e^{-1})$. В системе с множественным выходом $\bar{\Delta} < \infty$ при $\lambda > 0$.

Заметим, что средняя задержка представляет собой монотонно возрастающую функцию, а средний возраст информации такой функцией не является.

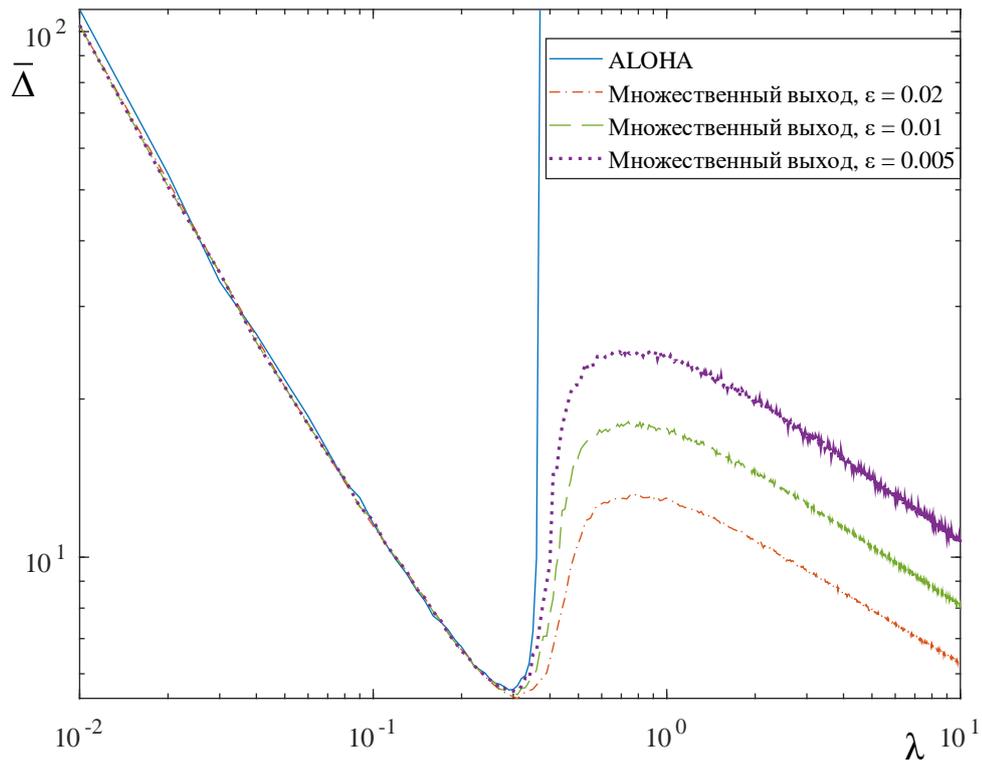


Рисунок 2.15 — Средний возраст информации от интенсивности входного потока в системе с множественным выходом и в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА

Для визуального сравнения данных двух показателей в обеих системах графики $\bar{D}(\lambda)$ и $\bar{\Delta}(\lambda)$ представлены на одном рисунке (рисунок 2.16). Для системы с множественным выходом на рисунке 2.16 приведены графики только при $\varepsilon = 0.01$. Опишем особенности поведения обоих показателей на качественном уровне в каждой из систем.

В системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА, при малых значениях λ сообщения в системе появляются редко, поэтому средняя задержка имеет низкие значения, а средний возраст наоборот – высокие. С увеличением значений λ сообщения появляются чаще, поэтому средний возраст информации убывает, но и конфликтов в системе становится больше, поэтому

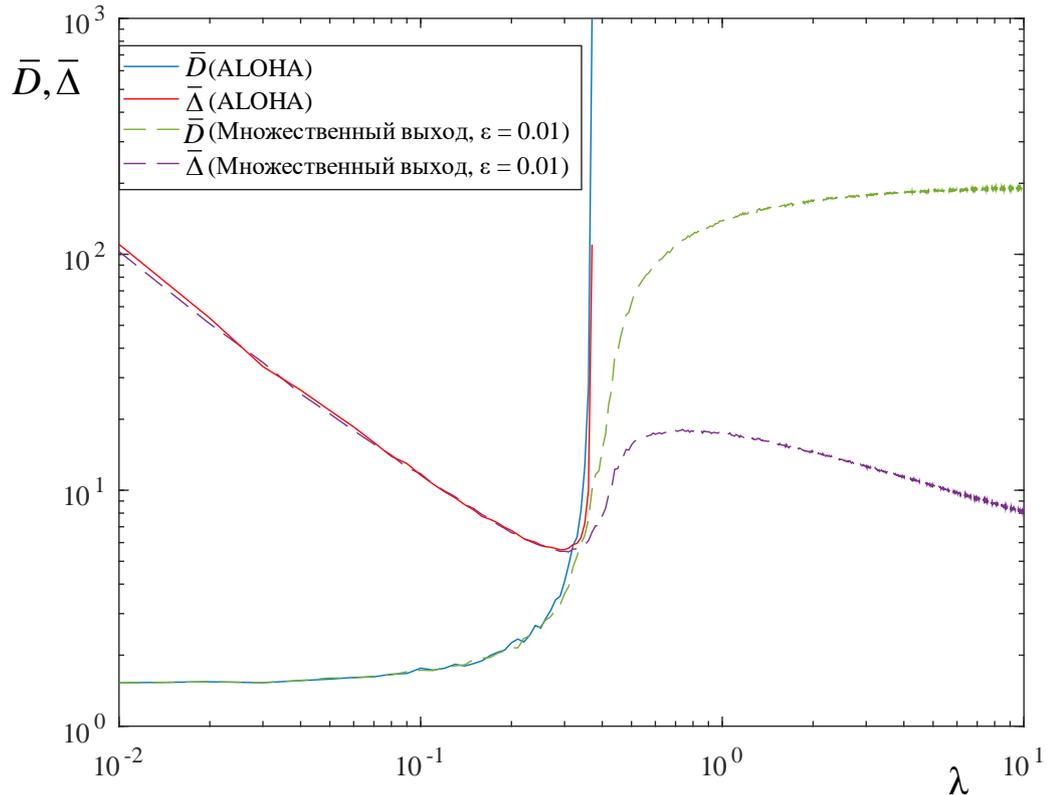


Рисунок 2.16 — Сравнение зависимостей средней задержки и среднего возраста информации от интенсивности входного потока

средняя задержка начинает расти. При интенсивности входного потока равной критической сообщения перестают покидать систему из-за огромного числа конфликтов. В этом случае оба показателя не имеют предела.

В системе с множественным выходом при малых значениях λ характер поведения обоих показателей такой же, как и в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА. При увеличении значений λ средняя задержка сначала сильно увеличивается вследствие повышения частоты конфликтов, но затем перестает меняться вследствие увеличения числа абонентов, покидающих систему. С ростом значений λ средний возраст информации сначала тоже сильно повышается по причине увеличения интервала времени между выходами абонентов из системы, но затем он убывает по причине увеличения числа выходящих из системы абонентов.

Стоит отметить, что независимо от системы при малых значениях λ средний возраст информации выше средней задержки, а при больших значениях λ — ниже.

2.9 Выводы по разделу

В данном разделе рассмотрена модель системы с неограниченным числом пользователей и множественным выходом пользователей из системы. В случае успешной передачи данных от одного из пользователей систему покидает данный пользователь и все близкорасположенные к нему пользователи. Для передачи данных между пользователями и базовой станцией используется случайный доступ без идентификации источника. Идентификация пользователя происходит по координатам его местоположения.

Введены две вспомогательные модели, для которых выдвинуты две гипотезы. Справедливость этих гипотез обоснована результатами имитационного моделирования. На основе одной из выдвинутых гипотез, предложены методы расчета верхней оценки для средней задержки, один из них позволяет получить замкнутое выражение для верхней оценки средней задержки, а второй – верхнюю оценку средней задержки с требуемой точностью.

Кроме того, в данном разделе была рассмотрена модель системы с множественным выходом, в которой абоненты передают сообщения по алгоритму «Адаптивная синхронная Алоха». Результаты моделирования этой модели показали, что значения средней задержки практически не отличаются от значений в исходной системе.

Впервые для системы с множественным выходом предложен способ определения среднего возраста информации и исследована его зависимость от интенсивности входного потока. Показано, что в данной системе он конечен при любой интенсивности входного потока, не равной нулю.

Результаты, полученные в данном разделе, можно обобщить на поверхность сферы и на поверхности другой размерности.

3 ОЦЕНКА СРЕДНЕГО ЧИСЛА УСПЕШНО ПЕРЕДАННЫХ СООБЩЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИ С ПОЯВЛЕНИЕМ СОБЫТИЙ

3.1 Вводные замечания по разделу

В данном разделе предлагается модель системы мониторинга появления случайных событий. Эта модель является моделью с появлением событий и может быть описана общей системой допущений, представленной в подразделе 1.3. Но для удобства изложения материала в данном разделе снова приводится описание модели с помощью системы допущений.

Вводится показатель качества работы систем мониторинга – среднее число успешно переданных сообщений об одном событии. Выводится формула для оценки данного показателя. Разрабатывается методика выбора количества сенсоров, обеспечивающего требуемое качество работы системы. В отличие от ранее известных, в данной методике не используется имитационное моделирование.

Также в данном разделе показан способ построения верхней оценки для другого показателя качества работы систем мониторинга – вероятности доставки информации о событии.

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работах [84–86]. Программа, с помощью которой получены результаты данного раздела, зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ [87].

3.2 Модель системы с появлением событий

Схематичное представление модели с появлением событий проиллюстрировано на рисунке 3.1. Приведем ряд допущений, которыми можно описать данную модель.

1. Передача данных между сенсорами и базовой станцией осуществляется по радиоканалу. Базовая станция способна принимать данные только от тех сенсоров, которые располагаются в её зоне действия. Пусть в зоне

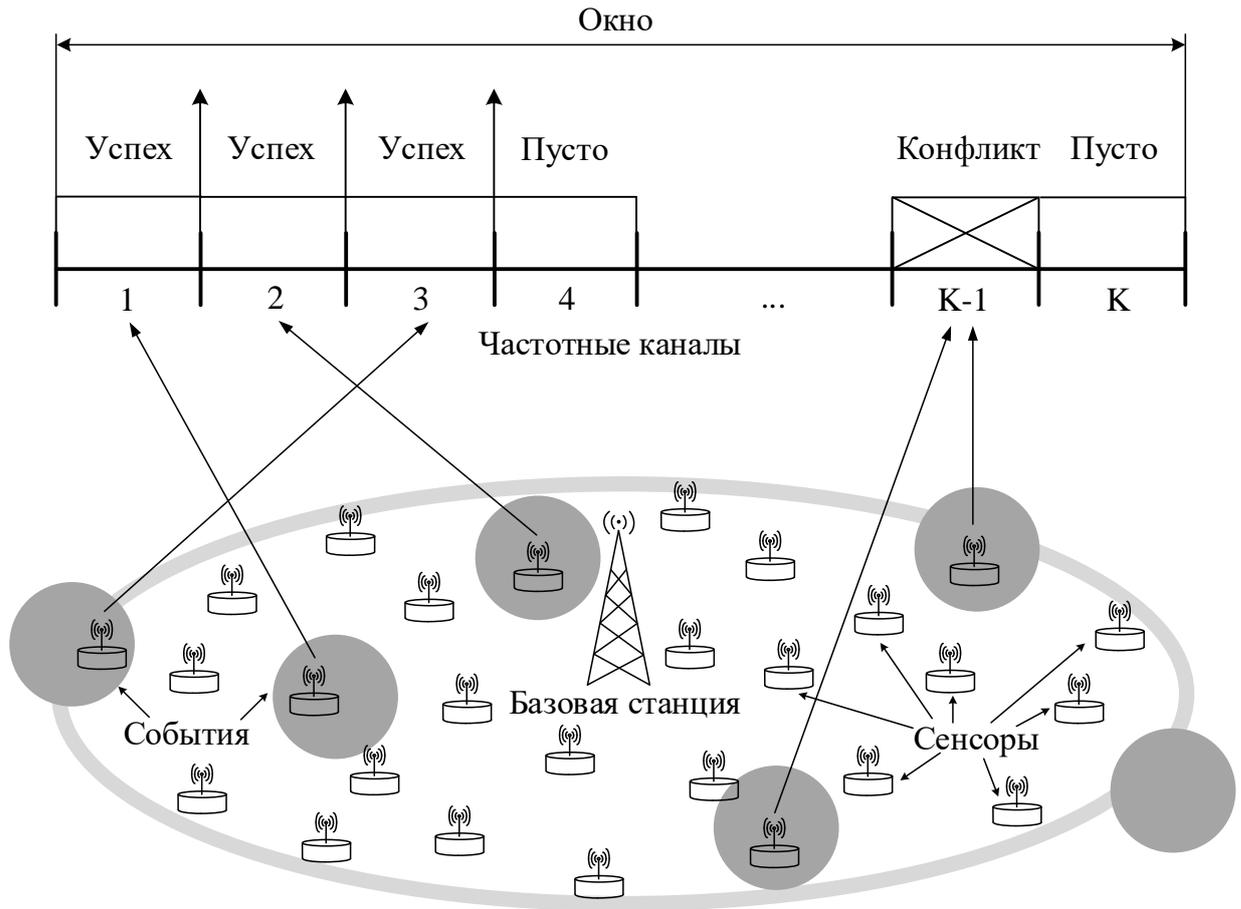


Рисунок 3.1 — Схематичное представление модели с появлением событий

действия базовой станции находится N сенсоров. Они распределены равномерно, случайно и независимо друг от друга.

2. Время в системе мониторинга разбито на одинаковые по продолжительности периоды времени, которые принято называть окнами. Под продолжительностью окна понимается интервал времени, в течение которого сенсор анализирует окружающую обстановку и передает данные на базовую станцию при обнаружении событий. Предполагается, что событие, появившееся в текущем окне, в следующем окне уже не детектируется.
3. Допускается, что событие имеет форму круга радиуса r , центром которого является точка с координатами места его появления. Считается, что событие будет замечено сенсором, если он находится на расстоянии, не превышающим r , от места появления события. Процесс появления событий задается пространственным точечным пуассоновским процессом с параметром λ . Из этого следует, что количество событий, появившихся в течение одного окна на единице площади, имеет распределение

Пуассона, а точки, в которых появились события, распределены по равномерному закону.

4. Для передачи данных выделено K частотных каналов. В каждом канале возможны следующие ситуации: «успех» - данные отправил один сенсор; «пусто» - ни один сенсор не отправлял данные; «конфликт» - данные отправили несколько сенсоров.
5. Активными считаются сенсоры, которые заметили хотя бы одно событие (рисунок 3.2). Каждый из них случайно выбирает номер канала для отправки данных о замеченных событиях. Данные о событиях отправляются в том же окне, в котором они были замечены.

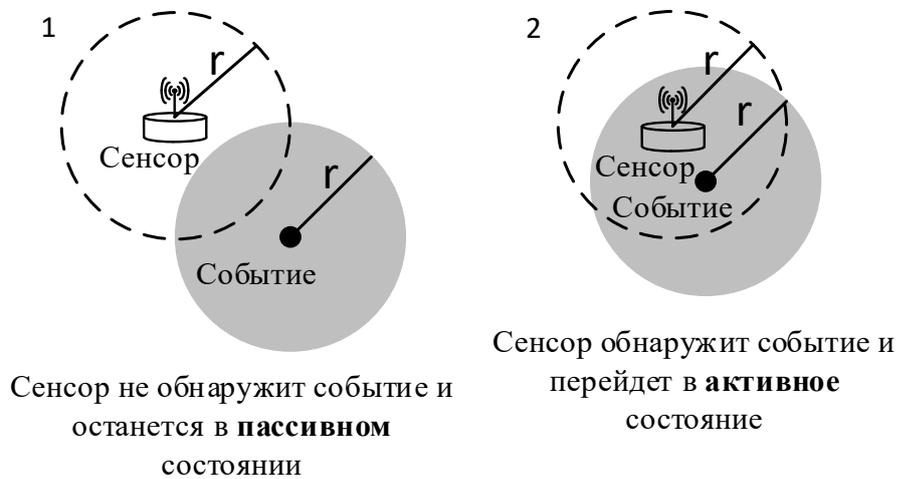


Рисунок 3.2 — Примеры различных состояний сенсора

3.3 Среднее число успешно переданных сообщений об одном событии

В системах мониторинга случайных событий среднее число успешно переданных сообщений в окне об одном событии можно рассматривать как показатель качества работы таких систем. Обозначим этот показатель через $T(N)$ и вычислим его значение, как отношение

$$T(N) = \frac{M(N)}{\Lambda}, \quad (3.1)$$

где $M(N)$ – среднее число успешно переданных сообщений в окне при условии, что в системе имеется N активных сенсоров, а Λ – среднее число событий, которые появились в зоне действия базовой станции или рядом с ней. Обозначим через S_{ev} – площадь области, на которой могут появиться события, распространяющиеся на зону действия базовой станции. Тогда под Λ будем понимать: $\Lambda = \lambda S_{ev}$. Количество сенсоров, при котором данный показатель примет наибольшее значение, будет обеспечивать наилучшее качество работы системы мониторинга, следовательно, его можно считать оптимальным для таких систем.

Покажем, как можно получить значение данного показателя. Примем за N_{tr} – количество активных сенсоров в окне t и введем случайные величины, определяемые по формуле

$$I_k = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-ом канале был «успех»} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, k = \overline{1, K}.$$

Обозначим через $\Pr \{N_{tr} = i|n\}$ – вероятность того, что в окне t решили отправлять сообщения i сенсоров при условии, что в нем возникло n событий. Тогда вероятность того, что в первом канале успешно отправится сообщение, если в окне t возникло n событий, можно найти как

$$\Pr \{I_1 = 1|n\} = \sum_{i=1}^N \Pr \{N_{tr} = i|n\} i \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{i-1}. \quad (3.2)$$

Вероятность того, что в первом канале успешно отправится сообщение, будет иметь следующий вид:

$$\Pr \{I_1 = 1\} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Lambda^n}{n!} e^{-\Lambda} \Pr \{I_1 = 1|n\}. \quad (3.3)$$

Здесь $\frac{\Lambda^n}{n!} e^{-\Lambda}$ – вероятность того, что в окне t возникло n событий. Подставив 3.2 в 3.3, получим

$$\Pr \{I_1 = 1\} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Lambda^n}{n!} e^{-\Lambda} \sum_{i=1}^N \Pr \{N_{tr} = i|n\} i \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{i-1}. \quad (3.4)$$

В текущем окне вероятности «успеха» во всех каналах одинаковы, т.е.

$$\Pr \{I_1 = 1\} = \Pr \{I_2 = 1\} = \Pr \{I_3 = 1\} = \dots = \Pr \{I_K = 1\}.$$

Поэтому среднее число успешно переданных сообщений в окне можно вычислить следующим образом:

$$M(N) = E \left[\sum_{k=1}^K I_k \right] = KE [I_k] = K \Pr \{I_k = 1\}. \quad (3.5)$$

Используя формулы 3.1, 3.4 и 3.5, выпишем итоговое выражение для $T(N)$:

$$T(N) = \frac{K \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Lambda^n}{n!} e^{-\Lambda} \sum_{i=1}^N \Pr \{N_{tr} = i|n\} i \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{i-1} \right)}{\Lambda}. \quad (3.6)$$

Выбор оптимального количества сенсоров по данному показателю равносильно поиску N , максимизирующего $T(N)$. Чтобы получить значение данного показателя, используя выражение 3.6, необходимо знать распределение N_{tr} при условии, что в окне t возникло n событий. Поэтому решение задачи вычисления точного значения $T(N)$ на данный момент отсутствует [88]. В следующих подразделах будет показано, как можно получить оценку $T(N)$, которая позволит выбирать близкое к оптимальному количество сенсоров в таких системах.

3.4 Оценка среднего числа успешно переданных сообщений об одном событии

Введем в рассмотрение величину $\varphi(n)$, определяемую формулой

$$\varphi(n) = \frac{S(n)}{S},$$

в которой S – площадь зоны действия базовой станции, а $S(n)$ – площадь области, на которой бы располагались активные сенсоры при n событиях.

Задача вычисления $\varphi(n)$ является частным случаем задачи из работы [88], в которой имеется плоская выпуклая фигура K_0 и n плоских выпуклых фигур $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$. Эти фигуры имеют одинаковые площади и периметры. Они случайно раскиданы на плоскости и пересекают фигуру K_0 . На эту же плоскость в область фигуры K_0 случайным образом бросается точка P . В работе [88] описан подход для расчета вероятности попадания точки P в область фигуры K_0 , которая пересекается с фигурами K_2, K_3, \dots, K_n .

