

На правах рукописи



Ларионов Андрей Алексеевич

**Технология построения и методы исследования систем
управления безопасностью дорожного движения на
основе широкополосных беспроводных сетей и
радиочастотной идентификации**

Специальность 05.13.15 —
«Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Вишневский Владимир Миронович

Официальные оппоненты: **Кучерявый Евгений Андреевич**,
доктор технических наук, доцент,
НИУ «Высшая школа экономики», Москов-
ский институт электроники и математики им.
А.Н.Тихонова,
профессор

Степанов Михаил Сергеевич,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего образо-
вания «Московский технический университет
связи и информатики»,
доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего образова-
ния «Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций им. проф.
М.А. Бонч-Бруевича»

Защита состоится 4 апреля 2022 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.226.03 при Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук по адресу: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПУ РАН и на сайте www.ipu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 65, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.226.03.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Телефон для справок: +7 (495) 334-89-10.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.226.03,
канд. техн. наук



Кулинич Александр Алексеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Системы идентификации автомобилей и регистрации нарушений правил дорожного движения играют важную роль в управлении безопасностью на дорогах, способствуют снижению смертности и большого материального ущерба при авариях. Существующие системы основаны на видео- или фото-идентификации номеров транспортных средств (ТС). Работе этих систем могут препятствовать загрязнение при плохих погодных условиях или намеренное скрытие номерного знака. Из-за этого, по сведениям ГИБДД, эффективность систем идентификации автомобилей может падать ниже 50 %. Это определяет актуальность тематики диссертации, направленной на исследование и создание новых распределенных компьютерных систем безопасности на дорогах, использующих альтернативные источники идентификации транспортных средств, а именно — технологию радиочастотной идентификации (RFID). Постановлением Правительства РФ предусмотрено создание таких систем в 2022 – 2024 гг. в пилотных зонах в Москве, Санкт-Петербурге и Казани.

При использовании RFID-технологии радиометка размещается в номерном знаке или под лобовым стеклом автомобиля. Находясь в зоне действия RFID-считывателя, она передает ему свой уникальный идентификатор. В пассивных системах RFID УВЧ-диапазона 860 – 960 МГц метки не обладают собственными источниками энергии и могут быть идентифицированы считывателями на расстоянии порядка 10 – 20 метров. Эффективность радиочастотной идентификации существенно зависит как от особенностей окружения, распространения радиосигналов и характеристик антенн, так и от параметров протокола международного стандарта EPC Class 1 Generation 2 (EPC Gen2), используемого для связи между считывателем и метками. Хотя анализу производительности систем радиочастотной идентификации в различных приложениях посвящено значительное количество работ, тематика применения RFID для идентификации автомобилей остается слабо изученной. В диссертации предложены и исследованы новые математические и имитационные модели системы радиочастотной идентификации ТС, учитывающие как параметры распространения радиосигналов, так и всевозможные настройки RFID-считывателей и параметров протокола.

Для работы автоматической компьютерной системы безопасности необходимо соединить точки идентификации ТС с центрами обработки данных компьютерными сетями, по которым оперативно передается информация о распознанных номерах автомобилей. Проводные решения оказываются не всегда доступными по техническим или экономическим причинам, поэтому особый интерес представляют широкополосные беспроводные сети. Для анализа производительности беспроводных сетей часто

применяются стохастические методы, но из-за высокой сложности их зачастую трудно применять для анализа больших многошаговых сетей. Одним из наиболее распространённых методов исследований являются сети массового обслуживания (СеМО), в которых каналы связи и маршрутизаторы моделируются обслуживающими приборами с очередями. Хорошую точность при описании реальных систем показывают СеМО с марковским входящими потоками (МАР) и распределением времени обслуживания фазового типа (РН). Хотя системы МАР/РН/1/Ν хорошо исследованы, их применение для построения открытых сетей массового обслуживания, моделирующих реальные беспроводные сети, мало изучено в современной литературе. Из-за высокой сложности моделей значительный интерес представляют методы быстрого получения приближенных оценок их характеристик, разработанные в настоящей работе.

Системы управления RFID-считывателями, используемые в системах безопасности на автодорогах, обладают рядом особенностей. Во-первых, они должны обеспечивать непрерывный сбор данных с большого количества RFID-считывателей в реальном времени. Во-вторых, необходимо объединять данные о прочитанных RFID-метках с данными от камер видеонаблюдения, радаров и другими датчиками. Наконец, для различных служб и ведомств система должна предоставлять разные уровни доступа. Перечисленные особенности обуславливают необходимость разработки новой распределенной системы управления считывателями, предложенной в диссертации. Таким образом, высокая практическая потребность в разработке новых систем управления безопасностью дорожного движения на основе RFID-технологии и широкополосной беспроводной связи и особенности их реализации определяют актуальность и новизну диссертационной работы.

Исследованиям в области проектирования, разработки и применения технологии RFID, а также исследованиям широкополосных беспроводных сетей с использованием методов теории массового обслуживания, посвящен ряд работ, среди которых следует особо отметить работы отечественных и зарубежных учёных: В.М. Вишневецкий, А.Н. Дудин, П.В. Никитин, Е.А. Кучерявый, Р.В. Киричек, К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака, В.В. Рыков, Р.Н. Минниханов, D. Lucantoni, N. Abramson, L.G. Roberts, M.F. Neuts, G. Horvath, G. Bianchi, H. Okamura, P. Buchholz, M. Telek, J.C. Strelen, L. Bodrog, D. Aldous, K.V.S. Rao, C. Floerkemeier, C. Wang, E. Vahedi, R. Nelson, T.S. Rappaport, S. Singh, J. Kriege, P. Djukic, S. Valaee, J.E. Hoag и др.

Объектом исследования являются системы радиочастотной идентификации транспорта и компьютерные сети в их составе.

Предметом исследования являются методы анализа и алгоритмы расчета характеристик производительности систем радиочастотной идентификации, а также методы построения и исследования компьютерных

сетей и систем управления распределенными системами идентификации транспорта.

Целью данной работы является создание комплекса моделей для анализа производительности систем радиочастотной идентификации ТС и широкополосных беспроводных сетей, а также разработка и экспериментальное внедрение системы управления, сбора и передачи данных с RFID-считывателей в центр обработки данных. В диссертационной работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработка и исследование комплекса аналитических и имитационных моделей для анализа и оптимизации основных характеристик систем радиочастотной идентификации транспортных средств.
2. Разработка методики оценки производительности широкополосных беспроводных сетей, использующихся для передачи данных от RFID-считывателей в центры обработки данных, на основе методов теории массового обслуживания и марковских случайных процессов.
3. Разработка архитектуры и реализация распределенной компьютерной системы управления и сбора данных с RFID-считывателей, ее экспериментальное внедрение и проведение испытаний.