В модели, описанной в подразделе 3.2, в качестве фигуры K_0 будем рассматривать зону действия базовой станции, в качестве фигур $K_i, i = \overline{1, n}$, – области распространения событий, в качестве точки P – точку, в которой находится сенсор. Будем искать вероятность попадания сенсора в зону действия базовой станции, затронутую n событиями, т.е. функцию $\varphi(n)$. Иллюстрация данной задачи при $n = 7$ представлена на рисунке 3.3. Заштрихованная область на рисунке 3.3 – $S(n)$.

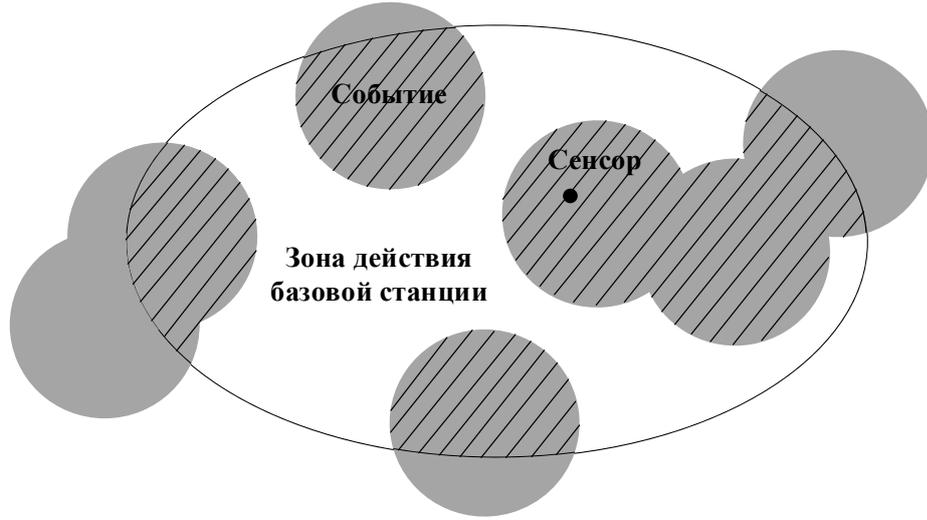


Рисунок 3.3 – Пример области, на которой бы располагались активные сенсоры при $n = 7$

Обозначим через L – периметр зоны действия базовой станции, а через s и l – площадь и периметр зоны действия базовой станции, затрагиваемой событием. Тогда, используя подход, описанный в [88], можно вычислить значение функции $\varphi(n)$ для нашей модели

$$\varphi(n) = \frac{S(N)}{S} = 1 - \left(\frac{2\pi S + lL}{2\pi(s + S) + lL} \right)^n, \quad (3.7)$$

События в нашей модели затрагивают область в форме круга, поэтому площадь и периметр этой области равны соответственно

$$s = \pi r^2 \quad \text{и} \quad l = 2\pi r. \quad (3.8)$$

Подставив формулы (3.8), в выражение (3.7) получим

$$\varphi(n) = 1 - \left(\frac{S + rL}{\pi r^2 + S + rL} \right)^n, \quad (3.9)$$

Рассмотрим примеры вычисления функции $\varphi(n)$ для зон действия базовой станции, характерных для большинства сетей LoRaWAN. При анализе таких систем самыми распространенными формами зон действия базовой станции являются круг (базовая станция находится на открытой местности) и квадрат или прямоугольник (базовая станция находится в городе).

Для круга радиуса R площадь и периметр будут вычисляться по следующим формулам:

$$S = \pi R^2 \quad \text{и} \quad L = 2\pi R. \quad (3.10)$$

Рассмотрим $R = 1$ и подставим формулы (3.10) в выражение (3.7), тогда функция $\varphi(n)$ примет следующий вид:

$$\varphi_{circle}(n) = 1 - \left(\frac{2r + 1}{r^2 + 2r + 1} \right)^n, \quad (3.11)$$

Для квадрата со стороной a площадь и периметр равны

$$S = a^2 \quad \text{и} \quad L = 4a. \quad (3.12)$$

Подставив формулы (3.12) в выражение (3.7), получим

$$\varphi_{square}(n) = 1 - \left(\frac{a^2 + 4ar}{\pi r^2 + a^2 + 4ar} \right)^n,$$

С помощью выражения (3.9) можно найти $\varphi(n)$ для зоны действия базовой станции любой формы при условии, что она относится к плоским выпуклым фигурам. Вид функции $\varphi(n)$ для зоны действия базовой станции, которая представляет собой круг, проиллюстрирован на рисунке 3.4.

Вычислив $\varphi(n)$, можно найти $M[N_{tr}|n]$ как

$$M[N_{tr}|n] = \varphi(n)N. \quad (3.13)$$

Продemonстрируем, как получить оценку показателя $T(N)$, зная $M[N_{tr}|n]$. Для этого представим выражение (3.2) в другом виде:

$$\Pr\{I_1 = 1|n\} = M \left[N_{tr} \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K} \right)^{N_{tr}-1} \middle| n \right]. \quad (3.14)$$

Подставив (3.13) в (3.14), получим оценку вероятности «успеха» в первом канале, при условии, что возникло n событий,

$$\widehat{\Pr}\{I_1 = 1|n\} = \varphi(n)N \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K} \right)^{\varphi(n)N-1}. \quad (3.15)$$

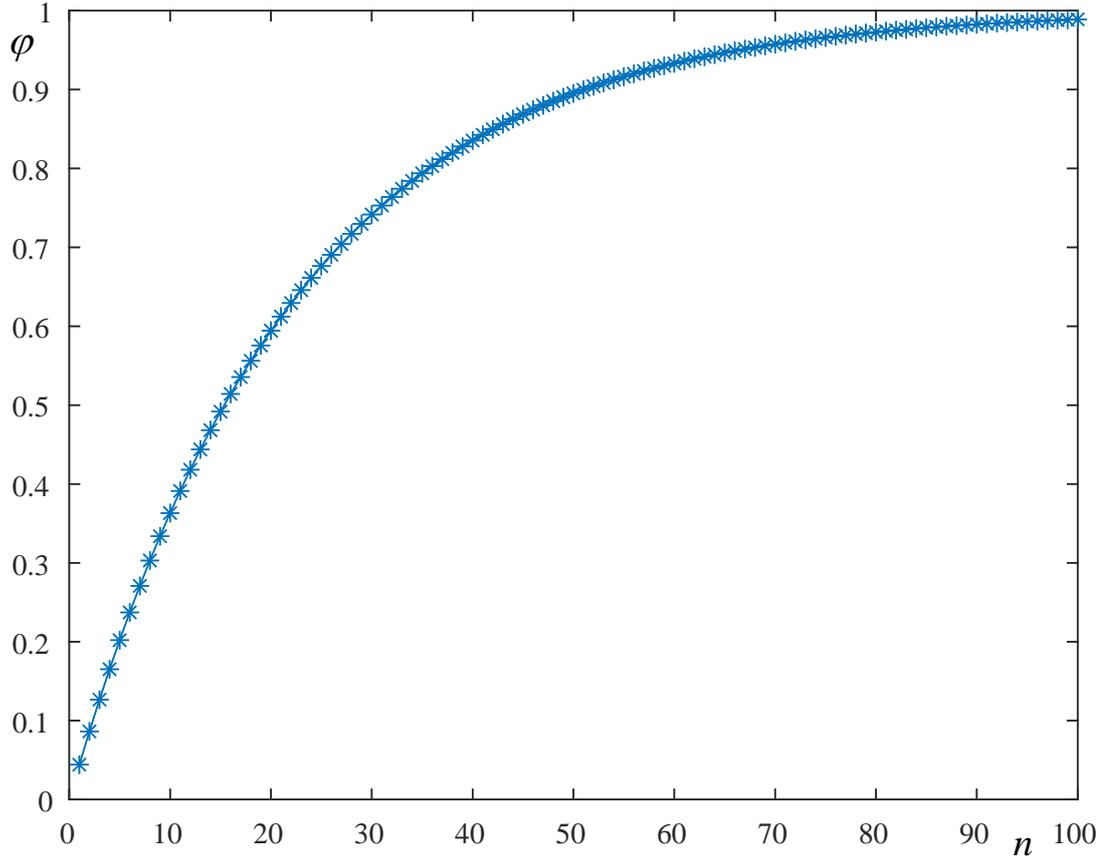


Рисунок 3.4 — Пример функции $\varphi(n)$ для зоны действия базовой станции, имеющей форму круга

Если величина N_{tr} принимает низкие/высокие значения, то оценка, полученная согласно выражению (3.15), будет верхней/нижней, т.к. в этом случае функция $N_{tr} \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{N_{tr}-1}$ выпукла вверх/вниз.

Заменяв $\Pr \{I_1 = 1|n\}$ на $\widehat{\Pr} \{I_1 = 1|n\}$ в выражении (3.3), получим оценку вероятности «успеха» в первом канале

$$\widehat{\Pr} \{I_1 = 1\} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Lambda^n}{n!} e^{-\Lambda} \varphi(n) N \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{\varphi(n)N-1}. \quad (3.16)$$

Подставив выражение (3.16) в (3.5), найдем $\widehat{M}(N)$, а подставив $\widehat{M}(N)$ в выражение (3.1), получим оценку показателя $T(N)$:

$$\widehat{T}(N) = \frac{K \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Lambda^n}{n!} e^{-\Lambda} \varphi(n) N \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{\varphi(n)N-1} \right)}{\Lambda} \quad (3.17)$$

Для определения близкого к оптимальному числа сенсоров в системе, необходимо найти максимум функции $\widehat{T}(N)$. К сожалению, данная оптимизационная задача не имеет замкнутого решения. Поэтому в следующем подразделе будет

продемонстрирован способ получения еще одной оценки данного показателя. Эта оценка имеет замкнутый вид, но является менее точной по сравнению с $\hat{T}(N)$.

3.5 Методика выбора числа сенсоров в системе с появлением событий

Замкнутое выражение оценки $T(N)$ можно получить, подставив $M[n] = \Lambda$ в (3.17),

$$\tilde{T}(N) = \frac{K \left(\varphi(\Lambda) N \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K} \right)^{\varphi(\Lambda) N - 1} \right)}{\Lambda} \quad (3.18)$$

На рисунке 3.5 представлены следующие графики: $T(N)$, $\hat{T}(N)$ и $\tilde{T}(N)$. График $T(N)$ получен путем имитационного моделирования, а графики $\hat{T}(N)$ и $\tilde{T}(N)$ получены в соответствии с выражениями (3.17) и (3.18). Все графики построены для системы, в которой зона действия базовой станции представляет собой круг с $R = 1$.

Результаты, приведенные на рисунке 3.5, показывают, что зависимости $T(N)$, $\hat{T}(N)$ и $\tilde{T}(N)$ принимают максимальное значение примерно в одной и той же точке. Это означает, что обе оценки могут быть использованы для получения близкого к оптимальному числа сенсоров в системе. Подчеркнем, что максимумы будут также близки, если зона действия базовой станции будет иной формы.

Максимальное значение оценки $\tilde{T}(N)$ достигается при условии

$$\varphi(\Lambda) N \left(\frac{1}{K} \right) = 1.$$

Исходя из данного условия, можно найти количество сенсоров, при котором оценка $\tilde{T}(N)$ принимает максимальное значение,

$$\tilde{N}_{opt} = \frac{K}{\varphi(\Lambda)}. \quad (3.19)$$

Отметим, что \tilde{N}_{opt} не является оптимальным числом сенсоров, но находится близко к оптимальному. Оптимальным будет число сенсоров, при котором точное значение $T(N)$ максимально.

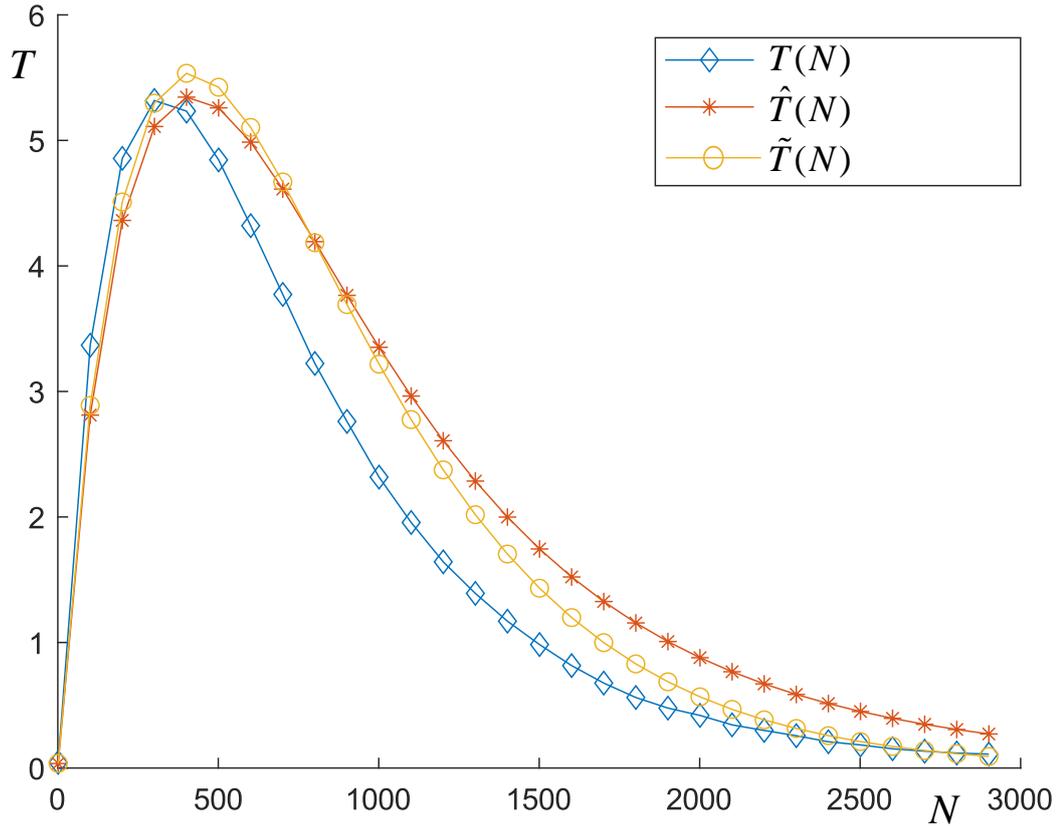


Рисунок 3.5 — Зависимости точного значения показателя $T(N)$ и его оценок $\hat{T}(N)$ и $\tilde{T}(N)$ от количества сенсоров при $\Lambda = 10$

На основе вышеизложенного сформируем методику определения близкого к оптимальному количества сенсоров в системе, состоящую из трех этапов.

1. Установить значения параметров модели r , Λ и K . Определить форму зоны действия базовой станции.
2. Рассчитать $\varphi(\Lambda)$ в соответствии с формой зоны действия базовой станции и радиусом области распространения события.
3. Если не задано пороговое значение показателя качества работы системы, то найти число сенсоров \tilde{N}_{opt} как

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

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

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

Эту методику можно использовать для систем мониторинга случайных событий, если форма зоны действия базовой станции принадлежит множеству плоских выпуклых фигур.

На рисунке 3.6 представлены графики $\tilde{T}(N)$ при нескольких значениях Λ ($\Lambda = 0.5$, $\Lambda = 1$, $\Lambda = 2$, $\Lambda = 5$ и $\Lambda = 10$). Графики построены для модели, в которой зона действия базовой станции представляет собой круг с $R = 1$, а $r = 0.15\sqrt{\pi}$ и $K = 150$ взяты как в работе [69].

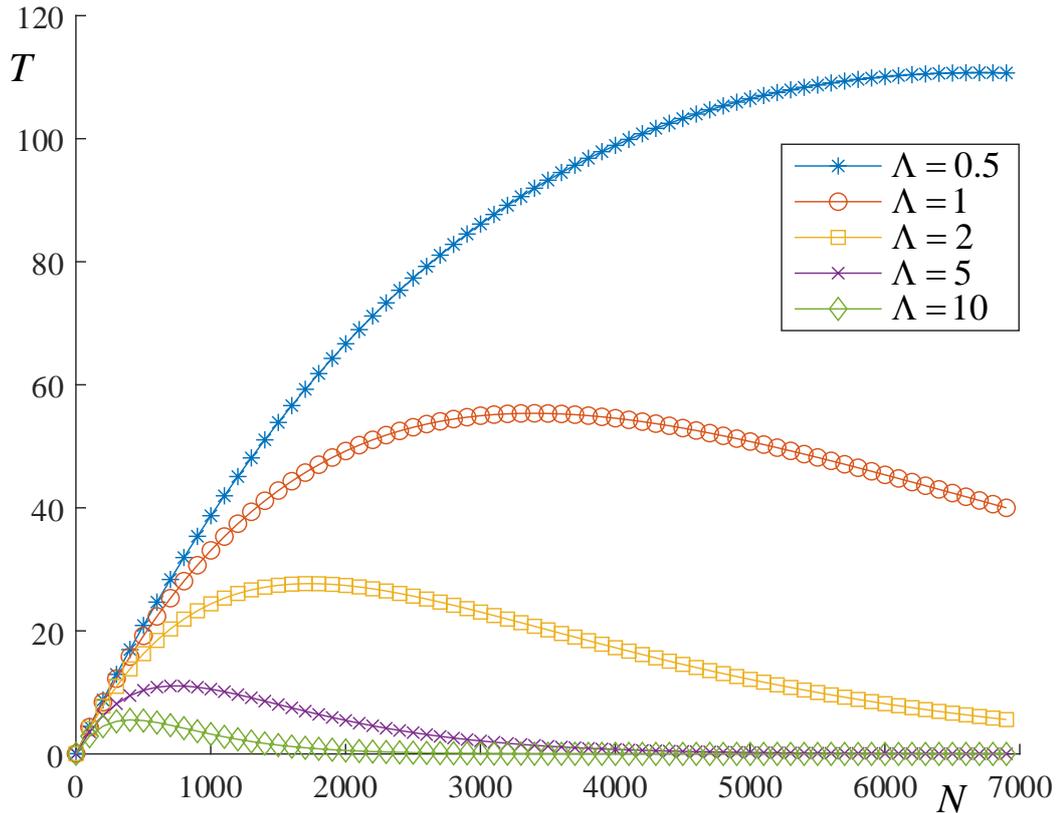


Рисунок 3.6 — Зависимости $\tilde{T}(N)$ при различных значениях Λ

Можно заметить, что чем ниже среднее число событий Λ , тем выше \tilde{N}_{opt} (рисунок 3.6). \tilde{N}_{opt} получается очень большим при низких значениях Λ . Следовательно, целесообразно вычислять \tilde{N}_{opt} для максимально возможного значения Λ в системе. В этом случае сенсоров будет хватать для обнаружения событий при меньших значениях Λ . На рисунке 3.7 приведены зависимости $\tilde{T}(N)$ при двух значениях \tilde{N}_{opt} ($\tilde{N}_{opt} = 6725$ для $\Lambda = 0.5$ и $\tilde{N}_{opt} = 413$ для $\Lambda = 10$).

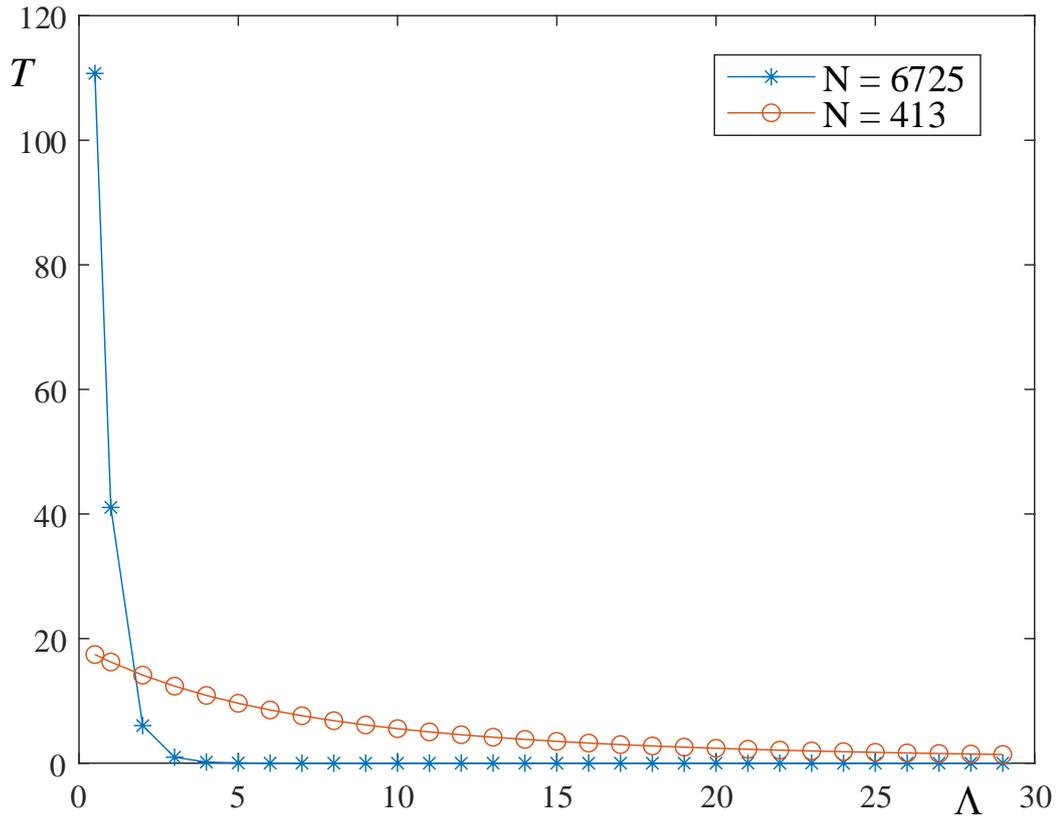


Рисунок 3.7 — Зависимости $\tilde{T}(\Lambda)$ при фиксированных значениях \tilde{N}_{opt}

3.6 Верхняя оценка вероятности доставки информации о событии

Среднее число успешно переданных сообщений в окне отражает качество работы систем с зависимыми источниками, если вся зона действия базовой станции оказывается под контролем сенсоров. Однако в некоторых системах может остаться область, не охваченная сенсорами. Событие, возникшее в такой области, не будет обнаружено, а информация о нем не поступит на базовую станцию. Среднее число успешно переданных сообщений в окне не учитывает потерю информации о событиях, возникших в области, неохваченной сенсорами.

Таким образом, необходимо найти другой показатель качества работы таких систем, с помощью которого можно будет отслеживать получение базовой станцией информации обо всех событиях, произошедших в системе. В качестве показателя, удовлетворяющего вышеописанным требованиям, можно рассмотреть вероятность доставки информации о событии P . Данный показа-

тель рассчитывается следующим образом:

$$P(N) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{m(t)}{n(t)}, \quad (3.20)$$

где t – период наблюдения за системой мониторинга, $m(t)$ – количество событий, о которых были получены данные за период наблюдения t , $n(t)$ – количество событий, произошедших за период наблюдения t .

Для модели, описанной в подразделе 3.2, данный показатель можно оценить путем имитационного моделирования, построенного в соответствии со следующим порядком действий:

1. Определить форму и размеры зоны действия базовой станции. Задать период наблюдения за системой t . Зафиксировать: количество сенсоров в системе N , количество каналов для передачи данных K и частоту возникновения событий λ .
2. Для каждого из N сенсоров сгенерировать координаты из местоположений внутри зоны действия базовой станции.
3. Выполнять следующие действия в каждом окне.
 - а) Определить количество событий, возникших в текущем окне в соответствии с пространственным точечным пуассоновским процессом. Для каждого события сгенерировать координаты места возникновения с учетом краевых эффектов.
 - б) Выявить сенсоры, которые обнаружили события, измерив евклидово расстояние между координатами их местоположений. Пометить эти сенсоры, как передающие в текущем окне.
 - в) Для каждого из передающих сенсоров определить случайным образом номер частотного канала для передачи данных.
 - г) Выявить номера каналов, в которых произошла ситуация «успех», и вычислить количество событий, о которых были отправлены данные на базовую станцию. Если один сенсор отправил данные о нескольких событиях, то необходимо посчитать каждое из них. Если в одном окне разные сенсоры отправили данные об одном и том же событии, то необходимо посчитать его только один раз.
4. Рассчитать $m(t)$ и $n(t)$. Найти значение $P(N)$, используя выражение (3.20).

Имитационное моделирование позволяет найти вероятность доставки информации о событии, но требует большого количества экспериментов для получения достаточно точного значения. Поэтому задача вычисления этого показателя аналитическим путем является важной. Однако вычисление вероятности доставки информации о событии для модели, описанной в подразделе 3.2 – сложная задача, так как сенсоры расположены случайным образом в зоне действия базовой станции и имеют форму круга. Поэтому рассмотрим упрощенную модель системы с появлением событий, которую можно описать теми же допущениями, что и модель из подраздела 3.2, за исключением некоторых изменений.

1. Предположим, что событие представляет собой квадрат, сторона которого равняется a .
2. В качестве зоны действия базовой станции будем рассматривать квадрат, сторона которого равняется A , при этом $A \gg a$.
3. Будем считать, что местоположения сенсоров в системе постоянны. Расстояние между любыми двумя соседними устройствами одинаково, как показано на рисунке 3.8.

Будем называть данную модель – моделью с «квадратными» событиями и постоянным расположением сенсоров.

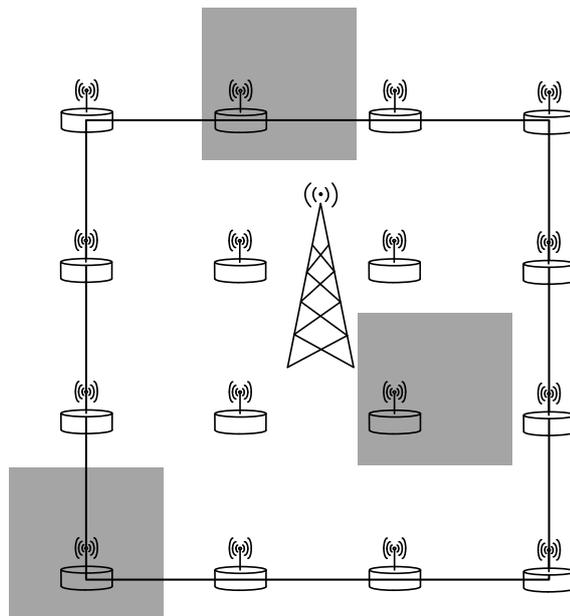


Рисунок 3.8 — Схематичное представление модели с «квадратными» событиями и постоянным расположением сенсоров

Покажем, как можно вычислить вероятность доставки информации о событии для модели с «квадратными» событиями и постоянным расположением сенсоров. Введем в рассмотрение две случайные величины I_s и I_d , которые могут принимать только два значения 0 или 1:

$$I_s = \begin{cases} 1, & \text{если событие обнаружено хотя бы одним сенсором;} \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad (3.21)$$

$$I_d = \begin{cases} 1, & \text{если данные о событии успешно получены базовой станцией;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3.22)$$

Вероятность доставки информации о событии можно вычислить как произведение двух вероятностей

$$P(N) = Pr \{I_s = 1\} \cdot Pr \{I_d = 1 | I_s = 1\}. \quad (3.23)$$

Вероятность, что событие обнаружено хотя бы одним сенсором, можно найти следующим образом:

$$Pr \{I_s = 1\} = \min \left(1, \frac{Na^2}{(A+a)^2} \right). \quad (3.24)$$

Вероятность, что данные о событии были получены базовой станцией при условии, что оно обнаружено хотя бы одним сенсором, можно получить как

$$Pr \{I_d = 1 | I_s = 1\} = \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda a^2 / (A+a)^2}}{K} \right)^{N-1}. \quad (3.25)$$

Подставив (3.24) и (3.25) в (3.23), получим формулу для вероятности доставки информации о событии

$$P(N) = \min \left(1, \frac{Na^2}{(A+a)^2} \right) \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda a^2 / (A+a)^2}}{K} \right)^{N-1}. \quad (3.26)$$

На рисунке 3.9 представлены графики $P(N)$ для модели с «квадратными» событиями и постоянным расположением сенсоров, один из которых получен путем имитационного моделирования, а другой - в соответствии с выражением (3.26).

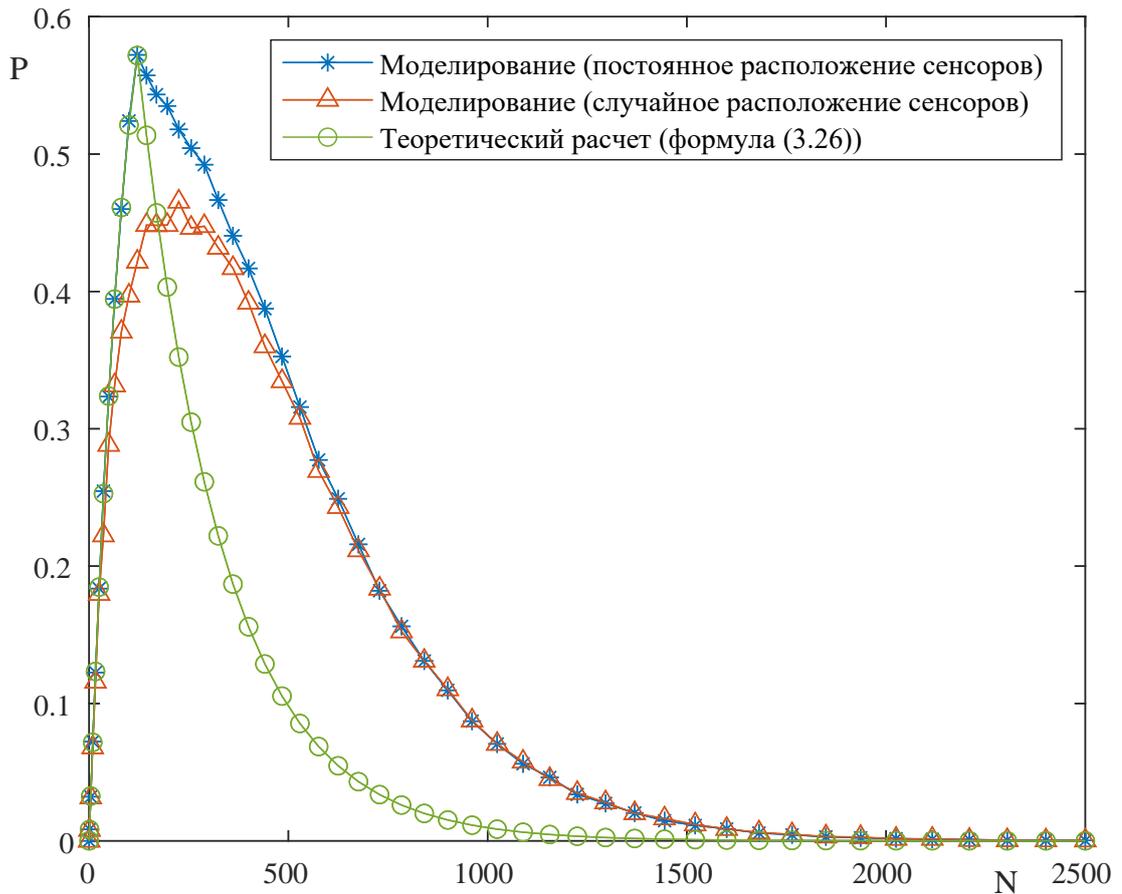


Рисунок 3.9 — Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров для модели с «квадратными» событиями

Эти графики были получены при следующих параметрах модели: $\lambda = 100$, $A = 100$, $a = 10$, $K = 121$. При постоянном расположении сенсоров вероятность доставки информации о событии максимальна при $N = 121$. В этом случае вся зона действия базовой станции оказывается под контролем сенсоров и, при этом их области действия не пересекаются. Стоит отметить, что значение, рассчитанное по формуле (3.26) является точным значением $P(N)$ при $N \leq 121$ и достаточно грубой оценкой иначе. В случае, когда $N > 121$, области действия сенсоров будут пересекаться и одни те же события могут быть обнаружены разными сенсорами, что не учитывается в формуле (3.26). Однако для построения систем мониторинга случайных событий наибольший интерес представляет максимальное значение вероятности доставки информации о событии, так как оно позволяет определить оптимальное число сенсоров при заданных параметрах системы.

На рисунке 3.9 приведен ещё один график $P(N)$, полученный путем имитационного моделирования для модели с «квадратными событиями» и случайным расположением сенсоров (рисунок 3.10). Случайное расположение сенсоров означает, что координаты сенсоров являются случайными величинами, распределенными по равномерному закону внутри зоны действия базовой станции. Результаты моделирования показали, что оптимальное значение сенсоров в модели с постоянным расположением сенсоров является нижней оценкой оптимального значения сенсоров в модели со случайным расположением сенсоров.

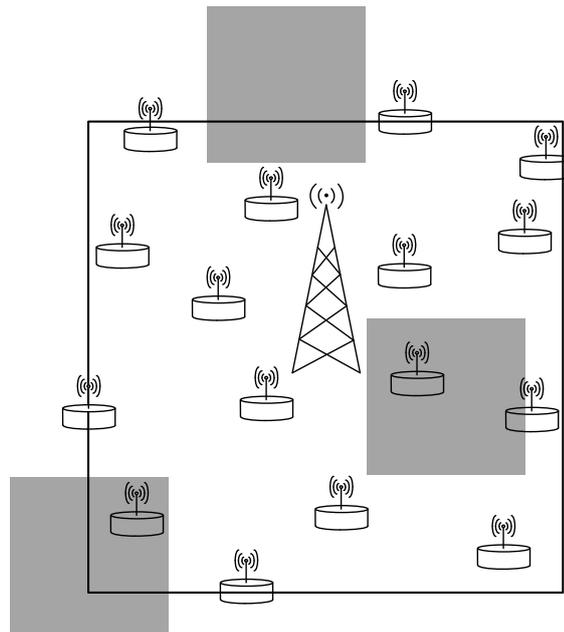


Рисунок 3.10 — Схематичное представление модели с «квадратными» событиями и случайным расположением сенсоров

Рассмотрим модель из подраздела 3.2 с зоной действия базовой станции в форме квадрата. Будем называть такую модель моделью с «круглыми» событиями. На рисунке 3.11 приведены два графика $P(N)$ для модели с «круглыми» событиями при $r = a/2$, одна из которых получена для постоянного расположения сенсоров, а другая - для случайного. На рисунке 3.12 приведены аналогичные зависимости, полученные при $r = \sqrt{a^2/\pi}$. Данные зависимости были получены с помощью имитационного моделирования при тех же параметрах, что и зависимости на рисунке 3.9: $\lambda = 100$, $A = 100$, $a = 10$, $K = 121$.

При $r = \sqrt{a^2/\pi}$ области распространения событий в модели с «круглыми» событиями и в модели с «квадратными» событиями равны по площади,

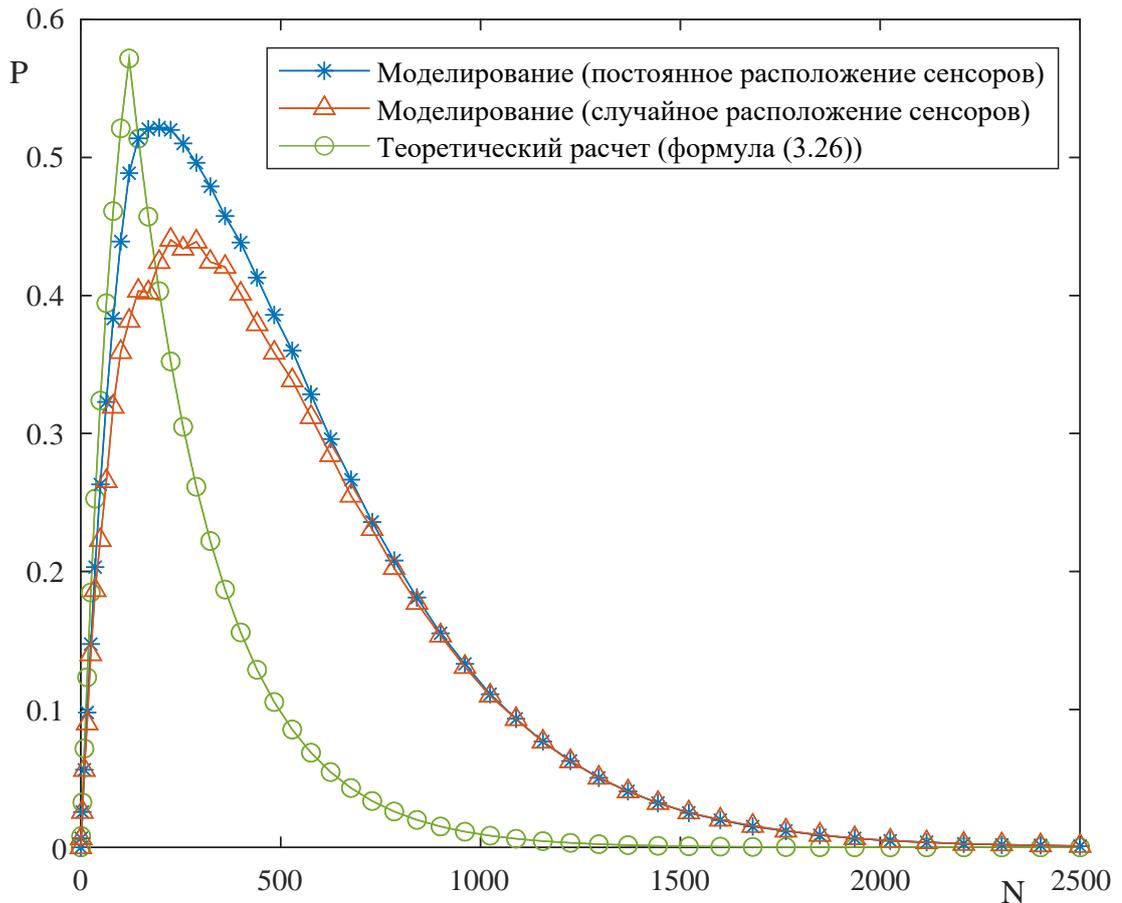


Рисунок 3.11 — Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров для модели с «круглыми» событиями при $r = a/2$

но пересекаются друг с другом. При $r = a/2$ области распространения событий в модели с «круглыми» событиями меньше по площади, чем в модели с «квадратными» событиями, но не имеют пересечений друг с другом. Полученные результаты показали, что значение вероятности доставки информации о событии в модели с «квадратными» событиями и постоянным расположением сенсоров является верхней оценкой вероятности доставки информации о событии для модели с «круглыми» событиями, при этом более близкой при $r = \sqrt{a^2/\pi}$.

Таким образом, используя выражение вероятности доставки информации о событии (3.26), можно получить близкое к оптимальному число сенсоров в системе для различных моделей с появлением событий.