Научная новизна:

1. Впервые предложена и исследована стохастическая модель системы радиочастотной идентификации ТС, учитывающая скорость движения RFID-меток, расположенных на номерных знаках автомобилей, а также различные сценарии проведения циклического опроса и сбора данных с меток.
2. Разработан комплекс новых аналитических и имитационных моделей для анализа вероятности идентификации ТС, учитывающих особенности логического и физического уровней протокола стандарта EPC Class 1 Gen.2, и особенности распространения радиосигналов между RFID-меткой и считывателем.
3. Предложена новая методика моделирования многошаговых беспроводных сетей с помощью тандемных сетей массового обслуживания, учитывающая особенности трафика и интерференции в каналах связи.
4. Разработан оригинальный метод вычисления оценок характеристик многофазных систем массового обслуживания большой размерности с коррелированными входными потоками и распределениями обслуживания фазового типа.
5. Разработана архитектура и реализована новая распределенная компьютерная система управления RFID-считывателями, предназначенная для организации сбора данных об идентифицированных транспортных средствах.
6. Проведена обработка экспериментальных данных, полученных

при опытных внедрениях разработанной распределенной компьютерной системы радиочастотной идентификации на автодорогах в г. Казань и на ЦКАД в Московской области, показавшая высокое совпадение с теоретическими результатами диссертации.

Область исследования. Диссертационная работа соответствует содержанию специальности 05.13.15, а именно следующим пунктам специальности:

- Разработка научных основ создания вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, исследования общих свойств и принципов функционирования вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.
- Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик.
- Разработка научных методов и алгоритмов организации параллельной и распределенной обработки информации, многопроцессорных, многомашинных и специальных вычислительных систем.
- Разработка научных методов и алгоритмов создания структур и топологий компьютерных сетей, сетевых протоколов и служб передачи данных в компьютерных сетях, взаимодействия компьютерных сетей, построенных с использованием различных телекоммуникационных технологий, мобильных и специальных компьютерных сетей, защиты компьютерных сетей и приложений.

Практическая значимость. Аналитические и имитационные модели и методы, предложенные в диссертации, могут эффективно использоваться для оценки производительности систем радиочастотной идентификации автомобилей и широкополосных беспроводных сетей. Распределенная система управления считывателями и программное обеспечение, описанные в работе, использовались в трех экспериментальных внедрениях на автодорогах в г. Казань и Московской области. Практическая значимость диссертационной работы подтверждается актами о внедрении, полученными от Государственного бюджетного учреждения «Безопасность дорожного движения» (г. Казань) и ПАО «Микрон».

Результаты работы также были использованы в исследованиях, проводимых по следующим грантам:

- Контракт с Министерством образования и науки РФ № 14.514.11.4071 в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».
- Соглашение с Министерством образования и науки РФ о предоставлении субсидии от 22.10.2014 г. № 14.613.21.0020 в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по

приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014-2020 годы».

- Грант Российского научного фонда (РНФ) № 16-49-02021.
- Грант Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 13-07-00737.
- Грант Российского фонда фундаментальных исследований (международный проект РФФИ – БРФФИ) № 14-07-90015.
- Грант Российского фонда фундаментальных исследований (международный проект РФФИ – БРФФИ) № 16-57-00130.

Методология и методы исследования. Для решения задач, поставленных в диссертации, использовались методы теории вероятностей, математической статистики, теории случайных процессов, теории массового обслуживания, методы дискретно-событийного имитационного моделирования. При разработке программного обеспечения использовались методы многопоточного программирования, методы разработки распределенных систем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Стохастическая модель системы радиочастотной идентификации ТС, учитывающая скорость движения RFID-меток, расположенных на номерных знаках автомобилей, а также различные сценарии проведения циклического опроса и сбора данных с меток.
2. Новый комплекс аналитических и имитационных моделей для анализа вероятности идентификации ТС, учитывающих особенности логического и физического уровней протокола стандарта EPC Class 1 Gen.2, и особенности распространения радиосигналов между RFID-меткой и считывателем.
3. Новая методика моделирования многошаговых беспроводных сетей с помощью тандемных сетей массового обслуживания, учитывающая особенности трафика и интерференции в каналах связи.
4. Метод вычисления оценок характеристик многофазных систем массового обслуживания большой размерности с коррелированными входными потоками и распределениями обслуживания фазового типа.
5. Архитектура и реализация новой распределенной компьютерной системы управления RFID-считывателями, предназначенная для организации сбора данных об идентифицированных транспортных средствах.
6. Результаты экспериментальных внедрений разработанной распределенной компьютерной системы радиочастотной идентификации транспортных средств на автодорогах в г. Казань и в Московской области.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих математических моделей, сравнением результатов аналитического и имитационного моделирования. Результаты анализа вероятности идентификации автомобилей согласуются с результатами, полученными в ходе реальных экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: 12th Annual IEEE International conference on RFID 2018 (IEEE RFID 2018; США, Орландо); 11th Annual IEEE International conference on RFID 2017 (IEEE RFID 2017; США, Финикс); международный форум Kazan Digital Week 2020 (Казань); International conference on Advances in Applied Probability and Stochastic Processes 2019 (ICAAP & SP 2019; Индия, Коттаям); 13-е и 12-е Всероссийские совещания по проблемам управления (ВСПУ 2019, ВСПУ 2014; Москва, ИПУ РАН); 20-я, 18-я, 16-я и 15-я Международные конференции им. А.Ф. Терпугова Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ 2021, ИТММ 2019, ИТММ 2017, ИТММ 2016; Россия); 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (IEEE AICT 2017; Москва, ИПУ РАН); 21-я, 20-я, 19-я, 18-я и 17-я Международные Конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN 2018, DCCN 2017, DCCN 2016, DCCN 2015, DCCN 2013; Москва); 7th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars-Fall 2014; Санкт-Петербург); 2012 International Conference on RFID-Technology and Applications (IEEE RFID-TA 2012; Франция, Ницца); 10-я и 5-я Всероссийская конференция «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (ИТТММ 2020, ИТТММ 2015; Москва, РУДН).