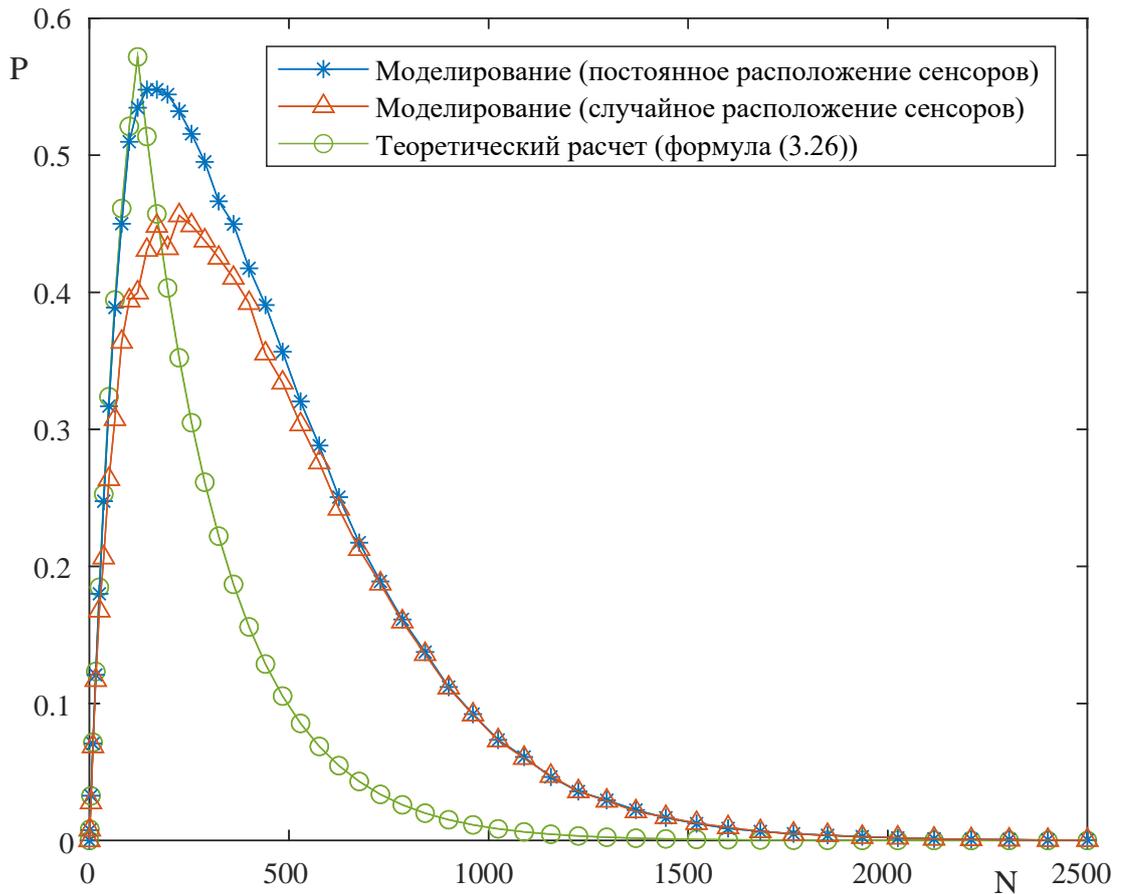


Рисунок 3.12 — Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров для модели с «круглыми» событиями при $r = \sqrt{a^2/\pi}$

3.7 Учет краевых эффектов при использовании модели с появлением событий

В системе с появлением событий, описанной в подразделе 3.2, механизм возникновения событий определяется пространственным точечным пуассоновским процессом. Следовательно, вероятность, что в радиусе r от местоположения сенсора не появится ни одного события, вычисляется как

$$p_{passive} = e^{-\lambda\pi r^2}. \quad (3.27)$$

Вероятность, что в радиусе r от местоположения сенсора появится хотя бы одно событие, равна

$$p_{active} = 1 - e^{-\lambda\pi r^2}. \quad (3.28)$$

Однако, если расстояние от местоположения сенсора до края зоны действия базовой станции меньше r , то вероятности $p_{passive}$ и p_{active} у этого сенсора будут отличаться от других сенсоров. Такие ситуации принято называть «краевыми эффектами».

Для учета «краевых эффектов» при имитационном моделировании предлагается подход с расширением области, на которой могут появляться события [69]. На рисунке 3.13 представлены примеры расширения области появления событий для моделей, в одной из которых зона действия базовой станции имеет форму круга, а в другой - квадрата.

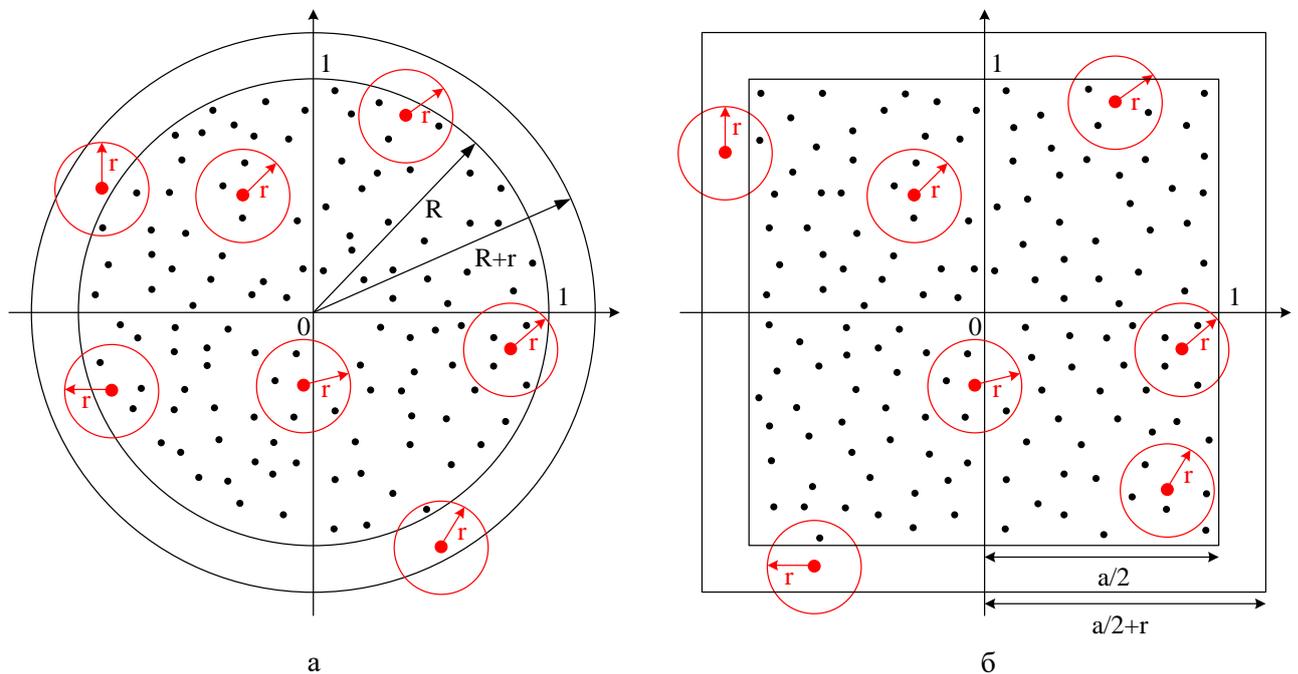


Рисунок 3.13 — Расширение области появления событий (а – в модели с зоной действия базовой станции в форме круга, б – в модели с зоной действия базовой станции в форме квадрата)

3.8 Выводы по разделу

В данном разделе предложена модель системы мониторинга появления случайных событий. Ведены два показателя качества работы таких систем:

- среднее число успешно переданных сообщений об одном событии;

– вероятность доставки информации о событии.

Представлены методы оценки обоих показателей с помощью имитационного моделирования и аналитического расчета. Предложена методика определения числа сенсоров в системах мониторинга, которое будет максимизировать среднее число успешно переданных сообщений об одном событии. Показано, что оценка вероятности доставки информации о событии также может быть применима для выбора оптимального числа сенсоров в таких системах.

Методика, описанная в данном разделе, позволяет определять подоптимальное число сенсоров на стадии проектирования систем мониторинга без применения имитационного моделирования. Она может быть использована только в том случае, если уровень затухания сигнала между разными сенсорами и базовой станцией эквивалентен для всех устройств. Однако с применением материалов работы [89] данная методика может быть расширена с учетом ситуации, когда затухания сигнала между устройствами и базовой станцией различны.

4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ С ПОЯВЛЕНИЕМ СОБЫТИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СИСТЕМ МОНИТОРИНГА, ПОСТРОЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ LoRa

4.1 Вводные замечания по разделу

Системы мониторинга представляют из себя множество маломощных сенсоров, способных обнаруживать случайные события и передавать сигнал об этом на базовую станцию. В таких системах базовой станцией принято называть общий центр сбора информации, а случайными событиями - различные физические явления такие, как загрязнения, камнепады, пожары.

Большинство современных систем мониторинга основаны на технологии LoRa. Например, такие системы применяются для выявления нарушений экологической обстановки [90, 91] и для обнаружения оползней и камнепадов [92]. В данном разделе приводится подробное описание основных особенностей технологии LoRa и предлагается модель системы мониторинга, которая учитывает одновременно специфику этой технологии и зависимость данных от разных источников. Эта модель относится к классу моделей с появлением событий.

В данном разделе получено обобщение для выражения (3.7) на случай кольцевидной формы зоны действия базовой станции и приведен пример применения методики определения подоптимального числа сенсоров, предложенной в подразделе 3.5, к системе мониторинга, построенной по технологии LoRa.

Главным предназначением систем мониторинга считается обеспечение доставки данных о всех изменениях, происходящих в системе, с целью получения своевременного реагирования. Однако по различным причинам базовая станция может не получить данные о некоторых изменениях в системе. Поэтому вероятность доставки информации о событии можно отнести к основным показателям качества работы систем мониторинга. При проектировании сетей LoRaWAN с целью наблюдения за случайными событиями появляются сложности с выбором параметров системы, обеспечивающих высокое качество работы [93, 94]. В данном разделе предложен способ вычисления вероятности доставки информации о событии для упрощенной модели системы, построенной по технологии

LoRa. Показано, что этот показатель дает возможность выбрать оптимальное число сенсоров при создании таких систем.

Также в данном разделе приведены результаты моделирования системы мониторинга, основанной на технологии LoRa, в симуляторе ns-3. Выполнено сравнение полученных результатов моделирования с теоретическим расчетом.

Основные результаты данного раздела опубликованы в работе [95].

4.2 Особенности технологии LoRa

В системах Интернета вещей с небольшой зоной покрытия используют технологии ближнего действия, такие как [96, 97]: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee и оптическую беспроводную связь (OWC) [98]. С каждым годом количество устройств, подключаемых к сети в системах Интернета вещей, растет. В связи с этим появляется все больше систем, требующих широкой зоны покрытия. Существует ряд технологий дальнего действия с низким энергопотреблением – LPWAN (Low Power Wide Area Network) [99–101]. К наиболее популярным в настоящее время технологиям LPWAN относятся [102–107]: LTE-M, NB-IoT, SigFox, LoRa. Технологии LTE-M и NB-IoT работают в лицензированном диапазоне частот, а SigFox и LoRa – в нелицензированном [108, 109]. В сетях с большим числом устройств чаще используются технологии с нелицензированным частотным диапазоном, т.к. стоимость развертывания сети в этом случае существенно ниже. Классификация технологий, применяемых в системах Интернета вещей представлена на рисунке 4.1.

SigFox [110] – одна из технологий дальнего действия с нелицензированным диапазоном частот. Она является сверх-узкополосной (UNB – Ultra Narrow-Band) технологией с полосой пропускания 100 Гц для передачи очень коротких сообщений. За счет UNB технология SigFox обеспечивает более широкий охват и более низкое энергопотребление устройств по сравнению со своим конкурентом – технологией LoRa, но предоставляет более низкую скорость передачи данных. Максимальная длина сообщений в SigFox равняется 12 байтам. Количество сообщений в восходящем канале тоже имеет предел – не более 140 сообщений в день. Из-за этих ограничений и закрытой бизнес-модели сети разработчики систем Интернета вещей чаще отдают предпочтение технологии LoRa.

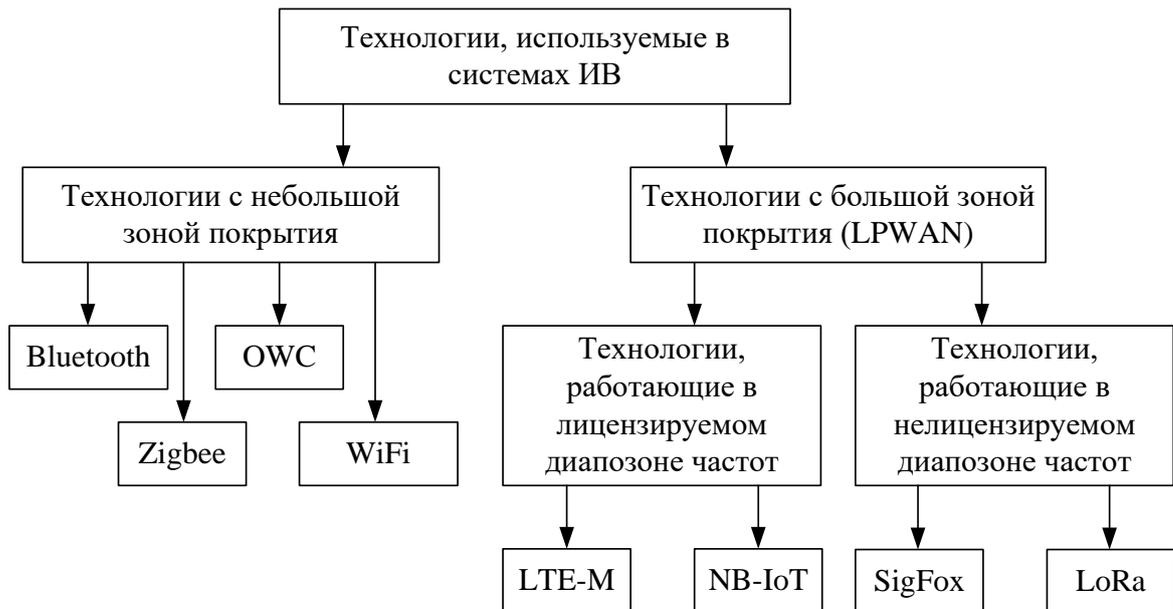


Рисунок 4.1 — Классификация технологий, используемых в системах Интернета вещей

LoRa (LongRange) [111] – LPWAN технология, которая основана на модуляции сигналов с расширением спектра (Chirp Spread Spectrum – CSS) [112,113]. Такой вид модуляции распределяет узкополосный сигнал по более широкой полосе пропускания, обеспечивая высокую устойчивость к помехам для корректного декодирования данных на приемной стороне. Данная модуляция характеризуется параметром, который называют коэффициентом расширения спектра. В англоязычной литературе его принято называть – Spreading Factor (SF) [114]. Если полоса пропускания сигнала 125 кГц, то значения этого параметра лежат в диапазоне [7,12] [115]. С ростом значения коэффициента расширения спектра скорость передачи данных понижается. В зависимости от значения коэффициента расширения спектра и пропускной способности канала скорость передачи в LoRa может варьироваться в диапазоне от 50 до 300 кбит/с. Базовая станция способна различать сигналы, одновременно переданные от устройств с разными коэффициентами расширения спектра, т.к. сигналы, модулированные с разными SF, ортогональны. Таким образом, возможность назначения устройствам различных SF позволяет увеличить зону покрытия за счет уменьшения скорости передачи данных, а так же уменьшить количество конфликтов в сети за счет ортогональности сигналов.

В основе технологий SigFox и LoRa находится случайный множественный доступ [116]. Для обмена данными между сенсорами и базовой станцией исполь-

зуется алгоритм ALOHA [32, 117]. Основные характеристики обеих технологий приведены в таблице 6.

Таблица 6 — Основные характеристики технологий LoRa и SigFox

Характеристики	LoRa	SigFox
Тип модуляции	CSS	GFSK/DBPSK
Диапазон частот	Нелицензированный	Нелицензированный
Полоса пропускания	125 кГц и 250 кГц	100 Гц
Зона покрытия	5 км (в городе) 20 км (на открытой местности)	10 км (в городе) 50 км (на открытой местности)
Помехоустойчивость	Высокая	Очень высокая
Максимальная скорость передачи данных	50 кбит/с	100 бит/с
Максимальная длина сообщения	243 байта	12 байт
Срок службы источников питания устройств	10 лет	10 лет
Алгоритм СМД	ALOHA	ALOHA

В 2015 году протокол связи на основе технологии LoRa был стандартизован объединением LoRa-Alliance и получил название LoRaWAN [118]. Протокол LoRaWAN основан на топологии «звезда», в которой устройства передают данные на общий центр, называемый базовой станцией. Благодаря нелицензированному диапазону частот в сетях LoRaWAN используют собственные базовые станции, не принадлежащие операторам мобильной связи. Сети LoRaWAN могут включать как одну так и несколько базовых станций. Данные проходят путь от устройств сбора информации до сервера приложений. Взаимодействие устройств сбора информации и базовой станции происходит по протоколу LoRaWAN, а обмен информацией между базовой станцией и сетевым сервером, а также между сетевым сервером и сервером приложений, выполняется по технологии Ethernet (TCP/IP). Архитектура сети, работающей по протоколу LoRaWAN, представлена на рисунке 4.2.

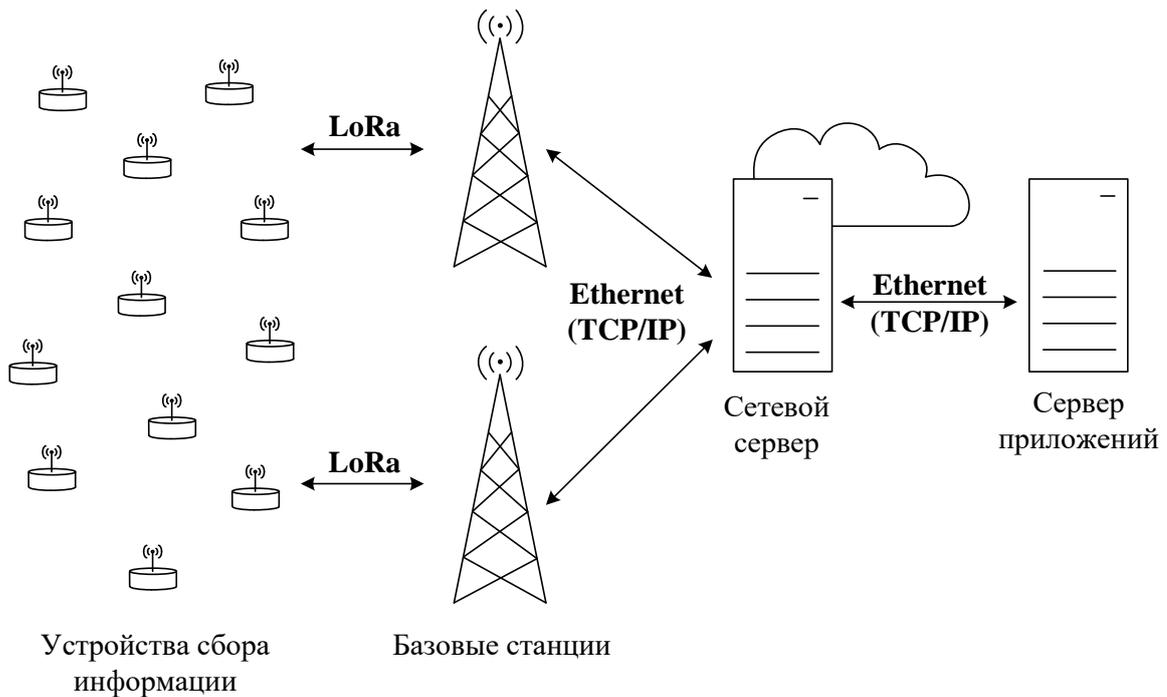


Рисунок 4.2 — Архитектура сети, работающей по протоколу LoRaWAN

Протокол LoRaWAN предоставляет для передачи данных несколько каналов, работающих в разных частотных диапазонах. Однако в разных стандартах, описывающих технические характеристики протокола LoRaWAN, приводятся различные данные о количестве этих частотных каналов. Например в отечественном стандарте [24] утверждается, что в LoRaWAN существует пятнадцать частотных каналов, а в зарубежном стандарте, разработанном объединением «LoRa Alliance» [25], говорится, что в России LoRaWAN поддерживает только восемь частотных каналов. Данные, отправленные параллельно в разных частотных каналах, от устройств с одним и тем же коэффициентом расширения спектра будут успешно доставлены на базовую станцию. Таким образом, возможность передачи данных в различных частотных каналах, как и назначение различных SF, снижает количество конфликтов в сети.

В LoRaWAN определены три класса устройств: А, В и С (рисунок 4.3).

- Устройства класса А – самые простые и дешевые устройства с наименьшим энергопотреблением, не требующие опроса. Для передачи данных они используют алгоритм случайного множественного доступа АLOHA. После передачи они открывают два коротких окна для обратной связи. Устройства класса А считаются базовыми и должны поддерживаться другими устройствами.

- Устройства класса В, в отличие от устройств класса А, имеют дополнительные окна для опроса, которые открываются по расписанию. Для синхронизации окон опроса базовые станции отправляют специальные сигналы – «маячки» (beacons).
- Устройства класса С всегда прослушивают канал за исключением периода передачи данных.

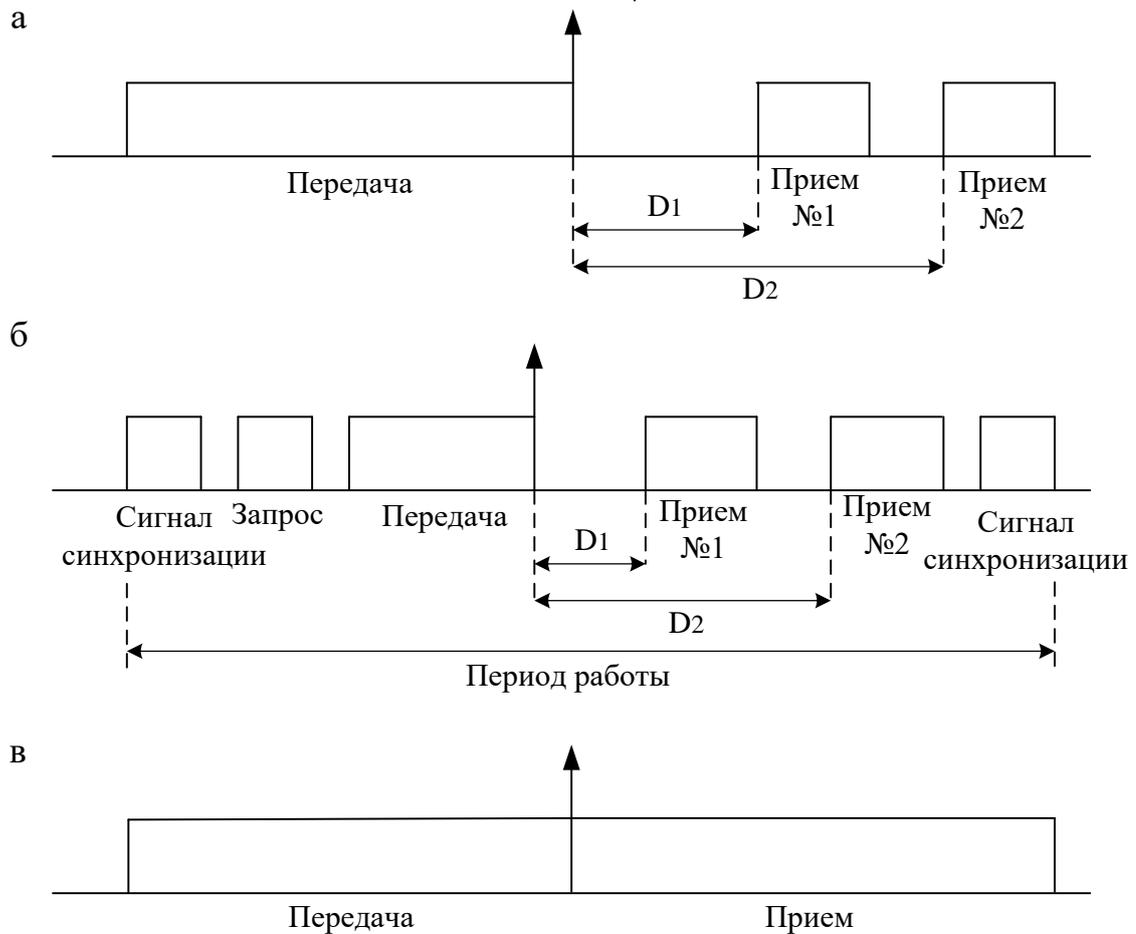


Рисунок 4.3 — Передача данных в сетях LoRaWAN с разными классами устройств (а – класс А, б – класс В, в – класс С)

Сети LoRaWAN активно исследуются уже на протяжении нескольких лет [119]. Чаще всего встречаются работы, в которых решаются задачи снижения энергопотребления в сетях LoRaWAN. Работы [120–122] посвящены исследованиям внедрения синхронизации передачи данных в сетях LoRaWAN. Результаты, полученные в этих работах, показали, что синхронизация способствует уменьшению количества конфликтов и, как следствие, снижению энергопотребления в сети. Авторы работ [123–125] предлагают использовать

доступ с разделением времени для снижения энергопотребления в сетях LoRaWAN.

В работе [126] предлагается модификация асинхронного алгоритма ALOHA, которая позволяет повысить пропускную способность канала в сетях LoRaWAN. Модификация алгоритма называется «асинхронным алгоритмом ALOHA с немедленным разрешением конфликта» и заключается в выделении дополнительных персональных окон передачи после конфликта для абонентов, чьи сообщения были первым и последним в конфликте.

Работы, в которых исследуется вероятность доставки информации о событии, на данный момент отсутствуют.

4.3 Описание системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, моделью с появлением событий

Из обзора, приведенного в подразделе 4.2, можно выделить две ключевые особенности технологии LoRa, которые необходимо учесть при построении модели системы мониторинга на основе данной технологии:

- назначение устройствам коэффициента расширения спектра;
- использование устройств класса A, работающих на случайном множественном доступе.

Устройства класса A представляют собой простые устройства с приемопередатчиками малой мощности. Большую часть времени они проводят в пассивном состоянии и включаются только в некоторые моменты времени, например, при возникновении события. Будем строить модель системы мониторинга на устройствах класса A.

Коэффициенты расширения спектра в LoRaWAN назначаются устройствам определенным образом. Всем сенсорам, которые равноудалены от базовой станции, устанавливается один и тот же коэффициент расширения спектра. Наименьший коэффициент получают ближайšie к базовой станции устройства. По мере удаления устройств от базовой станции значение коэффициента растет. Таким образом, зону действия базовой станции в сети LoRaWAN можно представить в виде нескольких колец, как показано на рисунке 4.4. Стоит отме-

тять, что сенсоры, имеющие наименьшее значение коэффициента расширения спектра, образуют круг, а не кольцо.

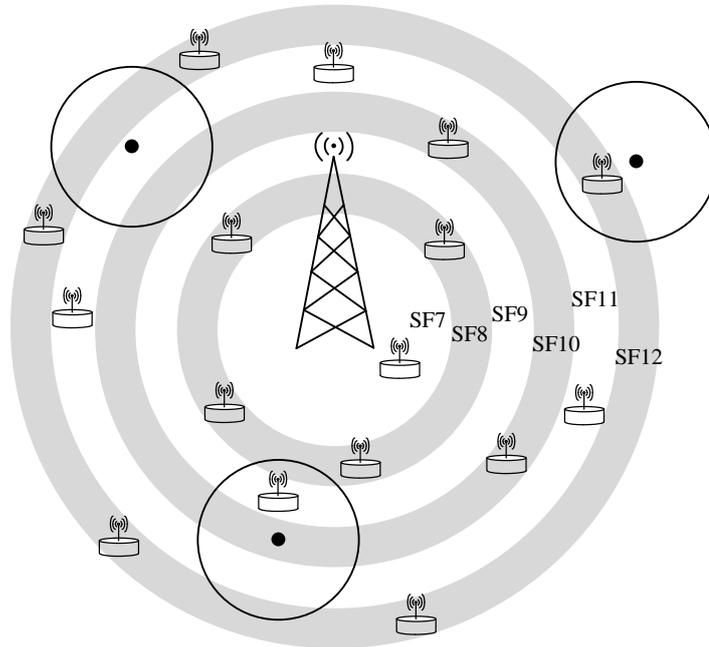


Рисунок 4.4 — Схематичное представление модели системы мониторинга, построенной по технологии LoRa

Устройства, которым назначены различные коэффициенты расширения спектра, могут передавать данные одновременно, не мешая при этом друг другу. Следовательно, модель сети LoRaWAN можно представить в виде нескольких моделей, в одной из которых зона действия базовой станции будет иметь форму круга, а в остальных – форму кольца. Каждую из этих моделей можно рассматривать отдельно, как показано на рисунке 4.5.

Данные модели удовлетворяют допущениям модели с появлением событий, описанной в подразделе 3.2 и отличаются друг от друга только формой зоны действия базовой станции. Во всех моделях предполагается, что сеть располагается на открытой местности, поэтому затухание сигнала зависит только от расстояния между сенсором и базовой станцией. Считается, что в отсутствии конфликтов данные от сенсоров успешно доставляются на базовую станцию. Для удобства изложения будет обозначать данные модели как SF7-SF12.

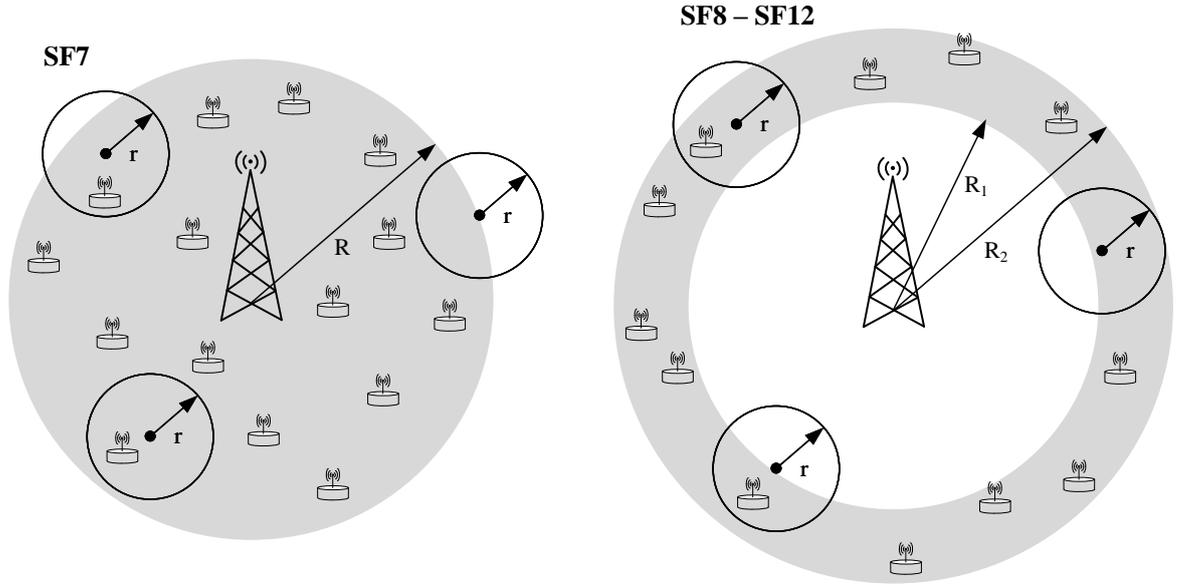


Рисунок 4.5 — Схематичное представление упрощенных моделей системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, для различных значений SF

4.4 Применение методики определения подоптимального числа сенсоров в системе мониторинга, построенной по технологии LoRa

В методике, предложенной в подразделе 3.5, используется выражение (3.7). Данное выражение верно для модели с наименьшим коэффициентом расширения спектра, но не может быть использована для моделей SF8-SF12, так как кольцо не является выпуклой фигурой. Покажем, как вычислить $M[\varphi(n)]$ в случае, если зона действия базовой станции представляет собой кольцо.

Подставив (3.10) в (3.9), получим формулу $\varphi(n)$ для случая, когда зона действия базовой станции представляет собой круг радиуса R ,

$$\varphi_{circleR}(n) = 1 - \left(\frac{R^2 + 2rR}{r^2 + R^2 + 2rR} \right)^n.$$

Обозначим через z следующее выражение:

$$z = \frac{R^2 + 2rR}{r^2 + R^2 + 2rR}, \quad (4.1)$$

Так как n распределено по закону Пуассона с параметром Λ , то

$$E[\varphi(n)] = 1 - e^{-\Lambda(1-z)}. \quad (4.2)$$

При малых значениях z $\ln z \approx -(1-z)$, следовательно $E[\varphi(n)] \approx 1 - (z)^\Lambda = \varphi(\Lambda)$. Таким образом, для зоны действия базовой станции, имеющей форму круга, $E[\varphi(n)]$ можно приближенно вычислить как $\varphi(\Lambda)$.

Обозначим $E[\varphi(n)]$ через $F(\Lambda, R)$ для зоны действия базовой станции, имеющей форму круга. Подставив (4.1) в (4.2), получим

$$F(\Lambda, R) = 1 - e^{-\Lambda \left(1 - \frac{R^2 + 2rR}{r^2 + R^2 + 2rR}\right)}. \quad (4.3)$$

Рассмотрим зону действия базовой станции, которая имеет форму кольца. Введем следующие обозначения:

- R_1 – радиус внутреннего круга;
- R_2 – радиус внешнего круга;
- S_1 – площадь внутреннего круга радиуса R_1 ;
- S_2 – площадь внешнего круга радиуса R_2 ;
- Λ_1 – среднее число событий, которые затрагивают круг радиуса R_1 ;
- Λ_2 – среднее число событий, которые затрагивают круг радиуса R_2 ;
- N_1 – среднее число сенсоров в круге радиуса R_1 ;
- N_2 – среднее число сенсоров в круге радиуса R_2 ;
- N – среднее число сенсоров в кольце.

Обозначим $E[\varphi(n)]$ как $F(\Lambda_1, R_1, \Lambda_2, R_2,)$ для зоны действия базовой станции в форме кольца.

Если число сенсоров распределено равномерно, то среднее число сенсоров в кольце можно найти следующим образом:

$$N = N_2 - N_1 = N_2 - N_2 \frac{S_1}{S_2}.$$

Следовательно,

$$N_2 = \frac{N}{1 - S_1/S_2}. \quad (4.4)$$

Среднее число активных сенсоров в кольце можно вычислить как

$$N_{active} = N_2 F(\Lambda_2, R_2) - N_2 \frac{S_1}{S_2} F(\Lambda_1, R_1). \quad (4.5)$$

Подставив (4.4) в (4.5), получим

$$N_{active} = N \left(\frac{1}{1 - S_1/S_2} F(\Lambda_2, R_2) - \frac{S_1/S_2}{1 - S_1/S_2} F(\Lambda_1, R_1) \right). \quad (4.6)$$

Также среднее число активных сенсоров в кольце это

$$N_{active} = N \varphi_{ring}(\Lambda). \quad (4.7)$$

Из (4.6) и (4.7) следует

$$F(\Lambda_1, R_1, \Lambda_2, R_2) = \frac{1}{1 - S_1/S_2} F(\Lambda_2, R_2) - \frac{S_1/S_2}{1 - S_1/S_2} F(\Lambda_1, R_1). \quad (4.8)$$

Подставив формулы для S_1 и S_2 в выражение (4.8), получим

$$F(\Lambda_1, R_1, \Lambda_2, R_2) = \frac{1}{1 - R_1^2/R_2^2} F(\Lambda_2, R_2) - \frac{R_1^2/R_2^2}{1 - R_1^2/R_2^2} F(\Lambda_1, R_1). \quad (4.9)$$

Таким образом, чтобы методика определения подоптимального числа сенсоров была применима к моделям SF8-SF12, необходимо на втором и третьем этапах использовать выражение (4.9). В таблице 7 приведены результаты применения методики к системе мониторинга, построенной по технологии LoRa. Количественные характеристики радиусов зон действия базовой станции и длительностей окон для каждого значения коэффициента расширения спектра получены согласно типовой методике расчета, позволяющей определить на каком расстоянии от оконечного устройства до базовой станции обеспечивается доставка сообщений в отсутствии конфликтов с вероятностью ошибки, не превышающей 10^{-3} .

Таблица 7 — Пример применения методики определения подоптимального числа сенсоров для системы мониторинга, построенной по технологии LoRa

Зафиксируем параметры (1-й этап методики)	SF7	SF8	SF9
K – число частотных каналов	8		
λ – интенсивность появления событий [число событий/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)]	$7 \cdot 10^{-7}$ ($1/(100\text{м}^2 \cdot 4\text{ч})$)		
r – радиус области распространения события, [м]	100		
R – радиус зоны действия базовой станции, [км]	1.54	1.94	2.44
τ – длительность окна, [с]	0.134	0.247	0.453
S – площадь зоны действия базовой станции, [км^2]	7.45	4.37	6.88
Λ – среднее число событий, области распространения которых пересекают зону действия базовой станции	0.79	1.13	3.05
Найдем $\varphi(\Lambda)$ (2-й этап методики)	0.003	0.01	0.02

Определим подоптимальное число сенсоров $\tilde{N}_{opt} = K/\varphi(\Lambda)$ (3-й этап методики)	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

4.5 Расчет вероятности доставки информации о событии в системе мониторинга, построенной по технологии LoRa

В подразделе 3.6 был введен показатель качества работы систем мониторинга под названием вероятность доставки информации о событии $P(N)$. Данный показатель определяется как отношение числа событий, о которых были получены данные за период наблюдения t , к общему числу событий, произошедших за период наблюдения t . В подразделе 3.6 описан алгоритм оценки вероятности доставки информации о событии путем имитационного моделирования для модели с появлением событий. Данный подход может быть применен и к модели, построенной по технологии LoRa.

Чтобы уменьшить сложность вычислений, изменим модель, описанную в подразделе 4.3. Будем считать, что всем сенсорам в системе назначен один и тот же коэффициент расширения спектра. Предположим, что они расположены не в кольце, а на окружности (рисунок 4.6).

Приведем ряд допущений для измененной модели системы мониторинга, построенной по технологии LoRa.

1. В системе мониторинга находятся N сенсоров и базовая станция. Предположим, что всем сенсорам назначен один и тот же SF. Это означает, что все сенсоры, имеющиеся в системе, равноудалены от базовой станции, т.е. координаты местоположений сенсоров принадлежат окружности радиуса R . Будем считать, что сенсоры расставлены на окружности таким образом, что расстояния между любыми соседними сенсорами одинаковы. Пусть $R = 1$ для облегчения анализа модели.

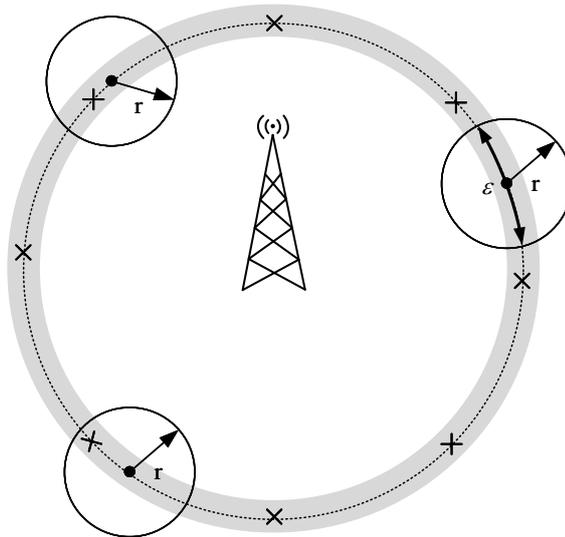


Рисунок 4.6 — Схематичное представление упрощенной модели с окружностью для системы мониторинга, построенной по технологии LoRa

2. Сигналы о событиях, отправляемые сенсорами, представляют собой небольшие и одинаковые по объему сообщения. Сообщения передаются на базовую станцию за одно и то же время – в течение некоторого окна. Будем считать, что передача сообщений в системе осуществляется синхронно, т.е. в начале каждого окна.
3. События в системе возникают согласно пространственному точечному пуассоновскому процессу. Этот процесс задается параметром λ , который показывает среднюю интенсивность возникновения событий на окружности в одном окне. Событие может возникнуть в любой точке окружности и затронуть некоторую окрестность этой точки. Будем считать, что окрестность имеет форму круга радиуса r , а дуга окружности, которая является пересечением окрестности события и окружности, имеет длину ϵ .
4. Изначально все сенсоры находятся в пассивном режиме. Условием обнаружения сенсором события является попадание сенсора в область распространения события. В этом случае сенсор активизируется и сообщает о событии на базовую станцию. После передачи данных сенсор переходит в пассивный режим.
5. Выделено K каналов для передачи данных, работающих в разных частотных диапазонах. В начале каждого окна сенсор выбирает один из K каналов для передачи сообщения на базовую станцию.
6. В каждом канале могут произойти три ситуации:

- «успех» – ситуация, в которой данный частотный канал выбрал только один сенсор;
- «конфликт» – ситуация, в которой данный частотный канал выбрало два или более сенсоров;
- «пусто» – ситуация, в которой данный частотный канал не выбрал ни один сенсор.

На рисунке 4.7 представлены зависимости $P(N)$, полученные с помощью имитационного моделирования в соответствии с алгоритмом из подраздела 3.6.