Личный вклад. Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. В работах [1–4, 6, 9–15, 19, 20] автору принадлежит участие в постановке задач, разработка методов и алгоритмов и реализация комплекса программ. В работах [5, 8, 16–18] — обзор литературы и разработке численных алгоритмов. Работа [7] выполнена без соавторов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 20 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 15 — в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, 1 — в издании, индексируемом РИНЦ.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель,

ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, приводится краткое содержание разделов диссертационной работы.

В **первой главе** подробно рассматривается структура распределенной компьютерной системы радиочастотной идентификации транспорта, описываются основные задачи и проблемы, возникающие при ее проектировании и построении, анализе производительности и поиске способов увеличения эффективности. Приводится краткое описание технологии UHF RFID стандарта EPC Class 1 Generation 2 (ISO 18006-C), а также обзор современных исследований в областях анализа производительности, способов применения и разработки систем радиочастотной идентификации. Дается краткое описание метода доступа DCF в IEEE 802.11 и приводится обзор работ, посвященных исследованию и моделированию задержек в каналах беспроводных сетей. Приводится описание многофазной системы массового обслуживания, которая используется в работе для моделирования многошаговой беспроводной сети, даются определения MAP-потоков и РН-распределений и приводится обзор исследований сетей массового обслуживания с MAP-потоками и РН-распределениями. Приводится краткое описание и обзор методов их восстановления по известным статистическим данным. В конце раздела приводится обзор исследований и стандартов в области разработки компьютерных систем управления и промежуточного программного обеспечения систем радиочастотной идентификации.

Вторая глава посвящена исследованию производительности системы радиочастотной идентификации движущихся автомобилей. Рассматривается два способа идентификации: по значению EPCID метки, и по паре значений EPCID и TID. Автомобиль считается идентифицированным, если хотя бы одна метка была успешно прочитана хотя бы один раз. В § 1 приводится описание структуры исследуемой системы радиочастотной идентификации.

В § 2 приводится первое приближение для расчета вероятности успешной идентификации движущейся со скоростью v метки:

$$P_t = 1 - (1 - (1 - 2^{-Q})^{N_t - 1} (1 - p_e)^B)^{N_r},$$

где 2^Q — число слотов в раунде опроса, N_t — среднее число меток, принимающих участие в раунде, p_e — средняя вероятность битовой ошибки (BER), B — общее число бит в ответах метки, $N_r = L/(v\tau)$ — среднее число раундов, в которых успевает принять метка, L — средняя длина отрезка дороги, на котором метка получает достаточно энергии, v — скорость движения метки, а τ — средняя длительность раунда инвентаризации. Чем выше длительность символов в командах считывателя и ответах метки, тем ниже BER p_e и выше средняя длительность раунда τ . Реальное значение BER

$p_e(t)$, как и величина L , меняются со временем, так как из-за эффекта Доплера канал оказывается зависимым от времени.

В § 3 исследуется зависимость максимальной длительности раундов и числа раундов, в которых принимает участие метка, от параметров протокола EPC Gen.2 (Tagi, M, Q и другие). Показано, что длительности раундов инвентаризации меняются от 700 микросекунд до 400 миллисекунд в зависимости от настроек протокола. Как следствие, теоретически возможное число раундов, в которых метка может передать свой идентификатор, меняется в зависимости от настроек и скорости движения от 1 до 400.

В § 4 исследуются затухания прямого и отраженного меткой радиосигналов с использованием двухлучевой модели распространения. При этом учитываются поляризация, диаграммы и коэффициенты усиления антенн, потери при отражении от дороги, потери из-за различных поляризаций, потери на модуляции отраженного сигнала. Из-за эффекта Доплера мощности сигналов и величина BER оказываются сильно зависимыми от времени, прошедшего со включения считывателя. В § 4 приводятся результаты аналитического расчета величин затухания, BER и мощностей принятых сигналов, а также описываются области, в которых метка получает достаточно энергии для работы.

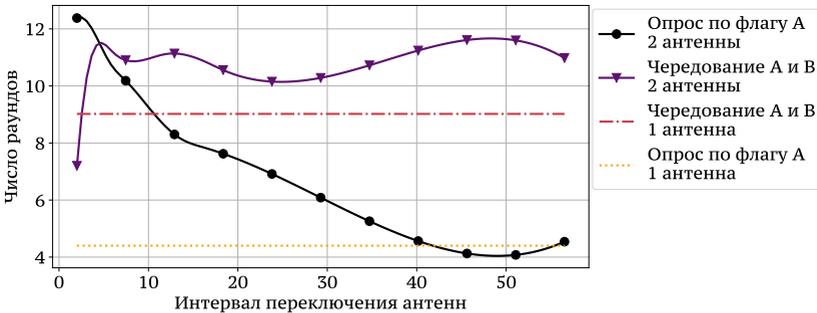


Рис. 1 — Число раундов, в которых принимает участие метка

В § 5 приводятся численные результаты, полученные с помощью имитационного моделирования. В имитационной модели учитываются форматы всех команд и ответов, с высокой точностью рассчитываются длительности кадров, мощности сигналов, моделируются отключения питания, переключения антенн и смены сессий опроса меток. Сначала приводятся оценки числа раундов N_r , в которых успевает принять участие метка (см. рис. 1), в зависимости от частоты переключения антенн и порядка изменений флага сессии в опросе. Затем приводятся результаты расчета вероятности идентификации отдельных меток в передних и

задних номерах при различных скоростях движения автомобилей и настройках считывателя. Приводится сравнение результатов, полученных с учетом эффекта Доплера и без него, из которых следует, что этот эффект оказывает существенное влияние на вероятность идентификации, особенно при высоких скоростях движения меток. Также получены результаты расчета вероятности успешной идентификации автомобиля по любой из меток, см. рис. 2. Численные эксперименты показывают, что система обладает достаточно высокой эффективностью даже для быстро движущихся автомобилей, когда используются не самые надежные, но и не самые быстрые настройки протокола. При идентификации по EPCID наилучший результат дает использование кода Миллера восьмого порядка ($M=8$) и $T_{ari} = 12,5$ мкс, а при идентификации по паре EPCID и TID — код Миллера четвертого порядка ($M=4$) и такое же значение T_{ari} .