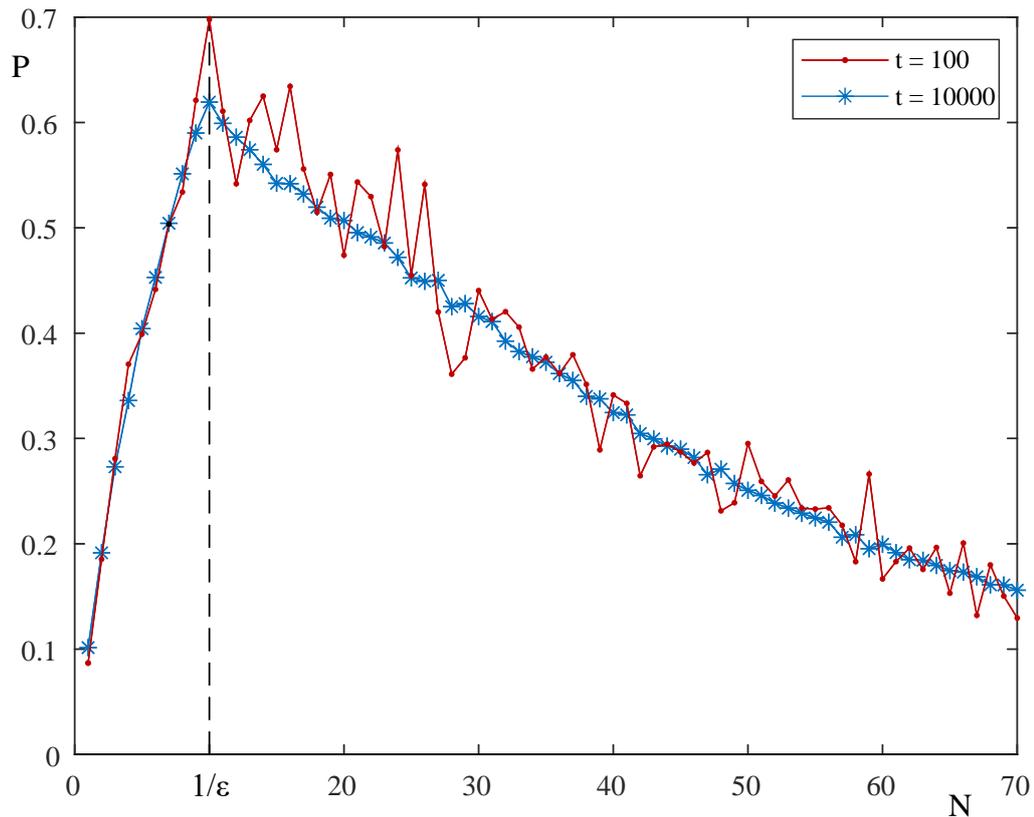


Рисунок 4.7 — Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров в системе, полученные путем имитационного моделирования при $\lambda = 3$, $\epsilon = 0.1$, $K = 5$ и двух значениях t ($t = 100$ и $t = 10000$)

Моделирование запускалось при следующих параметрах модели: $\lambda = 3$, $\epsilon = 0.1$, $K = 5$ и двух значениях t ($t = 100$ и $t = 10000$). Результаты моделирования показали, что чем больше время наблюдения за системой, тем выше точность полученных результатов.

При малых значениях N вероятность доставки информации о событии принимает низкие значения, так как этого количества сенсоров не хватает для обнаружения всех событий, появившихся в системе. При больших значениях

N каждое событие будет обнаружено несколькими сенсорами, что приводит к большому числу конфликтов и низкой вероятности доставки информации о событии. При некотором значении $N = N_{opt}$ данная зависимость имеет максимум, в данном примере $N_{opt} = 1/\varepsilon$. В зависимости от параметров системы N_{opt} будет принимать различные значения, однако N_{opt} не может быть больше, чем $1/\varepsilon$. При $N = 1/\varepsilon$ вся окружность будет охвачена сенсорами, т.е. все события, появившиеся в системе будут обнаружены. Таким образом, рассматривать $N \geq 1/\varepsilon$ в такой модели нецелесообразно.

В работах [69–71] рассматривался другой показатель качества работы систем мониторинга – среднее число успешно переданных пакетов в окне $M(N)$. Этот показатель, как и вероятность доставки информации о событии, можно оценить с помощью имитационного моделирования.

На рисунке 4.8 приведены зависимости обоих показателей от числа сенсоров в системе при одних и тех же параметрах системы: $\lambda = 3$, $\varepsilon = 0.1$ и двух значениях K ($K = 5$ и $K = 10$). Полученные результаты иллюстрируют, что при одинаковых параметрах системы среднее число успешно переданных пакетов в окне и вероятность доставки информации о событии имеют максимумы при различном числе сенсоров.

Среднее число успешно переданных пакетов в окне в системах мониторинга случайных событий не отражает качество работы таких систем в полной мере. Информация о событии может не дойти до базовой станции по двум причинам:

- возникновение конфликта при передаче;
- событие не было обнаружено ни одним сенсором.

Максимизация среднего числа успешно переданных пакетов в окне снижает количество конфликтов при передаче, но не учитывает, что в системе могут остаться события, которые не были обнаружены. Таким образом, более значимым показателем качества работы систем мониторинга является вероятность доставки информации о событии.

Покажем, как можно вычислить вероятность доставки информации о событии в упрощенной модели системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, используя подход, предложенный в подразделе 3.6.

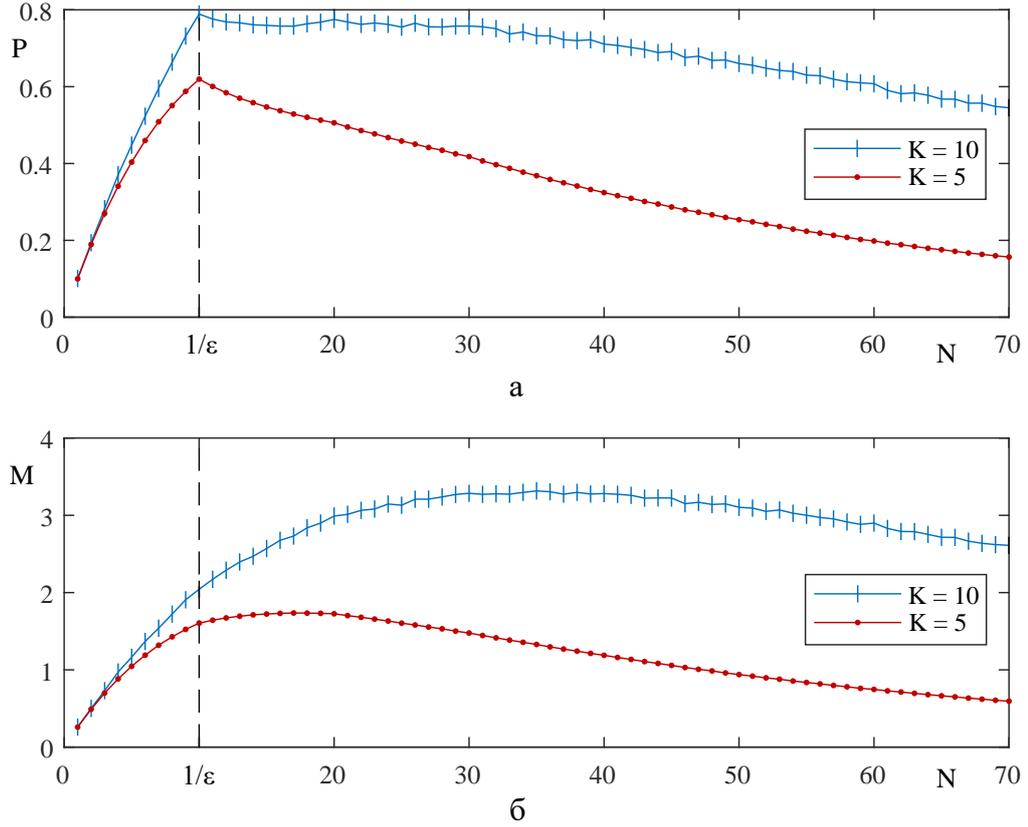


Рисунок 4.8 — Сравнение зависимостей показателей от числа сенсоров при одинаковых параметрах системы: $\lambda = 3$, $\epsilon = 0.1$, $K = 5$ и $K = 10$ (a – вероятность доставки информации о событии, b – среднее число успешно переданных сообщений)

Утверждение 4.1. Для упрощенной модели системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, верно

$$\forall N \leq 1/\epsilon : P(N) = N\epsilon \left[1 - \frac{1 - e^{-\lambda\epsilon}}{K} \right]^{N-1}. \quad (4.10)$$

Доказательство. Согласно выражению (3.23) вероятность доставки информации о событии можно найти следующим образом:

$$P(N) = Pr \{I_s = 1\} \cdot Pr \{I_d = 1 | I_s = 1\}, \quad (4.11)$$

где I_s и I_d – индикаторы, вычисляемые по формулам (3.21) и (3.21) соответственно.

Вероятность, что событие было обнаружено хотя бы одним сенсором, равняется

$$Pr \{I_s = 1\} = N\epsilon. \quad (4.12)$$

Вероятность, что данные о событии получены базовой станции при условии, что это событие было обнаружено хотя бы одним сенсором, будет иметь следующий вид:

$$Pr \{I_d = 1 | I_s = 1\} = \left[1 - \frac{1 - e^{-\lambda\varepsilon}}{K} \right]^{N-1}. \quad (4.13)$$

Таким образом, используя формулы (4.12) и (4.13) в выражении (4.11), получим

$$P(N) = N\varepsilon \left[1 - \frac{1 - e^{-\lambda\varepsilon}}{K} \right]^{N-1},$$

что и требовалось доказать.

Применительно к данному показателю качества работы систем мониторинга можно сформулировать оптимизационную задачу: требуется определить количество сенсоров в системе, при котором вероятность доставки информации о событии будет максимальна при условии, что $N \leq 1/\varepsilon$. На математическом языке данная оптимизационная задача будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} P(N) \rightarrow \max, \\ N \leq 1/\varepsilon. \end{cases}$$

Эта задача представляет собой нелинейную целочисленную оптимизационную задачу с ограничениями. Сначала найдем ее решение как непрерывной задачи без ограничений, используя утверждение 4.1. Решением в этом случае будет значение N , при котором $P(N)$ примет максимальное значение,

$$N = \frac{K}{(1 - e^{-\lambda\varepsilon})}.$$

Теперь выпишем решение первоначальной целочисленной задачи с ограничениями:

$$\begin{cases} \lfloor 1/\varepsilon \rfloor, & \text{если } \frac{K}{(1 - e^{-\lambda\varepsilon})} \leq 1/\varepsilon \\ \min \left[\frac{K}{(1 - e^{-\lambda\varepsilon})}, 1/\varepsilon \right], & \text{иначе.} \end{cases}$$

На рисунке 4.9 представлены зависимости $P(N)$ при следующих параметрах системы: $\varepsilon = 0.1$, $K = 5$ и разных значениях λ : $\lambda = 5$ и $\lambda = 15$. Для каждого значения λ приведены две зависимости $P(N)$, одна из которых получена с помощью имитационного моделирования при $t = 100000$, а другая – с помощью теоретического расчета по формуле (4.10).

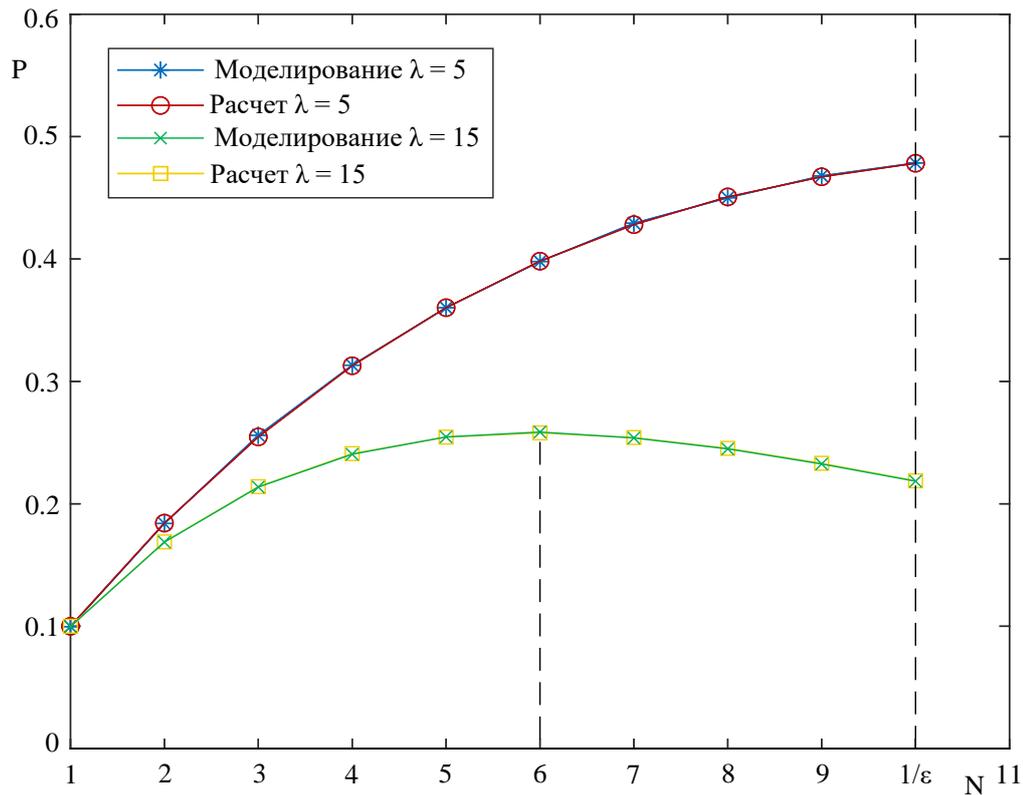


Рисунок 4.9 — Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров в системе, полученные путем имитационного моделирования и теоретического расчета при $K = 5$, $\varepsilon = 0.1$ и разных значениях λ : $\lambda = 5$ и $\lambda = 15$

При одинаковых параметрах системы результаты, полученные путем имитационного моделирования эквивалентны результатам, полученным с помощью выражения (4.10). Стоит отметить, что при $\lambda = 15$ $P(N)$ имеет максимум в точке $1/\varepsilon$, а при $\lambda = 5$ максимум $P(N)$ находится левее.

4.6 Моделирование систем, построенных по технологии LoRa, в симуляторе ns-3

Сетевой симулятор ns-3 (Network Simulator) предназначен для имитационного моделирования различных сетей с пакетной передачей данных. Он реализован на C++ и имеет открытый исходный код. Данный симулятор дает возможность исследовать системы передачи в приближенных к реальности условиях.

Существует проект сети LoRaWAN, реализованный в симуляторе ns-3 [114]. Он позволяет проводить имитационное моделирование систем, основанных на технологии LoRa, с учетом ее особенностей. В настоящее время в симуляторе ns-3 отсутствует возможность генерации событий. Поэтому была реализована дополнительная программа в среде Matlab для получения моментов появления и координат местоположений событий. На рисунке 4.10 представлена структура моделирования системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, с использованием симулятора ns-3.

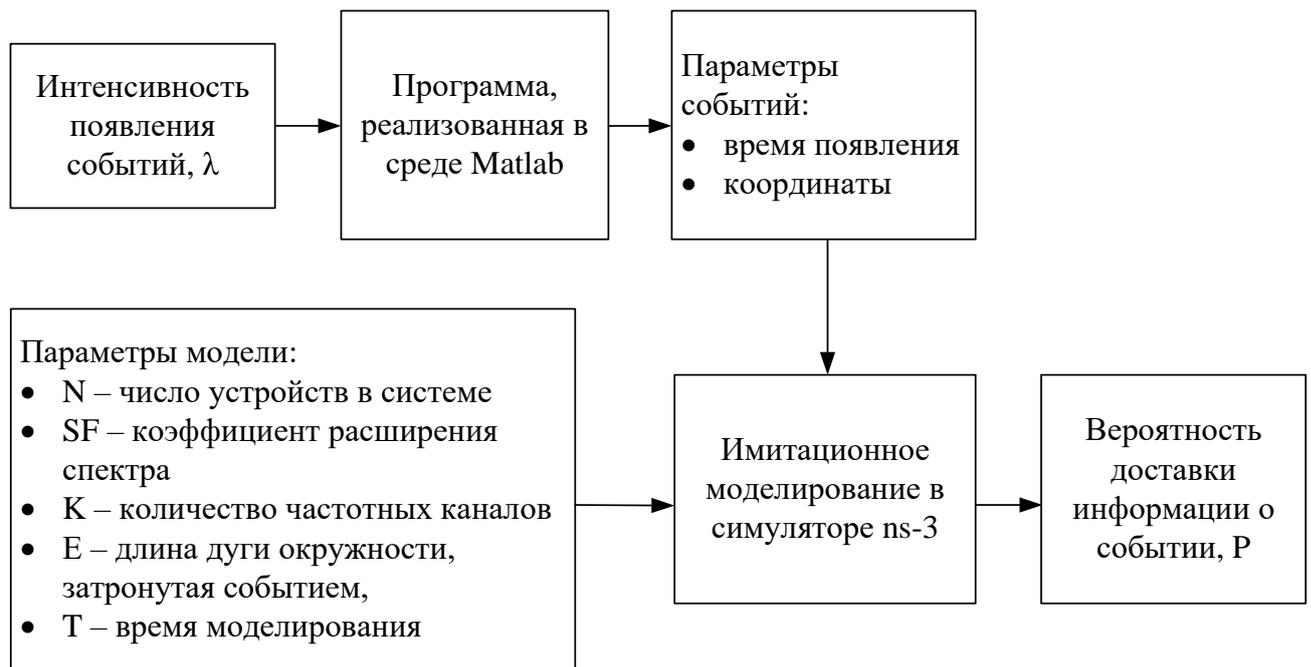


Рисунок 4.10 — Структура моделирования системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, с использованием симулятора ns-3

На рисунке 4.11 представлены зависимости $P(N)$, одна из которых получена с использованием симулятора ns-3, а другая с помощью расчета по формуле (4.10). Данные зависимости получены при следующих значениях параметров системы: $K = 5$, $\varepsilon = 0.1$ и $\lambda = 3$.

Отличие значений $P(N)$ на рисунке 4.11 обусловлено несоответствием ситуации «конфликт» в ns-3 и в модели, описанной в подразделе 4.3. Конфликтом называется ситуация, когда в одном и том же окне и в одном и том же частотном канале передавало два или более устройств. В модели из подраздела 4.3 считается, что в случае конфликта ни один сигнал не может быть доставлен на базовую станцию. В проекте сети LoRaWAN, реализованном в симуляторе ns-3,

в случае конфликта один из сигналов может быть доставлен на базовую станцию, если его мощность выше, чем у других сигналов, попавших в конфликт. Данный эффект описан в работах [127, 128] и называется – эффект захвата.

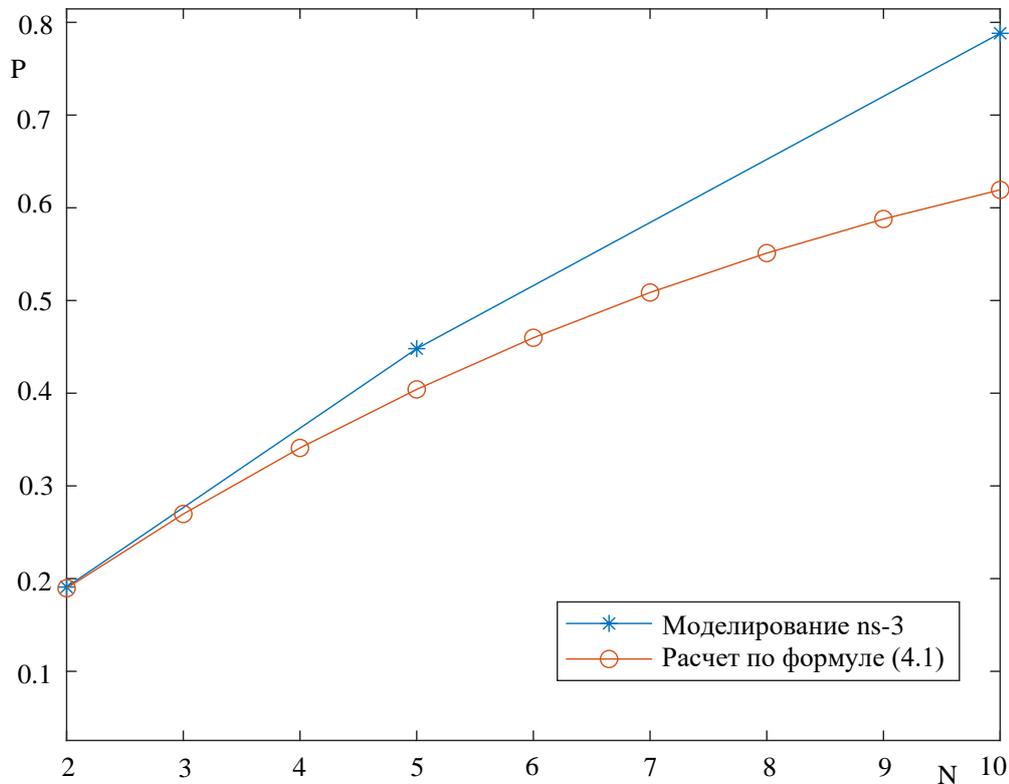


Рисунок 4.11 — Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров в системе, полученные путем имитационного моделирования в симуляторе ns-3 и теоретического расчета по формуле (4.10) при $K = 5$, $\varepsilon = 0.1$ и $\lambda = 3$

4.7 Выводы по разделу

В данном разделе представлен обзор основных особенностей технологии LoRa. Предложена модель систем мониторинга случайных событий, отражающая специфические особенности этой технологии и учитывающая зависимость данных от разных источников.