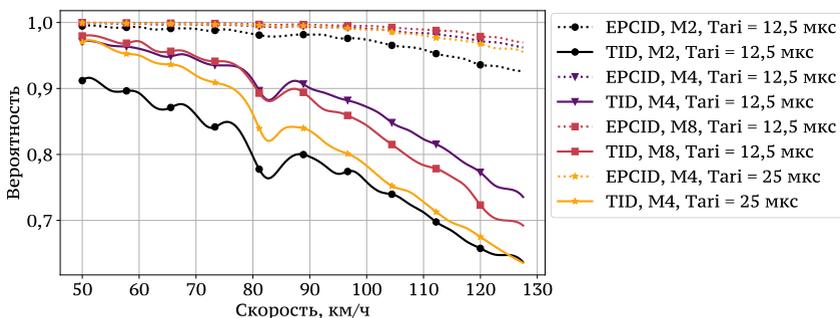


Рис. 2 — Вероятность успешной идентификации автомобиля

В **третьей** главе представлена аналитическая модель системы радиочастотной идентификации, позволяющая быстро находить оценки вероятности идентификации мобильной метки при периодических сменах флагов опроса и сброса питания. В § 1 определяются модельные считыватель и метка, вводятся допущения, использованные в модели, в частности — о постоянстве битовой ошибки BER и размере области работы меток, а также о том, что считыватель не передает повторно команды ASK, Req_Rn или Read при ошибках в ответах меток. В § 2 главы 3 определяются закон движения меток $x(t)$, функция изменения числа меток в области чтения $f_N(t) = |\{i : a_i \leq t \leq a_i + T_L\}|$, где a_i — момент входа i -й метки в область чтения, T_L — время нахождения метки в области чтения, вводятся понятия спецификации раунда и сценария работы считывателя, и приводится формальная постановка задачи. Законы движения меток определяются таким образом, чтобы существовало \bar{N} — максимальное число меток в области чтения.

Определение 1. *Спецификацией раунда* будем называть пару значений

опрашиваемого флага и признака сброса питания (X, e) , которую будем сокращенно обозначать символом $\alpha \stackrel{\text{def}}{=} X^e$. *Сценарием работы считывателя* $\alpha = \alpha_1\alpha_2 \dots \alpha_R$ будем называть последовательность спецификаций раундов конечной длины R .

Сценарий работы считывателя определяет периодичность сбросов питания и смены флагов опроса. Считается, что считыватель повторяет свой сценарий в бесконечном цикле.

Задача 1. Пусть известны законы движения меток $x_i(t) \equiv x(t - t_i)$, вероятность битовой ошибки в передаче ответов β и сценарий работы считывателя $\alpha = \alpha_1\alpha_2 \dots \alpha_R$, а также размеры и длительности команд считывателя и ответов меток. Пусть также для идентификации меток требуется только EPCID (или комбинация EPCID и TID). Требуется найти вероятность, с которой каждая метка будет успешно идентифицирована.

Для решения задачи 1 предлагается описывать все изменения, происходящие в системе, в виде композиции пяти элементарных операций: проведения считывателем опроса меток, смены флага опроса меток, сброса питания, добавления и удаления метки из области чтения. Рассматриваются два неоднородных марковских случайных процесса: $\{\eta_r\}$, моделирующий число *активных* меток в системе (то есть меток, участвующих в раундах), и двумерный процесс $\{\gamma_r\}$, описывающий число активных меток и состояние выделенной метки. Первый процесс позволяет найти оценку длительностей раундов, второй — вычислить вероятность успешной передачи идентификатора выделенной меткой. Оба процесса — дискретные, их состояния меняются между раундами опроса. Матрицы переходных вероятностей D_1, D_2, \dots, D_R процесса $\{\eta_r\}$ и C_1, C_2, \dots, C_R процесс $\{\gamma_r\}$ определяются числом меток, участвующих в текущем и следующем раундах, и спецификациями этих раундов.

В § 3 главы 3 приводится формула для оценки вероятности $P_n(m)$ (ровно m из n участвующих в раунде меток ответят на команду АСК), и приближенная формула для оценки длительности раунда $\tau_r(n)$, в котором участвует n меток:

$$\tau_r(n) = N_s \sum_{i=0}^2 p_i(n)t_i + e_r T_{\downarrow}, \quad (1)$$

где $p_i(n), t_i$ — вероятности и длительности слотов без ответа ($i = 0$), слотов с успешной передачей идентификатора ($i = 1$) и слотов с ошибками или коллизиями ($i = 2$), $e_r = 1$, если после раунда считыватель отключает питание на время T_{\downarrow} . Средняя длительность раунда при известном

распределении числа участвующих меток π определяется как математическое ожидание

$$\tau_r = \sum_{i=0}^{\bar{N}} \pi_i \tau_r(i). \quad (2)$$

Также приводится формула для расчета максимальной длительности раунда τ_{max} .

§ 4 главы 3 посвящен проблеме нахождения оценок длительностей раундов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_R$. Для этого по начальной оценке (полученной, например, исходя из максимальной длительности раундов τ_{max}) и сценарию работы считывателя α строится *размеченный сценарий* $\tilde{\alpha} = \tilde{\alpha}_1 \tilde{\alpha}_2 \dots \tilde{\alpha}_R$, символы которого имеют вид $\tilde{\alpha}_r = [\frac{N_r}{\Delta_r^-} X \frac{e_r}{\Delta_r^+}]$, где $N_r = f(\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_{r-1})$ — число меток в начале r -го раунда, а Δ_r^- и Δ_r^+ — число покидающих и поступающих в раунде меток. Зная последовательные спецификации $\tilde{\alpha}_r$ и $\tilde{\alpha}_{r+1}$, можно описать матрицу D_r вероятностей переходов процесса η_r в виде произведения матриц элементарных операций U_N^∇ (проведение опроса с N активными метками), U_N^\times (смена флага опроса), U_N^\downarrow (отключение питания), U_N^+ (добавление метки), U_N^- (удаление метки). В произведении $D_r = U_1 U_2 \dots U_l$ самый левый множитель имеет вид $U_{N_r}^\nabla$, остальные — в зависимости от значений N_r, N_{r+1} и e_r . Конкретный вид матриц U_N и способов построения матриц D_r , а также примеры описаны в § 4 главы 3.