Представлен пример применения методики определения подоптимального числа сенсоров к рассматриваемой модели.

Также в данном разделе рассматривается упрощенная модель систем мониторинга, построенных по технологии LoRa. Для этой модели выполнено сравнение вероятности доставки информации о событии со средним числом успешно переданных сообщений в окне. Показано, что вероятность доставки информации о событии является более значимым показателем качества работы таких систем, чем среднее число успешно переданных сообщений в окне. Предложен способ теоретического расчета для вероятности доставки информации о событии. На основе результатов расчета сформулирована и решена оптимизационная задача, которая дает возможность найти оптимальное количество сенсоров для систем мониторинга случайных событий, построенных по технологии LoRa.

Кроме того, в данном разделе представлены результаты имитационного моделирования упрощенной модели системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, в симуляторе ns-3. В процессе моделирования было выяснено, что в проекте сети LoRaWAN, реализованном в симуляторе ns-3, существует эффект захвата. На данный момент этот эффект не учтен в теоретическом расчете вероятности доставки информации о событии. Однако в дальнейшем расчет может быть обобщен с учетом этого эффекта.

Стоит отметить, что результаты, полученные для упрощенной модели могут быть обобщены для более реальных моделей.

Предложенная в данном разделе модель учитывает как зависимость данных от разных источников, так и особенности современной технологии LoRa. Она может быть использована для оценки показателей качества работы и выбора наилучших параметров систем на стадии их разработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрены системы Интернета вещей, основанные на случайном множественном доступе, с большим числом устройств и зависимыми источниками. Основное внимание уделено исследованиям характеристик таких систем с целью улучшения качества их работы.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ИВ – Интернет вещей
- СМД – случайный множественный доступ
- СМО – системы массового обслуживания
- АоI – Age of Information, возраст информации
- СI – Critical Infrastructure, критическая инфраструктура
- CSS – Chirp Spread Spectrum, расширение спектра методом линейной частотной модуляции
- eMBB – enhanced Mobile Broadband, усовершенствованная подвижная широкополосная связь
- FCFS – First-Come-First-Served, прямой порядок обслуживания
- НТС – Holographic Type Communications, связь голографического типа
- ИоТ – Industrial IoT, промышленный Интернет вещей
- IoT – Internet of Things, Интернет вещей
- LCFS – Last-Come-First-Served, обратный порядок обслуживания
- LoRaWAN – Long Range Wide Area Network, сеть дальнего радиуса действия
- LPWAN – Low Power Wide Area Network, энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия
- mIoT – massive IoT, массовый Интернет вещей
- mMTC – massive Machine-Type Communications, массовая межмашинная связь
- MSN – Multi-Sense Networks, мульти-чувственные сети
- OWC – Optical Wireless Communication, оптическая беспроводная связь
- RFID – Radio Frequency IDentification, радиочастотная идентификация
- SF – Spreading Factor, коэффициент расширения спектра
- SIC – Successive Interference Cancellation, последовательное подавление помех
- TEA – Time Engineered Applications, спроектированные временем приложения
- uHDD – ultra-High Data Density, сверхвысокая плотность данных
- uHSLLC – ultra-High Speed and Low-Latency Communications, связь со сверхвысокой скоростью и малой задержкой

uMUB – ubiquitous Mobile Ultra-Broadband, повсеместная мобильная сверхширокополосная связь

UNB – Ultra Narrow-Band, сверх-узкополосный

U-RA – Unsourced Random Access, случайный доступ без идентификации источника

URLLC – Ultra-Reliable Low Latency Communications, сверхнадежная передача данных с малой задержкой

VoI – Value of Information, ценность информации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fayolle, G.* Stability and optimal control of the packet switching broadcast channel / G. Fayolle, E. Gelenbe, J. Labetoulle // *Journal of the ACM (JACM)*. — 1977. — Vol. 24, no. 3. — Pp. 375–386.
2. *Цыбаков, Б. С.* Свободный синхронный доступ пакетов в широкоэмительный канал с обратной связью / Б. С. Цыбаков, В. А. Михайлов // *Проблемы передачи информации*. — 1978. — Т. 14, № 4. — С. 32–59.
3. *Carpetanakis, J.* Tree Algorithms for Packet Broadcast Channels / J. Carpetanakis // *IEEE Transactions on Information Theory*. — 1979. — Vol. 25, no. 5. — Pp. 505–515.
4. *Hajek, B.* Decentralized Dynamic Control of a Multiaccess Broadcast Channel / B. Hajek, T. van Loon // *IEEE Transactions on Automatic Control*. — 1982. — Vol. 27. — Pp. 559 – 569.
5. *Михайлов, В. А.* Геометрический анализ устойчивости цепей Маркова в R_+^n и его приложение к вычислению пропускной способности адаптивного алгоритма случайного множественного доступа / В. А. Михайлов // *Проблемы передачи информации*. — 1988. — Т. 24, № 1. — С. 61–73.
6. *Mehravari, N.* Poisson multiple-access contention with binary feedback / N. Mehravari, T. Berger // *IEEE Transactions on Information Theory*. — 1984. — Vol. 30, no. 5. — Pp. 745–751.
7. *Paris, B.* Near-optimum control of multiple-access collision channels / B. Paris, B. Aazhang // *IEEE transactions on communications*. — 1992. — Vol. 40, no. 8. — Pp. 1298–1309.
8. *Цыбаков, Б. С.* Случайный множественный доступ в канале с двоичной обратной связью вида «успех–не успех» / Б. С. Цыбаков, А. Н. Белояров // *Проблемы передачи информации*. — 1990. — Т. 26, № 3. — С. 67–82.
9. *Malkov, A.* Random Multiple Access Protocols for Communication Systems with “Success-Failure” Feedback / A. Malkov, A. Turlikov // *IEEE International Workshop on Information Theory*. — 1995. — Vol. 1. — P. 39.

10. *Foss, S.* Spatial random multiple access with multiple departure / S. Foss, A. Turlikov, M. Grankin // IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). — 2017. — Pp. 2728–2731.
11. *Kaul, S.* Real-time status: How often should one update? / S. Kaul, R. Yates, M. Gruteser // Proceedings IEEE INFOCOM. — 2012. — Pp. 2731–2735.
12. *Борисовская, А. В.* Модели сенсорных сетей с зависимыми источниками / А. В. Борисовская // *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*. — 2023. — Т. 17, № 7. — С. 21–28.
13. *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.
14. ПНСТ «Информационные технологии. Интернет вещей. Термины и определения». ПНСТ 518-2021. 2021. 12 с.
15. *Ashton, K.* That internet of things thing / K. Ashton // *RFID journal*. — 2009. — Vol. 22, no. 7. — Pp. 97–114.
16. IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey / J. Ding, M. Nemat, C. Ranaweera, J. Choi // *arXiv preprint arXiv: 2002.12646*. — 2020.
17. Рекомендация МСЭ-R М.2150-1 «Подробные спецификации наземных радиointерфейсов Международной подвижной электросвязи 2020 (IMT-2020)», 2022.
18. Toward 6G non-terrestrial networks / G. Araniti, A. Iera, S. Pizzi, F. Rinaldi // *IEEE Network*. — 2021. — Vol. 36, no. 1. — Pp. 113–120.
19. ITU-T FG-NET-2030. Focus group White Paper. Network 2030. A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond.
20. ITU-T Recommendations. FG NET-2030 Technical Report on Network 2030 - Additional Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030. 2020. 37 p.

21. Toward massive machine type cellular communications / Z. Dawy, W. Saad, A. Ghosh et al. // *IEEE Wireless Communications*. — 2016. — Vol. 24, no. 1. — Pp. 120–128.
22. LTE-M evolution towards 5G massive MTC / R. Ratasuk, N. Mangalvedhe, D. Bhatoolaul, A. Ghosh // In 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). — 2017. — Pp. 1–6.
23. Татарникова, Т. М. Система детектирования опасных веществ по запаху, построенная на технологии Интернета вещей / Т. М. Татарникова, И. Н. Дзюбенко // *Информационно-управляющие системы*. — 2018. — Vol. 2, no. 93. — Pp. 84–90.
24. ПНСТ «Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU». ПНСТ 516-2021. 2021. 58 с.
25. LoRaWAN 1.0.3 Regional Parameters. LoRa Alliance. 2018.
26. How to Identify and Authenticate Users in Massive Unsourced Random Access / R. Kotaba, A. E. Kalør, P. Popovski et al. // *IEEE Communications Letters*. — 2021. — Vol. 25, no. 12. — Pp. 3795–3799.
27. Polyanskiy, Y. A perspective on massive random-access. / Y. Polyanskiy // In 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). — 2017. — Pp. 2523–2527.
28. Ordentlich, O. Low complexity schemes for the random access Gaussian channel. / O. Ordentlich, Y. Polyanskiy // In 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). — 2017. — Pp. 2528–2532.
29. Massive MIMO unsourced random access. / A. Fengler, G. Caire, P. Jung, S. Haghghatshoar // *arXiv preprint arXiv:1901.00828*. — 2019.
30. Calderbank, R. CHIRUP: a practical algorithm for unsourced multiple access. / R. Calderbank, A. Thompson // *Information and Inference: A Journal of the IMA*. — 2020. — Vol. 9, no. 4. — Pp. 875–897.
31. Burkov, A. An achievability bound of energy per bit for stabilized massive random access Gaussian channel / A. Burkov, S. Shneer, A. Turlikov // *IEEE Communications Letters*. — 2020. — Vol. 25, no. 1. — Pp. 299–302.

32. *Burkov, A. A.* Signal power and energy-per-bit optimization problems in mMTC systems / A. A. Burkov // *Information and Control Systems*. — 2021. — Vol. 5, no. 114. — Pp. 51–58.
33. *Клейнрок, Л.* Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. — М.: Машиностроение, Перевод с англ. / Пер. И.И. Грушко, 1979. — С. 432.
34. *Татарникова, Т. М.* Модель оценки временных характеристик при взаимодействии в сети Интернета вещей / Т. М. Татарникова, М. А. Елизаров // *Информационно-управляющие системы*. — 2017. — Vol. 2, no. 87. — Pp. 44–50.
35. *Abd-Elmagid, M. A.* On the role of age of information in the Internet of Things / M. A. Abd-Elmagid, N. Pappas, H. S. Dhillon // *IEEE Communications Magazine*. — 2019. — Vol. 59, no. 12. — Pp. 72–77.
36. *Kosta, A.* Age of information: A new concept, metric, and tool / A. Kosta, N. Pappas, V. Angelakis // *Foundations and Trends® in Networking*. — 2017. — Vol. 12, no. 3. — Pp. 162–259.
37. Age of information: A new metric for information freshness / Y. Sun, I. Kadota, R. Talak, E. Modiano // *Synthesis Lectures on Communication Networks*. — 2019. — Vol. 12, no. 2. — Pp. 1–224.
38. Age of information: An introduction and survey / R. D. Yates, Y. Sun, D. R. Brown et al. // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. — 2021. — Vol. 39, no. 5. — Pp. 1183–1210.
39. A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues / Y. Inoue, H. Masuyama, T. Takine, T. Tanaka // *IEEE Transactions on Information Theory*. — 2019. — Vol. 65, no. 12. — Pp. 8305–8324.
40. *Kaul, S. K.* Status updates through queues / S. K. Kaul, R. D. Yates, M. Gruteser // In IEEE 46th Annual conference on information sciences and systems (CISS). — 2012. — Pp. 1–6.
41. *Yates, R. D.* The age of information: Real-time status updating by multiple sources / R. D. Yates, S. K. Kaul // *IEEE Transactions on Information Theory*. — 2019. — Vol. 65, no. 3. — Pp. 1807–1827.

42. Age of information in random access channels / X. Chen, K. Gatsis, H. Hassani, S. S. Bidokhti // *IEEE Transactions on Information Theory*. — 2022.
43. Age of information with collision-resolution random access / H. Pan, T. T. Chan, J. Li, V. C. Leung // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. — 2022. — Vol. 71, no. 10. — Pp. 11295–11300.
44. *Feng, J.* Low-Power Random Access for Timely Status Update: Packet-based or Connection-based? / J. Feng, H. Pan, T. T. Chan // *arXiv preprint arXiv:2210.03962*. — 2022.
45. *Munari, A.* Average age of information of irregular repetition slotted ALOHA / A. Munari, A. Frolov // *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. — 2020. — Pp. 1–6.
46. *Munari, A.* Modern random access: An age of information perspective on irregular repetition slotted ALOHA / A. Munari // *IEEE Transactions on Communications*. — 2021. — Vol. 69, no. 6. — Pp. 3572–3585.
47. *De Jesus, G. G. M.* Age-of-Information Dependent Random Access in Multiple-Relay Slotted ALOHA / G. G. M. De Jesus, J. L. Rebelatto, R. D. Souza // *IEEE Access*. — 2022. — Vol. 10. — Pp. 112076–112085.
48. Delay and Peak-Age-of-Information of ALOHA Networks with Limited Retransmissions / P. S. Dester, P. H. Nardelli, F. H. C. dos Santos Filho et al. // *IEEE Wireless Communications Letters*. — 2021. — Vol. 10, no. 10. — Pp. 2328–2332.
49. *Fiems, D.* Mean Value Analysis of the Age of Information in Slotted ALOHA / D. Fiems, A. Vinel // *IEEE Communications Letters*. — 2023.
50. *Asvadi, S.* Peak Age of Information in Slotted ALOHA Networks / S. Asvadi, F. Ashtiani // *IEEE Transactions on Communications*. — 2023.
51. *Atabay, D.C.* Improving age of information in random access channels / D.C. Atabay, E. Uysal, O. Kaya // *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. — 2020. — Pp. 912–917.

52. Age of Information for Frame Slotted Aloha / J. Wang, J. Yu, X. Chen et al. // *IEEE Transactions on Communications*. — 2023. — Vol. 71, no. 4. — Pp. 2121–2135.
53. *Chen, H.* Age-of-information dependent random access for massive IoT networks / H. Chen, Y. Gu, S. C. Liew // IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). — 2020. — Pp. 930–935.
54. *Grybosi, J. F.* Age of information of SIC-aided massive IoT networks with random access / J. F. Grybosi, J. L. Rebelatto, G. L. Moritz // *IEEE Internet of Things Journal*. — 2021. — Vol. 9, no. 1. — Pp. 662–670.
55. Understanding age of information in large-scale wireless networks / H. H. Yang, C. Xu, X. Wang et al. // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. — 2021. — Vol. 20, no. 5. — Pp. 3196–3210.
56. *Bae, Y. H.* Age of information and throughput in random access-based IoT systems with periodic updating / Y. H. Bae, J. W. Baek // *IEEE Wireless Communications Letters*. — 2022. — Vol. 11, no. 4. — Pp. 821–825.
57. Scheduling schemes for age optimization in IoT systems with limited retransmission times / H. Wang, X. Xie, X. Li, J. Yang // *IEEE Internet of Things Journal*. — 2022. — Vol. 9, no. 21. — Pp. 21458–21468.
58. A comprehensive survey on age of information in massive IoT networks / Q. Abbas, S. A. Hassan, H. K. Qureshi et al. // *Computer Communications*. — 2022. — Vol. 197. — Pp. 199–213.
59. Age of Information in Internet of Things: A Survey / İ. Kahraman, A. Köse, M. Koca, E. Anarım // *IEEE Internet of Things Journal*. — 2023.
60. The Age of Information in Wireless Cellular Systems: Gaps, Open Problems, and Research Challenges / E. Zhibankova, A. Khakimov, E. Markova, Y. Gaidamaka // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, no. 19. — P. 8238.
61. *Zancanaro, A.* Tackling Age of Information in Access Policies for Sensing Ecosystems / A. Zancanaro, G. Cisotto, L. Badia // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, no. 7. — P. 3456.

62. *Zancanaro, A.* Modeling value of information in remote sensing from correlated sources / A. Zancanaro, G. Cisotto, L. Badia // *Computer Communications*. — 2023. — Vol. 203. — Pp. 289–297.
63. *Yates, R. D.* Age of information in uncoordinated unslotted updating / R. D. Yates, S. K. Kaul // *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. — 2020. — Pp. 1759–1764.
64. Age of information minimization for frameless ALOHA in grant-free massive access / Y. Huang, J. Jiao, Y. Wang et al. // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. — 2023.
65. The Dynamic Behavior of Frameless ALOHA: Drift Analysis, Throughput, and Age of Information / A. Munari, F. Lázaro, G. Durisi, G. Liva // *IEEE Transactions on Communications*. — 2023.
66. *Choi, J.* On Multichannel Random Access for Correlated Sources / J. Choi // *IEEE Transactions on Communications*. — 2018. — Vol. 66, no. 8. — Pp. 3444–3454.
67. *Choi, J.* Local reliability aware random access for correlated sources in WSNs / J. Choi // *IEEE Transactions on Communications*. — 2017. — Vol. 66, no. 3. — Pp. 1153–1163.
68. *Chetot, L.* Active User Detection and Channel Estimation for Grant-Free Random Access with Gaussian Correlated Activity / L. Chetot, M. Egan, J. M. Gorce // *IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*. — 2023. — Pp. 1–6.
69. *Kalor, A. E.* Random access schemes in wireless systems with correlated user activity / A. E. Kalor, O. A. Hanna, P. Popovski // *IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. — 2018. — Pp. 1–5.
70. Stochastic resource optimization of random access for transmitters with correlated activation / C. Zheng, M. Egan, L. Clavier et al. // *IEEE Communications Letters*. — 2021. — Vol. 25, no. 9. — Pp. 3055–3059.

71. Stochastic Resource Allocation for Outage Minimization in Random Access with Correlated Activation / C. Zheng, M. Egan, L. Clavier et al. // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). — 2022. — Pp. 1635–1640.
72. *Agostini, P.* Sparse Superposition Coding with Bayesian Detection for Correlated Unsourced Random Access / P. Agostini, Z. Utkovski, S. S. Stańczak // In 2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. — 2021. — Pp. 1470–1476.
73. Massive random access with common alarm messages. / K. Stern, A. E. Kalør, B. Soret, P. Popovski // In 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). — 2019. — Pp. 1–5.
74. *Zhu, W.* Message Passing-Based Joint User Activity Detection and Channel Estimation for Temporally-Correlated Massive Access / W. Zhu, M. Tao, X. Yuan Y. Guan // *arXiv preprint arXiv:2210.12954*. — 2022.
75. *Mehta, R.* Throughput and resource optimization for adaptive coding-based random access networks with correlated sources / R. Mehta // *International Journal of Communication Systems*. — 2021. — Vol. 34, no. 1.
76. *Кингман, Дж.* Пуассоновские процессы / Дж. Кингман. — М.: МЦНМО, 2007. — С. 136.
77. *Toor, W. T.* Combined Access Barring Scheme for IoT Devices Using Bayesian Estimation / W. T. Toor, M. Alvi, M. Agiwal // *Electronics*. — 2020. — Vol. 9, no. 12.
78. *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.
79. *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.