Так как считыватель повторяет сценарий своей работы в цикле, делается допущение о том, что аналогично повторяется и размеченный сценарий, то есть после раунда со спецификацией $\tilde{\alpha}_R$ начинается раунд $\tilde{\alpha}_1$. Тогда для распределения вероятностей $\mathbf{p}^{(r)}$ процесса $\{\eta_r\}$ перед $(r + R)$ -м шагом выполняется соотношение $\mathbf{p}^{(r+R)} = \mathbf{p}^{(r)} D_r D_{r+1} \dots D_R D_1 \dots D_{r-1}$. Подпроцесс $\{\eta_i^{[r]}\}_{i=0}^\infty$, $\eta_i^{[r]} = \eta_{r+Ri}$, является однородным марковским с матрицей переходных вероятностей $\tilde{D}_r = D_r D_{r+1} \dots D_R D_1 \dots D_{r-1}$. Для всевозможных подпроцессов $\{\eta_i^{[r]}\}$, $r = 1, 2, \dots, R$ можно вычислить стационарные вероятности $\pi^{(r)}$. Вероятности $\pi^{(1)}$ можно найти как решение системы:

$$\begin{cases} \pi^{(1)} \tilde{D}_1 = \pi^{(1)}, \\ \sum_{n=0}^{\bar{N}} \pi_n^{(1)} = 1, \end{cases}$$

а вероятности $\pi^{(r)}$, $r = \overline{2, R}$ можно вычислить как $\pi^{(r)} = \pi^{(r-1)} D_{r-1}$.

С помощью найденных распределений числа активных меток $\pi^{(r)}$ и формул для вычисления оценок длительностей раундов (1), (2) вычисляются новые оценки длительностей раундов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_R$. Процесс повторяется итерационно до тех пор, пока либо оценки длительностей раундов не перестают меняться более, чем на ϵ , либо не истечет максимальное число итераций алгоритма. Если исходный сценарий слишком короткий, то при

построении расмеченного сценария $\tilde{\alpha}$ используется не сам сценарий α , а его кратное повторение вида $\alpha\alpha\dots\alpha$. Это позволяет учесть изменения числа меток в области чтения, происходящие медленнее, чем смена раундов.

В § 5 главы 3 описывается построение и анализ двумерного неоднородного марковского случайного процесса $\{(\eta_r^{[r_0]}, \phi_r^{[r_0]})\}$, моделирующего прохождение области чтения выделенной меткой, поступившей в область чтения в раунде r_0 . Компонента $\phi_r^{[r_0]}$ определяет состояние выделенной метки: $\phi_r^{[r_0]} = 0$, если она неактивна, $\phi_r^{[r_0]} = 1$, если метка активна и $\phi_r^{[r_0]} = 2$, если метка хотя бы один раз успешно передала свой идентификатор, это состояние является поглощающим. Процесс является конечным и содержит Q_{r_0} переходов, где Q_{r_0} — число раундов, в течение которых наблюдаемая метка находится в области действия считывателя. Тогда вероятность успешной идентификации выделенной метки можно выразить как

$$P_X = \sum_{r \in \mathfrak{R}} p_r^{[a]} \mathbb{P}\{\phi_{Q_r}^{[r]} = 2\}, \quad (3)$$

где $p_{r_0}^{[a]} = \frac{\tau_{r_0}}{\sum_{r \in \mathfrak{R}} \tau_r}$ — вероятность поступления выделенной метки в r_0 -м раунде, а $\mathfrak{R} = \{r \mid r \in [1, R], \Delta_{r-1}^+ > 0\}$ — множество номеров раундов, непосредственно перед которыми в систему поступали новые метки.

Определяется одномерный случайный процесс $\{\gamma_r^{[r_0]}\}$, состояния которого взаимно однозначно соответствуют состояниям двумерного процесса $\{(\eta_r^{[r_0]}, \phi_r^{[r_0]})\}$. Состоянию компоненты $\phi_r^{[r_0]} = 2$ исходного процесса (выделенная метка идентифицирована) соответствует поглощающее состояние $\gamma_r^{[r_0]} = 2\bar{N} + 1$ одномерного процесса. Определение матриц переходных вероятностей $C_r^{[r_0]}$, $r = 1, 2, \dots, Q_{r_0}$ процесса $\{\gamma_r^{[r_0]}\}$ производится аналогично тому, как это было сделано для процесса $\{\eta_r\}$, однако учитывается дополнительная информация о состоянии выделенной метки. Эти матрицы также представляются в виде композиции матриц $V_N^\nabla, V_N^\times, V_N^\downarrow, V_N^+, V_N^-$, соответствующих элементарным операциям. Используя найденные матрицы $C_r^{[r_0]}$, можно выразить вероятность P_X из (3) как:

$$P_X = \sum_{r_0 \in \mathfrak{R}} p_{r_0}^{[a]} \{\theta^{(r_0,1)} C_1^{[r_0]} C_2^{[r_0]} \dots C_{Q_{r_0}}^{[r_0]}\}_{2\bar{N}+1},$$

Начальные распределения $\theta^{(r_0,1)}$ вычисляются из найденных ранее распределений $\pi^{(r)}$:

$$\theta_n^{(r_0,1)} = \begin{cases} \pi_n^{(r_0)}, & \tilde{\alpha}_{r_0} = A_N^e, 1 \leq n \leq N \\ \pi_{n-(\bar{N}+1)}^{(r_0)}, & \tilde{\alpha}_{r_0} = B_N^e, \bar{N} + 1 \leq n \leq \bar{N} + N \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

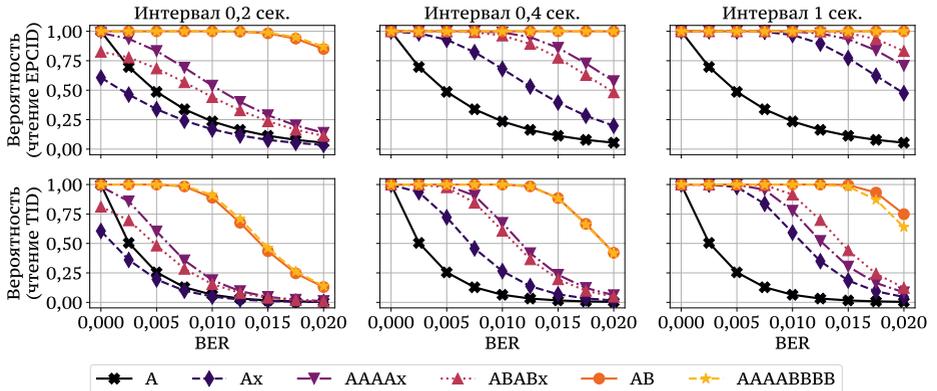


Рис. 3 — Вероятность успешной идентификации в разных сценариях работы считывателя при различных интервалах между метками. Метка находится в области чтения 2,5 сек.

Численные результаты, полученные с помощью аналитической модели, представлены в § 6 главы 3. Показано, что периодические сбросы питания и смены флагов опроса ведут к значительному увеличению вероятности успешной идентификации даже при высоких значениях BER, см. рис. 3. Для валидации аналитической модели, результаты расчета сравнивались с данными имитационного моделирования.

Четвертая глава посвящена исследованию производительности многошаговых беспроводных сетей с помощью сетей массового обслуживания с узлами типа MАР/РН/1/Ν, а также быстрым методам вычисления характеристик многофазных сетей массового обслуживания. В § 1 вводится объект исследования (многошаговая беспроводная сеть) и модель (многофазная система массового обслуживания) и ставится формальная задача исследования производительности сети с точки зрения оценки межконцевых задержек T и вероятностей потерь пакетов P_l .

В § 2 более подробно рассматривается модель — многофазная система массового обслуживания с марковскими входными потоками (МАР), распределениями времени обслуживания фазового типа (РН) и конечными очередями. Приводятся основные утверждения относительно систем МАР/РН/1/Ν и многофазных сетей, необходимые для расчета их характеристик. После этого приводится схема итерационного точного расчета средних межконцевых задержек T и вероятностей потерь пакетов P_l . Приводится утверждение, показывающее экспоненциальный рост сложности расчета при увеличении числа узлов сети.

Для получения численных оценок характеристик открытой сети массового обслуживания в § 3 приводится описание метода Монте-Карло и реализующей его дискретно-событийной имитационной модели сети

массового обслуживания. Основной недостаток метода состоит в том, что для получения статистически устойчивых результатов необходимо моделировать большое число пакетов. Для того, чтобы сделать расчет характеристик более быстрым, можно использовать другой подход, основанный на аппроксимации потоков, передаваемых в сети. В § 4 подробно рассматриваются четыре различных подхода к аппроксимации потоков обслуженных пакетов, основанных на методе моментов:

1. Аппроксимация по среднему m_1 пуассоновским потоком;
2. Аппроксимация по среднему m_1 и коэффициенту вариации c с помощью экспоненциальных и гиперэкспоненциальных распределений и распределения Эрланга;
3. Аппроксимация РН-распределениями по среднему m_1 и коэффициентам вариации c и асимметрии γ с помощью методов, предложенных в работе Johnson и Taaffe, а также в работе Telek и Heindl;
4. Аппроксимация MAP-потоком по m_1 , c , γ и коэффициенту корреляции ρ_1 с помощью метода независимого поиска матрицы D_1 по найденному РН-распределению и коэффициенту корреляции.

В § 5 главы 4 предлагается методика построения тандемной сети массового обслуживания, моделирующей многошаговую беспроводную сеть произвольного размера. На моделируемую сеть накладывается ряд ограничений: работа на одной частоте, видимость только непосредственных соседей, использование схемы доступа IEEE 802.11 DCF. Для нахождения распределений времени обслуживания предлагается использовать калибровочную беспроводную сеть с пятью станциями, для которой можно получить выборку интервалов передачи пакетов каждой из станций с помощью имитационной модели. При моделировании беспроводной сети произвольного размера для промежуточных каналов предлагается использовать РН-распределения, полученные для канала $S_2 \rightarrow S_3$ калибровочной сети.

Результаты численного исследования методов вычисления оценок характеристик многофазных сетей массового обслуживания с аппроксимацией выходящих потоков подробно изложены в § 6 главы 4. Для оценки точности методов были сгенерированы 2500 случайных сетей. Для тех сетей, порядок выходящего потока с последней фазы в которых был достаточно мал, было найдено точное решение, для всех остальных — только приближенные оценки. Для каждого типа аппроксимаций рассматривалось два варианта применения: аппроксимация выходящих потоков и аппроксимация входящих потоков. Результаты сравнения точности методов показаны на рис. 4. Хотя наиболее точные результаты показывает метод Монте-Карло, достаточно точные оценки (в пределах 10%) удается найти с помощью аппроксимаций по трем моментам, а для нахождения оценок межконцевых задержек можно использовать даже аппроксимации по

двум моментам, причем эти методы работают быстрее, чем метод Монте-Карло.

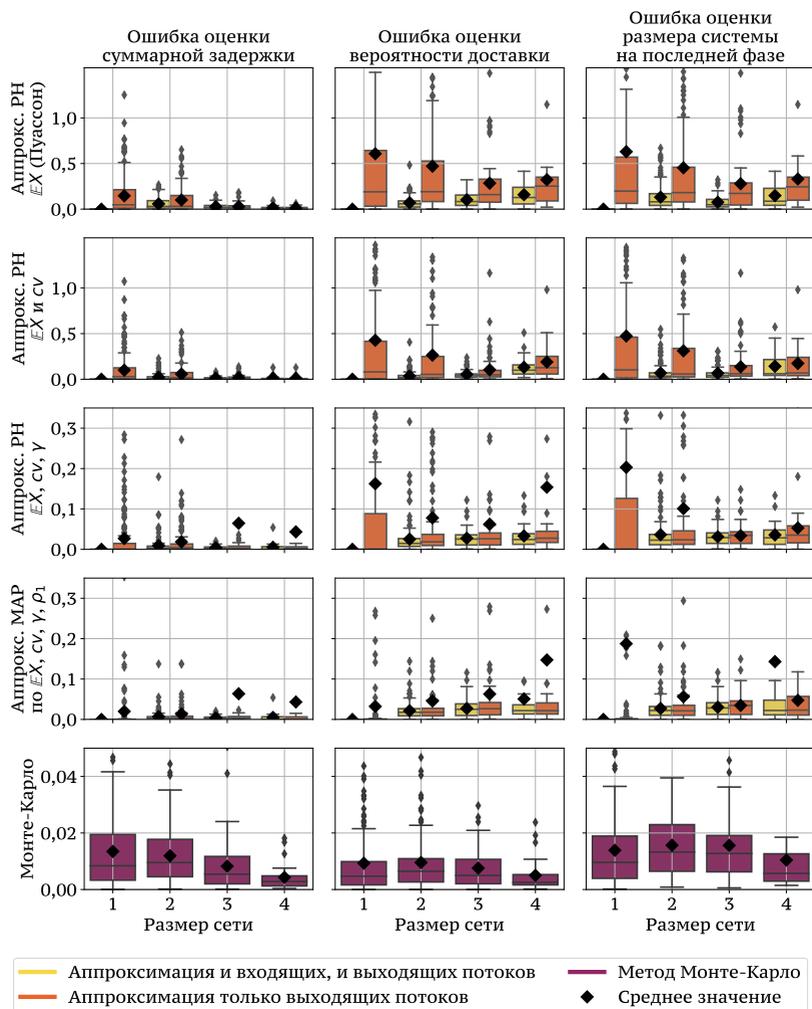


Рис. 4 — Точность оценок, полученных с помощью методов аппроксимаций потоков и метода Монте-Карло

В § 7 главы 4 приведены результаты численного исследования метода моделирования многошаговых беспроводных сетей с помощью сетей массового обслуживания, где распределения времени обслуживания вычисляются с помощью калибровочной сети. Входящий трафик моделировался с помощью пуассоновских потоков разных интенсивностей от 1,2 до 12

мегабит/с, а каналы беспроводной сети работали на скорости 56 мегабит/с по протоколу IEEE 802.11 DCF. Для моделирования беспроводной сети использовалась система моделирования NS-3. Распределения времени передачи в каналах моделировались с помощью РН-распределений, построенных по трем моментам, а также с помощью элементарных экспоненциальных распределений.

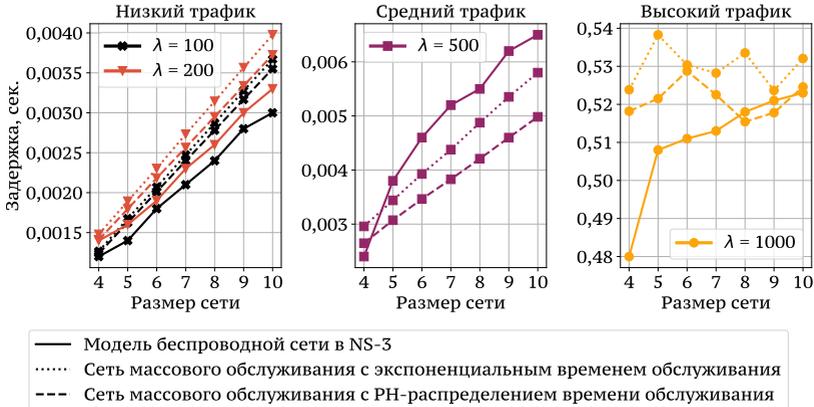


Рис. 5 — Межконцевые задержки в сетях с каналами IEEE 802.11

В ходе численного исследования было обнаружено, что в первых каналах беспроводной сети происходит существенная фильтрация трафика (потеря части пакетов), из-за чего задержки в каналах, расположенных ближе к источнику, оказываются существенно выше, чем в каналах, расположенных дальше. Для повышения точности моделирования было предложено изменить схему выбора распределений времени обслуживания: первые четыре канала моделировать с помощью распределений, полученных из калибровочной сети, а для времени обслуживания последующих каналов использовать распределение времени в последнем канале калибровочной сети. Обновленная методика позволила существенно увеличить точность оценки (в 1,4 – 5 раз), особенно при высокой нагрузке в сети. На рис. 5 показаны результаты вычисления межконцевых задержек, полученные с помощью имитационной модели беспроводной сети в NS-3 и с помощью построенных по обновленной методике сетей массового обслуживания.

В главе 5 приведено описание разработанной автором распределенной компьютерной системы управления RFID-считывателями и представлены результаты проведенных экспериментов по внедрению системы радиочастотной идентификации в 2014, 2020 и 2021 годах в городе Казань

и на ЦКАД. В § 1 главы 5 приведена архитектура распределенной компьютерной системы управления считывателями, кратко описаны основные программные компоненты и приведены различные способы их размещения.

Протоколы связи между компонентами компьютерной системы подробно описаны в § 2. Протокол IMMP (Internal Modules Management Protocol) используется для управления и настройки компонентов со стороны центрального компонента (супервайзера), протокол SUAP (Simple User Access Protocol) используется для передачи команд управления от пользовательских интерфейсов, протокол ITOP (Internal Tag-Operation Protocol) используется для управления компонентами, работающими с RFID-модулями, а протокол TFP (Tag Flow Protocol) используется для подключения внешних пользователей к системе и получения ими потоков считанных меток. В § 3 приведено детальное описание компонентов системы: супервайзера, RFID-адаптера, сервера TFP и утилиты UAX, используемой для подключения пользовательских интерфейсов. Описаны принципы работы и организация параллельной обработки запросов, в частности — способ мультиплексирования команд управления и чтения меток в RFID-адаптерах. § 4 посвящен описанию реализации RFID-считывателя, а также программной реализации системы управления на языках C/C++.

В § 5 главы 5 приведено описание эксперимента 2014 года, в ходе которого разработанными RFID-считывателями было оборудовано две точки идентификации, а в центре обработки данных ГИБДД был размещен сервер, в котором собирались данные о прочитанных метках. Сами метки были установлены в автомобильные номера и ими были оснащены 920 автобусов. Эксперимент продолжался три зимних месяца, с декабря по февраль, в результате была получена вероятность успешной идентификации 92 % и 95 %. В ходе эксперимента были выявлены проблемы с перегруженной видеонаблюдением сетью, которые были решены добавлением кэширования на считывателях, но свидетельствуют о целесообразности построения недорогих выделенных беспроводных сетей для подключения считывателей. В § 6 описаны результаты протокольных испытаний, проведенный на полигоне в городе Казань, в которых изучалась эффективность радиочастотной идентификации при проезде автомобилей на скоростях до 150 км/ч, а также при различных маневрах — следовании, обгоне. RFID-метки, разработанные ПАО «Микрон», были установлены в автомобильные номера. Во всех экспериментах все автомобили были успешно идентифицированы. Эксперимент по внедрению RFID на ЦКАД в 2021 году описан в § 7.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Предложена и исследована стохастическая модель системы радиочастотной идентификации ТС, учитывающая скорость движения RFID-меток, расположенных на номерных знаках автомобилей, а

также различные сценарии проведения циклического опроса и сбора данных с меток.

2. Разработан комплекс аналитических и имитационных моделей для анализа вероятности идентификации ТС, учитывающих особенности логического и физического уровней протокола стандарта EPC Class 1 Gen.2, и особенности распространения радиосигналов между RFID-меткой и считывателем.
3. Предложена методика моделирования многошаговых беспроводных сетей с помощью тандемных сетей массового обслуживания, учитывающая особенности трафика и интерференции в каналах связи.
4. Разработан метод вычисления оценок характеристик многофазных систем массового обслуживания большой размерности, моделирующих компьютерные сети, с коррелированными входными потоками и распределениями обслуживания фазового типа.
5. Разработана архитектура и реализована распределенная компьютерная система управления RFID-считывателями, предназначенная для организации сбора данных об идентифицированных транспортных средствах.
6. Произведены экспериментальные внедрения разработанной компьютерной системы радиочастотной идентификации транспортных средств на автодорогах в г. Казань и в Московской области.

Публикации автора по теме диссертации

1. Larionov Andrey A., Ivanov Roman E., Vishnevsky Vladimir M. UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. — 2017. — March. — Vol. 1, no. 1. — Pp. 3–12.
2. Vishnevsky Vladimir, Larionov Andrey, Roman Ivanov. Applying UHF RFID for Vehicle Identification: Protocol and propagation simulation // 2017 IEEE International Conference on RFID (RFID). — Phoenix, AZ: IEEE, 2017. — May. — Pp. 73–80.
3. Vishnevskiy Vladimir, Larionov Andrey, Ivanov Roman. Analysis and Simulation of UHF RFID Vehicle Identification System // Communications in Computer and Information Science. — Vol. 678. — Springer, 2016. — Pp. 35–46.
4. Lavrukhin I. R., Larionov A. A., Yelizarov Andrey Albertovich. ANALYSIS AND MODELING OF THE PROTOCOL OF RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION OF VEHICLES ON ROAD STATIONS // 2018

- Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). — IEEE, 2018. — July. — Pp. 1–5.
5. Новое поколение систем безопасности на автодорогах и их применение в интеллектуальных транспортных системах / В.М. Вишнеvский, Р.Н. Минниханов, А.Н. Дудин, В.И. Клименок, А.А. Ларионов // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2013. — Т. 4. — С. 80–89.
 6. Larionov Andrey, Ivanov Roman, Vishnevsky Vladimir. A stochastic model for the analysis of session and power switching effects on the performance of UHF RFID system with mobile tags // 2018 IEEE International Conference on RFID (RFID). — Orlando: IEEE, 2018. — Pp. 1–8.
 7. Ларионов А.А. О математической модели системы радиочастотной идентификации мобильных объектов, оснащенных RFID-метками // Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019). — Москва: ИПУ РАН, 2019. — С. 2953–2957.
 8. Review of methodology and design of broadband wireless networks with linear topology / Vladimir Vishnevsky, Achyutha Krishnamoorthy, Dmitry Kozyrev, Andrei Larionov // Indian Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2016. — Vol. 47, no. 2. — Pp. 329–342.
 9. Performance Evaluation of the Priority Multi-Server System MMAP/PH/M/N Using Machine Learning Methods / Vladimir Vishnevsky, Valentina Klimenok, Alexander Sokolov, Andrey Larionov // Mathematics. — 2021. — Vol. 9, no. 24.
 10. Vishnevsky Vladimir, Larionov Andrey. Stochastic Multiphase Models and Their Application for Analysis of End-to-End Delays in Wireless Multihop Networks // Applied Probability and Stochastic Processes. Infosys Science Foundation Series. — Springer, Singapore, 2020. — Pp. 457–471.
 11. A Multiphase Queueing Model for Performance Analysis of a Multi-hop IEEE 802.11 Wireless Network with DCF Channel Access / Andrey Larionov, Vladimir Vishnevsky, Olga Semenova, Alexander Dudin // Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications. ITMM 2019. Communications in Computer and Information Science. — Vol. 1109. — Springer, Cham, 2019. — Pp. 162–176.
 12. Estimation of IEEE 802.11 DCF access performance in wireless networks with linear topology using PH service time approximations and MAP input / Andrey A. Larionov, Vladimir M. Vishnevsky, Roman E. Ivanov,

- Olga V. Semenova // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2017, Moscow). — Vol. 2. — Moscow: IEEE, 2017. — Pp. 85–89.
13. State Reduction in Analysis of a Tandem Queueing System with Correlated Arrivals / Vladimir Vishnevsky, Andrey Larionov, Olga Semenova, Roman Ivanov // Communications in Computer and Information Science. — Vol. 800. — Springer, 2017. — Pp. 215–230.
 14. Vishnevski Vladimir, Larionov Andrey, Ivanov Roman. An open queueing network with a correlated input arrival process for broadband wireless network performance evaluation // Communications in Computer and Information Science. — Vol. 638. — Springer, 2016. — Pp. 354–365.
 15. Methods of performance evaluation of broadband wireless networks along the long transport routes / Vladimir Vishnevsky, Alexander Dudin, Dmitry Kozyrev, Andrey Larionov // Communications in Computer and Information Science. — Vol. 601. — Springer, 2016. — Pp. 72–85.
 16. Методы исследования и проектирования широкополосных беспроводных сетей вдоль протяженных транспортных магистралей / В.М. Вишнеvский, А. Кришнамурти, Д.В. Козырев, А.А. Ларионов, Р.Е. Иванов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2015. — Т. 9, № 5. — С. 9–15.
 17. Вишнеvский В.М., Ларионов А.А., Семёнова О.В. Оценка производительности высокоскоростной беспроводной тандемной сети с использованием каналов сантиметрового и миллиметрового диапазона радиоволн в системах управления безопасностью дорожного движения // Проблемы управления. — 2013. — Т. 4. — С. 50–56.
 18. Вишнеvский В.М., Ларионов А.А., Целикин Ю.В. Анализ и исследование методов проектирования автоматизированных систем безопасности на автодорогах с использованием новых широкополосных беспроводных средств и RFID-технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2012. — Т. 7. — С. 48–54.
 19. Vishnevsky Vladimir M., Larionov Andrey, Ivanov Roman. Architecture of application platform for RFID-enabled traffic law enforcement system // 2014 7th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles, Nets4Cars-Fall 2014. — IEEE, 2014. — Pp. 45–49.
 20. Vishnevsky Vladimir M., Larionov Andrey. Design concepts of an application platform for traffic law enforcement and vehicles registration comprising RFID technology // 2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications, RFID-TA 2012. — IEEE, 2012. — Pp. 148–153.

Ларионов Андрей Алексеевич

Технология построения и методы исследования систем управления безопасностью дорожного движения на основе широкополосных беспроводных сетей и радиочастотной идентификации

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