80. *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.
81. *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.
82. *Burkov, A.* Arbitrarily Accurate Approximation of Numerical Characteristics of Stationary ALOHA Channels / A. Burkov, S. Shneer, A. Turlikov // *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. — 2021. — Pp. 1–8.
83. *Rivest, R.* Network control by Bayesian broadcast / R. Rivest // *IEEE Transactions on Information Theory*. — 1987. — Vol. 33, no. 3. — Pp. 323–328.
84. *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.
85. *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.
86. *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.
87. *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. Сажаяева.
88. *Сантало, Л.* Интегральная геометрия и геометрические вероятности. / Л. Сантало. — М.: Наука, Перевод с англ. / Под ред. Р.В. Амбарцумяна, 1983. — С. 360.
 89. Data delivery efficient spreading factor allocation in dense lorawan deployments / O. Gusev, A. Turlikov, S. Kuzmichev, N. Stepanov // In 2019 XVI International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems"(REDUNDANCY). — 2019. — Pp. 199–204.
 90. *Jia, Y.* LoRa-based WSNs construction and low-power data collection strategy for wetland environmental monitoring / Y. Jia // *Wireless Personal Communications*. — 2020. — Vol. 114, no. 2. — Pp. 1533–1555.
 91. On the application of IoT: Meteorological information display system based on LoRa wireless communication / H. T. Reda, P. T. Daely, J. Kharel, S. Y. Shin // *IETE Technical Review*. — 2018. — Vol. 35, no. 3. — Pp. 256–265.
 92. LoRa-Based Wireless Sensors Network for Rockfall and Landslide Monitoring: A Case Study in Pantelleria Island with Portable LoRaWAN Access / M. Ragnoli, A. Leoni, G. Barile et al. // *Journal of Low Power Electronics and Applications*. — 2022. — Vol. 12, no. 3. — P. 47.
 93. A survey on long-range wide-area network technology optimizations / F. S. D. Silva, E. P. Neto, H. Oliveira et al. // *IEEE Access*. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 106079–106106.
 94. *Седунов, Д. П.* Расчет параметров системы беспроводного сбора данных сети LoRaWAN / Д. П. Седунов, А. С. Жунусова, Ю. О. Зырянова // *Техника радиосвязи*. — 2021. — Т. 2, № 49. — С. 31–41.
 95. *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.

96. *Lee, J. S.* A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi / J. S. Lee, Y. W. Su, C. C. Shen // IECON 2007-33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. — 2007. — Pp. 46–51.
97. *Khan, M. A. A.* Comparison among short range wireless networks: Bluetooth, Zig Bee & Wi-Fi / M. A. A. Khan, M. A. Kabir // *Daffodil International University Journal of Science & Technology*. — 2016. — Vol. 11, no. 1.
98. A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications / M. Z. Chowdhury, M.T. Hossan, A. Islam, Y. M. Jang // *IEEE Access*. — 2018. — Vol. 6. — Pp. 9819–9840.
99. *Raza, U.* Low power wide area networks: An overview / U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2017. — Vol. 19, no. 2. — Pp. 855–873.
100. Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs / Q. M. Qadir, T. A. Rashid, N. K. Al-Salihi et al. // *IEEE Access*. — 2018. — Vol. 6. — Pp. 77454–77473.
101. *Шемчук, Ю.* LPWAN и другие беспроводные технологии / Ю. Шемчук // *СЕТИ*. — 2019. — Т. 1. — С. 55.
102. Overview of cellular LPWAN technologies for IoT deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT / K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, F. Meyer // 2018 IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (percom workshops). — 2018. — Pp. 197–202.
103. *Osman, N. I.* Simulation and modelling of LoRa and Sigfox low power wide area network technologies / N. I. Osman, E. B. Abbas // 2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE). — 2018. — Pp. 1–5.
104. Internet of mobile things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and supported mobility / W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel et al. // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2018. — Vol. 21, no. 2. — Pp. 1561–1581.
105. *Sinha, R. S.* A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT / R. S. Sinha, Y. Wei, S. H. Hwang // *ICT Express*. — 2017. — Vol. 3, no. 1. — Pp. 14–21.

106. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment / K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, F. Meyer // *ICT express*. — 2019. — Vol. 5, no. 1. — Pp. 1–7.
107. Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN / P. Levchenko, D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov // *Sensors*. — 2022. — Vol. 22, no. 24.
108. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios / M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, M. Zorzi // *IEEE Wireless Communications*. — 2016. — Vol. 23, no. 5. — Pp. 60–67.
109. *Reynders, B.* Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication / B. Reynders, W. Meert, S. Pollin // 23rd International Conference on Telecommunications (ICT). — 2016. — Pp. 1–6.
110. *Lavric, A.* SigFox Communication Protocol: The New Era of IoT? / A. Lavric, A. I. Petrariu, V. Popa // International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI). — 2019. — Pp. 1–4.
111. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things / A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W. M. Townsley // *Sensors*. — 2016. — Vol. 16, no. 9.
112. *Reynders, B.* Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication / B. Reynders, S. Pollin // Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT). — 2016. — Pp. 1–5.
113. *Vangelista, L.* Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation. / L. Vangelista // *IEEE signal processing letters*. — 2017. — Vol. 24, no. 12. — Pp. 1818–1821.
114. Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3 / F. Van den Abeele, J. Haxhibeqiri, I. Moerman, J. Hoebeke // *IEEE Internet of Things Journal*. — 2017. — Vol. 4, no. 6. — Pp. 2186–2198.
115. *Georgiou, O.* Low power wide area network analysis: Can LoRa scale? / O. Georgiou, U. Raza // *IEEE Wireless Communications Letters*. — 2017. — Vol. 6, no. 2. — Pp. 162–165.

116. *Kim, D. K.* A Model of Random Multiple Access in Unlicensed Spectrum Systems / D. K. Kim, G. D. Georgiev, N. V. Markovskaya // In 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — 2022. — Pp. 1–4.
117. *Seo, J. B.* Modeling and Online adaptation of ALOHA for low-power wide-area networks (LPWANs) / J. B. Seo, B. C. Jung, H. Jin // *IEEE Internet of Things Journal*. — 2021. — Vol. 8, no. 20. — Pp. 15608–15619.
118. Integration of LoRaWAN and 4G/5G for the Industrial Internet of Things / J. Navarro-Ortiz, S. Sendra, P. Ameigeiras, J. M. Lopez-Soler // *IEEE Communications Magazine*. — 2018. — Vol. 56, no. 2. — Pp. 60–67.
119. *Bankov, D.* On the limits of LoRaWAN channel access / D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov // International conference on engineering and telecommunication (EnT). — 2016. — Pp. 10–14.
120. LoRa beyond ALOHA: An investigation of alternative random access protocols / L. Beltramelli, A. Mahmood, P. Österberg, M. Gidlund // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. — 2020. — Vol. 17, no. 5. — Pp. 3544–3554.
121. Slotted aloha on lorawan-design, analysis, and deployment / T. Polonelli, D. Brunelli, A. Marzocchi, L. Benini // *Sensors*. — 2019. — Vol. 19, no. 4.
122. *El Fehri, C.* A New Schedule-Based Scheme for Uplink Communications in LoRaWAN / C. El Fehri, N. Baccour, I. Kammoun // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. — 2023.
123. A slotted transmission with collision avoidance for LoRa networks / Q. L. Hoang, H. P. Tran, W. S. Jung et al. // *Procedia Computer Science*. — 2020. — Vol. 177. — Pp. 94–101.
124. *Yapar, G.* Time-slotted ALOHA-based LoRaWAN scheduling with aggregated acknowledgement approach / G. Yapar, T. Tugcu, O. Ermis // 25th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). — 2019. — Pp. 383–390.
125. *Zorbas, D.* Design Considerations for Time-Slotted LoRa(WAN) / D. Zorbas // MaDeLoRa 2020: 1st Workshop on Massive LoRaDeployments: Challenges and Solutions. — 2020.

126. *Hu, Y.* Asynchronous Random Access Systems With Immediate Collision Resolution For Low Power Wide Area Networks / Y. Hu, H. Jin, J. B. Seo // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. — 2023. — Pp. 1 – 16.
127. *Bankov, D.* Mathematical model of LoRaWAN channel access with capture effect / D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov // IEEE 28th annual international symposium on personal, indoor, and mobile radio communications (PIMRC). — 2017. — Pp. 1–5.
128. *Khan, F. H.* Experimental evaluation of LoRaWAN in NS-3 / F. H. Khan, M. Portmann // In 2018 28th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). — 2018. — Pp. 1–8.

СПИСОК РИСУНКОВ

1.1	История развития систем СМД	13
1.2	Области использования систем ИВ	15
1.3	Проблемы, возникающие в системах ИВ с большим числом устройств	17
1.4	Пример изменения возраста информации от времени	21
1.5	Схематичное представление моделей с окружностью	32
1.6	Схематичное представление модели системы с потенциально неограниченным числом абонентов	34
1.7	Пример численного решения уравнения $\mu_n(k) = k\mu_s(k)$, когда система устойчива	36
1.8	Пример численного решения уравнения $\mu_n(k) = k\mu_s(k)$, когда система неустойчива	36
1.9	Среднее число повторных передач от параметра z (случай 1)	39
1.10	Среднее число повторных передач от параметра z (случай 2)	39
1.11	Среднее число повторных передач от параметра z (случай 3)	40
1.12	Среднее число повторных передач от интенсивности входного потока при различных значениях параметров алгоритма (a , b и c)	41
1.13	Средняя задержка от интенсивности входного потока при различных значениях параметров алгоритма (a , b и c)	42
1.14	Средний возраст информации от параметра z (случай 1)	43
1.15	Средний возраст информации от параметра z (случай 2)	43
1.16	Средний возраст информации от параметра z (случай 3)	44
1.17	Средний возраст информации от интенсивности входного потока при различных значениях параметров алгоритма (a , b и c)	45
2.1	Схематичное представление модели M_0	51
2.2	Схематичное представление модели M_2 при $Q = 4$	55
2.3	Марковская цепь для модели M_1 с $K + 1$ состояниями	57
2.4	Нижние оценки средней задержки от числа состояний Марковской цепи для модели M_1 , полученные при $\varepsilon = 0.1$ и трех значениях λ : $\lambda = 2$, $\lambda = 5.2$ и $\lambda = 10$	59
2.5	Верхние оценки и точное значение средней задержки для модели M_0 при $\varepsilon = 0.1$	60
2.6	Среднее число абонентов от интенсивности входного потока при $\varepsilon = 0.1$	61

2.7	Средняя задержка от интенсивности входного потока при $\varepsilon = 0.1$. . .	62
2.8	Средняя задержка от доли абонентов, покидающих систему, $\lambda = 10$. . .	63
2.9	Средняя задержка от интенсивности входного потока для моделей $M0, M1, M2$ и $M3, \varepsilon = 0.1$	64
2.10	Пример поведения возраста информации на интервале $[0, T]$ в синхронной системе $M D 1$	66
2.11	Пример поведения возраста информации на интервале $[0, T]$ в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА . . .	67
2.12	Средний возраст информации от интенсивности входного потока в синхронной системе $M D 1$ и в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА	67
2.13	Пример поведения возраста информации на интервале $[0, T]$ в системе с множественным выходом	69
2.14	Средняя задержка от интенсивности входного потока в системе с множественным выходом и в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА	69
2.15	Средний возраст информации от интенсивности входного потока в системе с множественным выходом и в системе СМД, основанной на алгоритме передачи данных АЛОНА	70
2.16	Сравнение зависимостей средней задержки и среднего возраста информации от интенсивности входного потока	71
3.1	Схематичное представление модели с появлением событий	74
3.2	Примеры различных состояний сенсора	75
3.3	Пример области, на которой бы располагались активные сенсоры при $n = 7$	78
3.4	Пример функции $\varphi(n)$ для зоны действия базовой станции, имеющей форму круга	80
3.5	Зависимости точного значения показателя $T(N)$ и его оценок $\hat{T}(N)$ и $\tilde{T}(N)$ от количества сенсоров при $\Lambda = 10$	82
3.6	Зависимости $\tilde{T}(N)$ при различных значениях Λ	83
3.7	Зависимости $\tilde{T}(\Lambda)$ при фиксированных значениях \tilde{N}_{opt}	84
3.8	Схематичное представление модели с «квадратными» событиями и постоянным расположением сенсоров	86

3.9	Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров для модели с «квадратными» событиями	88
3.10	Схематичное представление модели с «квадратными» событиями и случайным расположением сенсоров	89
3.11	Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров для модели с «круглыми» событиями при $r = a/2$	90
3.12	Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров для модели с «круглыми» событиями при $r = \sqrt{a^2/\pi}$	91
3.13	Расширение области появления событий (а – в модели с зоной действия базовой станции в форме круга, б – в модели с зоной действия базовой станции в форме квадрата	92
4.1	Классификация технологий, используемых в системах Интернета вещей	96
4.2	Архитектура сети, работающей по протоколу LoRaWAN	98
4.3	Передача данных в сетях LoRaWAN с разными классами устройств (а – класс А, б – класс В, в – класс С)	99
4.4	Схематичное представление модели системы мониторинга, построенной по технологии LoRa	101
4.5	Схематичное представление упрощенных моделей системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, для различных значений SF	102
4.6	Схематичное представление упрощенной модели с окружностью для системы мониторинга, построенной по технологии LoRa	106
4.7	Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров в системе, полученные путем имитационного моделирования при $\lambda = 3$, $\varepsilon = 0.1$, $K = 5$ и двух значениях t ($t = 100$ и $t = 10000$)	107
4.8	Сравнение зависимостей показателей от числа сенсоров при одинаковых параметрах системы: $\lambda = 3$, $\varepsilon = 0.1$, $K = 5$ и $K = 10$ (а – вероятность доставки информации о событии, б – среднее число успешно переданных сообщений)	109

- 4.9 Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров в системе, полученные путем имитационного моделирования и теоретического расчета при $K = 5$, $\varepsilon = 0.1$ и разных значениях λ : $\lambda = 5$ и $\lambda = 15$ 111
- 4.10 Структура моделирования системы мониторинга, построенной по технологии LoRa, с использованием симулятора ns-3 112
- 4.11 Зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров в системе, полученные путем имитационного моделирования в симуляторе ns-3 и теоретического расчета по формуле (4.10) при $K = 5$, $\varepsilon = 0.1$ и $\lambda = 3$ 113

СПИСОК ТАБЛИЦ

1	Соответствие проблем и показателей качества работы систем Интернета вещей	19
2	Основные показатели качества работы систем Интернета вещей, основанных на случайном множественном доступе.	23
3	Результаты сравнительного анализа работ, в которых исследуются системы Интернета вещей с зависимыми источниками	28
4	Обобщенная система допущений	29
5	Решенные и нерешенные задачи в рамках моделей с зависимыми источниками	46
6	Основные характеристики технологий LoRa и SigFox	97
7	Пример применения методики определения подоптимального числа сенсоров для системы мониторинга, построенной по технологии LoRa	104

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт об использовании от ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
 «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
 (ГУАП)

Санкт-Петербург

№ _____

УТВЕРЖДАЮ
 Ректор ГУАП,
 Доктор экономических наук, профессор



Антохина Ю. А.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы
 Борисовской Анны Владимировны
 на тему «Модели систем Интернета вещей со случайным доступом
 и зависимыми источниками»

Комиссия в составе:

Председателя В.Ф. Шишлакова – проректора по образовательным технологиям и инновационной деятельности;

Членов комиссии:

А.Р. Бестугина – директора института радиотехники и инфокоммуникационных технологий;

А.В. Рабина – директора центра координации научных исследований

составила акт о том, что результат диссертационной работы Борисовской А. В. «Модели систем Интернета вещей со случайным доступом и зависимыми источниками»:

– обобщенная система допущений для моделей систем интернета вещей со случайным доступом и зависимыми источниками

используется в научно-исследовательской деятельности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», в частности, в научно-исследовательской работе по гранту Российского научного фонда №22-19-00305 «Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом абонентов» и в научно-исследовательской работе от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Введенные классы моделей систем со случайным доступом и зависимыми источниками (модели с появлением абонентов и модели с появлением событий) и предложенная для них обобщенная система допущений позволяют описывать и сравнивать между собой системы межмашинной связи, в которых имеется зависимость между передаваемыми данными.

Председатель комиссии,

проректор по образовательным технологиям
и инновационной деятельности, д.т.н., проф.

 В.Ф. Шишлаков

Члены комиссии:

директор института радиотехники
и инфокоммуникационных технологий, д.т.н., проф.

 А.Р. Бестугин

директор центра координации научных
исследований, д.т.н., доц.

 А.В. Рабин

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт об использовании от АО «Концерн «Гранит-Электрон»

Акционерное Общество «Корпорация «Тактическое Ракетное Вооружение»



Акционерное общество
«Концерн «Гранит-Электрон»
(АО «Концерн «Гранит-Электрон»)

Joint Stock Company "Concern "Granit-Electron"
(JSC "Concern "Granit-Electron")

Санкт-Петербург

№ _____

УТВЕРЖДАЮ

Ученый секретарь

АО «Концерн «Гранит-Электрон»

Ю.А. Ямщиков

2024 г.



А К Т

**об использовании результатов диссертационной работы
Борисовской Анны Владимировны
на тему «Модели систем интернета вещей со случайным доступом и
зависимыми источниками», представляемой
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Комиссия в составе:

Председателя К.В. Лапшина – заместителя начальника научно-координационного центра

и членов комиссии:

С.Г. Толмачева – начальника научно-исследовательской лаборатории обеспечения инновационных разработок

В.Г. Пушина – начальника информационно-технической лаборатории

составила настоящий акт об использовании научных результатов, полученных в диссертационной работе Борисовской А.В., а именно модели для построения верхней и нижней оценок средней задержки в системе со случайным доступом, зависимыми источниками и множественным выходом абонентов из системы, а также способ определения среднего возраста информации в системе со случайным доступом, зависимыми источниками и множественным выходом абонентов из

системы и исследование зависимости этого показателя от интенсивности входного потока в опытно-конструкторских работах АО «Концерн «Гранит-Электрон».

Проведенные в рамках ОКР испытания показали, что полученные автором результаты могут быть использованы при выборе параметров систем Интернета вещей для повышения качества их работы, что позволяет повысить эффективность проектирования изделий.

Указанные результаты диссертационной работы имеют существенное значение для развития исследований, проводимых АО «Концерн «Гранит-Электрон», и могут быть использованы для повышения ТТХ перспективных изделий разработки АО «Концерн «Гранит-Электрон».

Председатель комиссии:

Заместитель начальника научно-координационного центра

К.В.Лапшин

Члены комиссии:

Начальник научно-исследовательской лаборатории обеспечения инновационных разработок

С.Г.Толмачев

Начальник информационно-технической лаборатории

В.Г.Пушин



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт об использовании от ООО «НПО ПКРВ»



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Научно-производственное объединение
программные комплексы реального времени»

Юридический адрес: Пресненская наб., д. 8, стр. 1, эт. 44, пом. 441М, оф. 7, Москва, 123112
Почтовый адрес: Банный пер., д. 9, Москва, 129110
e-mail: info@pro-pkrv.ru, тел.: +7 (495) 921-01-27, факс: +7 (491) 243-43-90 (доб.137), +7 (495) 221-05-50 (доб. 0792)
ОКПО 67611629, ОГРН 1107154016529, ИНН/КПП 7105509736/770301001

№ _____
на _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального
директора по разработке
ООО «НПО ПКРВ»
Рыжов А.Ю.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Борисовской Анны Владимировны
на тему «Модели систем интернета вещей со случайным доступом и
зависимыми источниками»

Комиссия в составе:

Председателя

Серпикова А.Н. – Заместителя директора по разработке,

и членов комиссии:

Ваганова М.А. – д-ра техн. наук, Начальника Управления разработки РЭС,

Белозерова А.А. – Начальника отдела разработки ПО

составила настоящий акт об использовании научных результатов,
полученных в диссертационной работе Борисовской А.В., а именно модели и
методики, позволяющих формулировать и решать оптимизационные задачи для
выбора числа сенсоров в системах мониторинга, в которых зависимость
передаваемых данных возникает за счет обнаружения разными сенсорами
одного и того же события, в опытно-конструкторских работах (ОКР) ООО «НПО

ПКРВ».

Проведенные в рамках ОКР испытания показали, что разработанные автором модель и методика позволяют выбирать число сенсоров для систем мониторинга, основанных на технологии LoRa, на стадии проектирования системы.

Указанные результаты диссертационной работы имеют существенное значение для развития исследований в области систем интернета вещей и могут быть использованы для повышения эффективности функционирования систем, разработанных ООО «НПО ПКРВ» в данной предметной области.

Председатель комиссии:

Заместитель директора по разработке

Серпиков А.Н.

Члены комиссии:

Начальник Управления
разработки РЭС, д-р техн. наук

Ваганов М.А.

Начальник отдела разработки ПО

Белозеров А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023619390

Программа для оценки вероятности доставки информации о событии в сенсорных сетях со случайным доступом и зависимыми источниками

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" (RU)*

Авторы: *Борисовская Анна Владимировна (RU), Сажжаева Софья Андреевна (RU)*

Заявка № **2023618956**Дата поступления **11 мая 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **11 мая 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e6bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов