

На правах рукописи



Калистратов Дмитрий Сергеевич

**МЕТОДОЛОГИЯ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВЫХ
ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА
ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ГОРОДА**

Специальность: 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Владимир 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный консультант	Самойлов Александр Георгиевич доктор технических наук, профессор, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
Официальные оппоненты	Бабанов Николай Юрьевич доктор технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород. Гладких Анатолий Афанасьевич доктор технических наук, профессор, Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск. Приоров Андрей Леонидович доктор технических наук, профессор, Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова, г. Ярославль.
Ведущая организация	Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится «06» октября 2026 г. в 13.30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.281.01 при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, РТиРС, корп. 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте университета https://diss.vlsu.ru/uploads/media/Dissertacija_Kalistratov.pdf
Автореферат разослан « 15 » июня 2026 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87 ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01. Тел. (4922) 534238, E-mail: ags@vlsu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.281.01
кандидат технических наук, доцент



С. А. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из актуальных проблем современности, особенно обострившихся в последнее время, является проблема автотранспортных заторов мегаполисов. Транспортные заторы парализуют транспортные движения, препятствуют оперативной работе спецслужб, мешают нормальному функционированию и развитию инфраструктуры города в целом. В этой связи значительный научный интерес представляет разработка систем автоматического мониторинга и управления транспортными потоками, направленных на снижение количества транспортных заторов.

Наиболее оптимальным вариантом построения такой системы является беспроводная система мониторинга транспортных потоков по цифровым видеоизображениям. Предполагается, что сведения о транспортном потоке извлекаются из цифровых изображений в автоматическом режиме, а управление транспортными потоками осуществляется путём перераспределения времени переключения светофоров. Подобная система несёт значимую практическую пользу, но имеет ряд сложностей с точки зрения технической реализации. В частности, для повышения точности распознавания автомобильных проекций необходимо использовать широкоформатные изображения с высоким разрешением, а для повышения качества управления транспортными потоками видеодатчиками необходимо охватить как минимум каждый перекрёсток и каждую дорожную развязку.

Такая постановка задачи приводит к значительным объёмам передаваемой информации. В результате в структуру радиоканалов становится целесообразно ввести видеокодек, обеспечивающий сжатие изображений по объёму памяти. Наличие встроенного видеокодека позволяет снизить несущую частоту, уменьшить ширину полосы радиоканала, подобрать оптимальный тип модуляции сигнала, ускорить процесс передачи изображений по каналу связи, а также уменьшить энергетические затраты и фоновую нагрузку на прочие городские системы связи, такие как радиовещание и телевидение. Решение

проблемы автотранспортных заторов городов с помощью систем мониторинга с встроенным видеокодеком и определяет актуальность научного направления и темы исследования.

Степень разработки научного направления. О высокой значимости научного направления исследования свидетельствует наличие большого количества научных публикаций отечественных и зарубежных учёных. Тема параметрического расчёта радиоканалов прослеживается в работах Плотникова М.Ю., Самойлова А.Г., Полушина П.А., Макаренко А.А., Сухонина Е.В., Соколова А.В., Фурашова Н.И., Жебсаина В.В., Скляра Б., Феера К. и др. Теме компрессии цифровых данных посвящены работы Катунина Г.П., Ватолина Д., Умняшкина С.В., Ричардсона Я., Вернера М., Сэломона Д. и др.

Однако, вопрос интеграции видеокодека в структуру радиоканала в настоящее время проработан мало, особенно по отношению к системам реального времени. Подавляющее большинство существующих моделей радиоканалов и видеокодеков разработаны для гуманитарных приложений и не подходят для использования в системах технического зрения, поскольку не удовлетворяют требованиям по пропускной способности радиоканала и качеству декодируемых изображений в режиме реального времени. Кроме того, на качество передачи изображений в задаче о транспортных потоках влияют также многочисленные факторы, свойственные городским условиям, а именно: высокий уровень помех, свойства среды, наличие препятствий, отражений и прочее. Вследствие этого к компрессионным искажениям видеокодека добавляются помеховые искажения радиоканала. В результате качество передаваемых изображений ухудшается, точность распознавания автомобильных проекций снижается, а эффективность управления транспортными потоками падает. Таким образом, низкое качество передаваемых изображений вступает в противоречие с эффективностью автоматического распознавания и управления транспортными потоками. Разрешение этого противоречия и определяет актуальность и своевременность диссертационного исследования.

Научной проблемой, на решение которой направлено исследование, является проблема обеспечения высокого качества беспроводной передачи цифровых изображений в системах мониторинга транспортных потоков города со встроенным видеокодеком, работающих в режиме реального времени.

Объектом исследования являются радиоканалы передачи цифровых изображений со встроенным видеокодеком.

Предмет исследования составляют математические модели и методы проектирования радиоканалов со встроенным видеокодеком.

Цель работы. Целью исследования является разработка методологии проектирования радиоканала со встроенным видеокодеком, направленной на повышение качества беспроводной передачи цифровых видеоизображений в системах мониторинга транспортных потоков города, работающих в режиме реального времени.

Поставленная цель достигается решением следующего комплекса взаимосвязанных задач:

1. Проведение аналитического обзора и сравнительного анализа существующих математических моделей и методов проектирования радиоканалов со встроенным видеокодеком применительно к задаче беспроводного мониторинга транспортных потоков города, выявление их преимуществ и недостатков, выбор прототипных методов;

2. Разработка математической модели радиоканала беспроводной передачи цифровых видеоизображений с учётом городских условий, включая следующие основные факторы: тип модуляции сигнала, несущая частота, расстояние передачи, наличие шумов и помех, свойства среды, а также наличие препятствий, отражений и многолучевого характера распространения сигнала;

3. Разработка метода проектирования радиоканала со встроенным видеокодеком, обеспечивающего оптимизацию радиоканала по следующим основным критериям: мощность передающего устройства, ширина полосы частот радиоканала, отношение сигнал-шум, вероятность битовой ошибки, коэффициент компрессии и качество декодируемых изображений;

4. Разработка метода компрессии цифровых видеоизображений и видеокодека на его основе, обеспечивающих совместное повышение коэффициента компрессии и качества декодируемых изображений в режиме реального времени;

5. Проведение теоретических и экспериментальных исследований для сравнительного анализа прототипных и предложенных методов, подтверждения эффективности предложенных технических решений, определения величины полезного технического эффекта и внедрение результатов исследования.

Методы исследований, используемые в диссертации, включают методы беспроводной передачи и цифровой обработки изображений, методы математического моделирования, методы дифференциального и интегрального исчисления, методы теорий дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, методы спектрального анализа, методы оптимизации и вариационного исчисления, а также методы математической статистики и теории планирования эксперимента. Теоретические исследования проводились с применением программных средств Matlab R2009b, Simulink и Visual C++. Практические исследования и разработка экспериментальных стендов осуществлялись с помощью программных средств Altium Designer, Cube MX и Keil uVision.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель радиоканала передачи цифровых видеоизображений, разработанная на основе уравнения в частных производных (ЧП) с произвольной правой частью, и обеспечивающая универсальность в выборе типа цифровой модуляции сигнала и задании шумов и помех с учётом свойств среды, наличия препятствий, отражений и многолучевого распространения;

2. Метод проектирования радиоканала со встроенным видеокодеком, разработанный на основе указанной математической модели, и позволивший оптимизировать радиоканал по критериям мощности передающего устройства, ширины частотной полосы, отношения сигнал-шум, вероятности битовой

ошибки, коэффициента компрессии и качества изображений с повышением расчётной точности оценки отношения сигнал-шум до 23.2%;

3. Математическая модель компрессии цифровых видеоизображений, представленная и решённая как задача классического вариационного исчисления с перераспределением приоритетов по принципу объём кода-качество декодируемого изображения, обеспечившая гибкий механизм регулирования параметров видеокодека;

4. Способ компрессии и видеокодек, построенные на основе разработанной математической модели, обеспечившие выигрыш в коэффициенте компрессии на 9.2% и в качестве декодируемых изображений в режиме реального времени на 17.6%. применительно к задаче беспроводного мониторинга транспортных потоков города.

Научная новизна проведённого исследования заключается в следующем:

1. Предложена математическая модель радиоканала, которая позволяет учесть множество факторов, свойственных городским условиям, в том числе: расстояние передачи, уровень шумов и помех, спектр шумов и помех, особенности среды, наличие препятствий и отражений сигнала;

2. Разработан и запатентован способ расчёта и проектирования радиоканала для беспроводной передачи цифровых видеоизображений, позволивший повысить расчётную точность радиоканала по критериям мощности передающих устройств, ширине полосы, отношению сигнал-шум и вероятности битовой ошибки, в том числе, с учётом наличия встроенного видеокодека;

3. Разработан и запатентован способ компрессии цифровых видеоизображений, отличающийся тем, что задача компрессии в нём рассматривается как задача классического вариационного исчисления с перераспределением приоритетов по принципу объём кода-качество декодируемого изображения.

Практическая ценность результатов исследования состоит в следующем:

1. Предложенный метод проектирования радиоканала со встроенным видеокодеком позволяет провести оптимизацию радиоканала по основным параметрам, включая: коэффициент компрессии, тип модуляции, значение несущей частоты, мощность передающих устройств, ширина полосы радиоканала, а также отношение сигнал-шум и вероятность битовой ошибки;

2. Разработанный способ компрессии обеспечивает значительное повышение коэффициента компрессии и качества декодируемых изображений по сравнению с ближайшим аналогом, что в задаче о транспортных потоках способствует увеличению точности распознавания автомобильных проекций и повышению эффективности управления;

3. Построенный на основе предложенного способа видеокодек, обеспечивает совместный выигрыш по коэффициенту компрессии и качеству декодируемых изображений по сравнению с ближайшим аналогом в режиме реального времени;

4. Разработанное программное обеспечение, сопровождающее предложенный математический и методологический аппарат, представляет практическую ценность с точки зрения программной организации систем радиосвязи и может быть взято за основу при проектировании реальных устройств передачи цифровых изображений, в том числе, в системах беспроводного мониторинга транспортных потоков.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработке и исследовании математической модели радиоканала в условиях города и исследовании способов, на которые получены следующие патенты Российской Федерации: оценки отношения сигнал-шум на входе приёмного устройства для радиосигнала с цифровой амплитудной модуляцией; беспроводной передачи цифровых панорамных аэровидеоизображений; кодирования – декодирования цифровых видеоизображений; кодирования – декодирования цифровых статических видеоизображений; компенсации движения в цифровых динамических видеоизображениях; компенсации движения в цифровых динамических стереовидеоизображениях.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» по пунктам 1, 2, 3, 15.

Обоснованность и достоверность результатов исследования определяется корректным применением математического аппарата; привлечением современных средств компьютерного моделирования; количеством проведённых экспериментальных исследований; совпадением теоретических и экспериментальных результатов, и подтверждается широкой апробацией результатов на научных конференциях, патентами и реальным внедрением результатов проведенного исследования.

Личный вклад автора. Результаты исследования получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Из полученных лично автором результатов основными являются:

- математическая модель распространения радиосигнала произвольной формы;
- метод решения предложенного уравнения в частных производных;
- метод проектирования радиоканала со встроенным видеокодеком;
- способ компрессии цифровых видеоизображений.

Реализация результатов работы. Методы, разработанные в ходе исследования, были внедрены в Управлении ГИБДД УМВД России по Тульской области для файлового сбора статистических сведений и их анализа применительно к различным участкам автотрасс.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: IX Всероссийская научно – техническая Интернет-конференция. Тула, 2012 г., 20-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция. «Микроэлектроника и информатика – 2013» – Москва: МИЭТ, 2013 г., XVIII Международная научно-практическая конференция – Новосибирск, 2014 г., Международная научно-практическая конференция. «Актуальные проблемы технических наук – 2014» – Уфа, 2014 г., XI Международная научно-практическая конференция. Махачкала, 2016 г., Международная научно-практическая конференция. «Моделирование и анализ сложных технических и технологических систем» – Магнитогорск, 2018 г.

Основное содержание работы отражено в 42 публикациях, включающих 4 публикации в базах данных Web of Science и SCOPUS, 4 монографии, 19 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 патентов на изобретение, 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 6 докладов на международных и российских НТК.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 232 страницах основного текста и содержащих 53 рисунка и 73 таблицы, а также списка литературы из 167 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, проанализирована степень её разработанности, приведена постановка научной проблемы, а также цели и задач исследования, указаны научная новизна и практическая ценность проведённого исследования, методы исследования, положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности и сведения об апробации результатов.

В первой главе проведён аналитический обзор и сравнительный анализ известных математических моделей и методов проектирования радиоканалов для беспроводной передачи цифровых видеоизображений. Структурная схема отдельного ретранслятора в составе системы мониторинга транспортных потоков представлена высотной вышкой (рисунок 1), на которую крепится съёмочное оборудование и приёмно-передающее устройство для связи ретранслятора с серверным центром и управляющими светофорами. Измерение параметров транспортных потоков осуществляется путём анализа цифровых видеоизображений в серверном центре. Управление транспортными потоками осуществляется путём перераспределения времени переключения светофоров по принципу обратной связи. Изображения передаются в серверный центр по радиоканалу со встроенным видеокодеком.

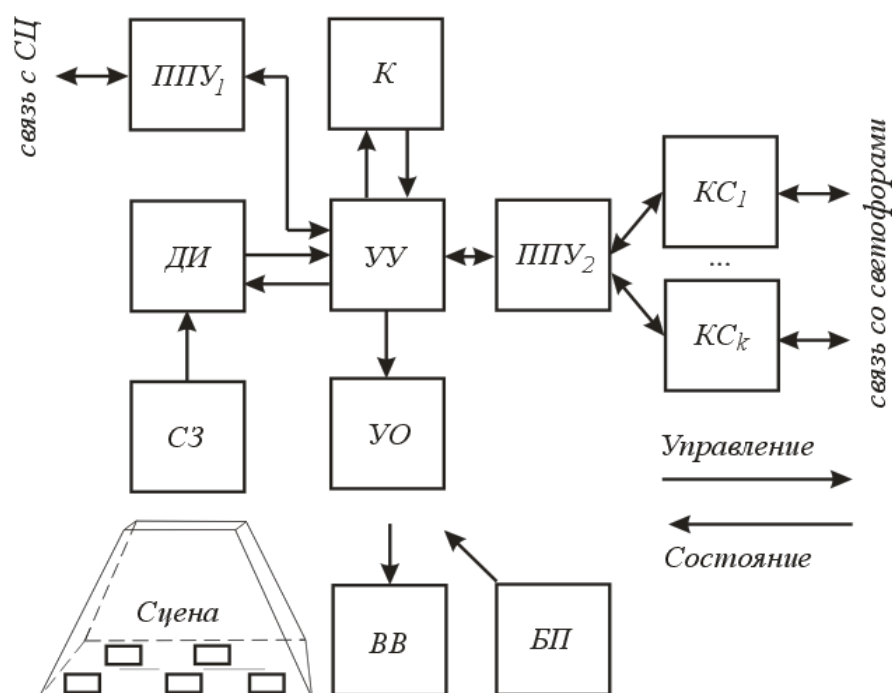


Рисунок 1. Структурная схема отдельного ретранслятора с обозначениями:

На рисунке: *ВВ* – высотная вышка; *БП* – блок питания; *УУ* – управляющее устройство; *УО* – устройство освещения; *ДИ* – датчик изображений; *СЗ* – средства защиты датчика; *К* – кодер (компрессор) видеоизображений; *ППУ₁*– высокочастотное приёмно-передающее устройство для связи с серверным центром; *ППУ₂*– низкочастотное приёмно-передающее устройство для связи со светофорами; *КС* – каналы связи со светофорами; *k* – количество светофоров в группе (количество каналов управления).

В данной системе мониторинга выделено 2 основных типа искажений передаваемых цифровых изображений: компрессионные и помеховые. Компрессионные искажения обусловлены наличием видеокодека в структуре радиоканала, влияют непосредственно на сигнал изображения и характеризуются средним абсолютным отклонением сигналов кодируемого и декодируемого изображений. Помеховые искажения обусловлены высоким шумовым фоном города, влияют на целостность передачи потока и характеризуются вероятностью битовой ошибки.

Среди математических моделей радиоканала рассмотрены 4 основных класса моделей: трассовые, шумовые, электродинамические и статистические модели. Установлено, что основными недостатками известных математических моделей и методов проектирования радиоканала со встроенным видеокодеком являются низкая точность параметрического расчёта радиоканала по критериям помехоустойчивости, а также отсутствие учёта фактора компрессии изображений. Показано, что указанные недостатки обусловлены приближённым характером формул и учётом лишь малого количества влияющих факторов. Сделан вывод о том, что повышение качества беспроводной передачи цифровых изображений в системах мониторинга транспортных потоков со встроенным видеокодеком может быть достигнуто за счёт параметрической оптимизации радиоканала и совершенствования методов компрессии цифровых изображений.

Среди методов компрессии цифровых видеоизображений, в свою очередь, рассмотрены: дискретно-косинусное преобразование, оконное преобразование Фурье, а также вейвлет-преобразование. Установлено, что среди указанных методов только вейвлет-преобразование способно обеспечить работу видеокодека в режиме реального времени. По этой причине метод вейвлет-преобразования был взят за основу при проведении дальнейших исследований.

С целью дальнейшего использования синтезированы математические модели сигналов с основными типами цифровой модуляции, используемые для передачи цифровых видеоизображений, а также математические модели наиболее распространённых шумов и помех, свойственных городским условиям. Среди сигналов введены в рассмотрение: сигнал с амплитудной модуляцией (*АМ*), сигнал с частотной модуляцией (*ЧМ*), сигнал с фазовой модуляцией (*ФМ*), а также сигнал с квадратурной амплитудной модуляцией (*КАМ*). Среди шумов введены в рассмотрение: белый равномерный (*БР*) шум, белый Гауссовский (*БГ*) шум, белый Пуассоновский (*БП*) шум, а также импульсная Релеевская (*ИР*) помеха. Математические модели полезных сигналов с цифровой модуляцией получены на основе составных функций.

Математические модели шумов и помех получены на основе математического аппарата случайных чисел с учётом спектральной плотности мощности и плотности распределения по уровню напряжения.

Во второй главе разработаны математическая модель и метод проектирования радиоканала со встроенным видеокодеком, направленные на повышение качества беспроводной передачи цифровых видеоизображений в системах мониторинга транспортных потоков города, работающих в режиме реального времени. Представлены расчётная и функциональная схемы радиоканала. Пояснены способы учёта основных влияющих факторов в рамках предложенной математической модели.

Ввиду высокого значения несущей частоты, принята расчётная схема радиоканала с точечным источником и приёмником излучения, в роли которых выступают передающая и приёмная антенны W_1 и W_2 . Сигнал распространяется от передающей антенны к приёмной вдоль радиус-вектора R , соединяющего фазовые центры антенн. Расстояние вдоль радиус-вектора отмеряется через r . Координаты размещения приёмной и передающей антенн, а также направление распространения сигнала считаются известными. Функция $u_1(t, r)$ является известной и задаёт возмущение на передающей антенне. Функция $u_2(t, r)$ является искомой и описывает реакцию на это возмущение. Функция $u_2(t, r)$ ассоциируется с напряжённостью электрического или магнитного поля вдоль заданного направления. В простейшем случае моделируется стационарная система. Расширение математической модели на случаи препятствий, отражений и многолучевого распространения достигается за счёт модификации математической модели.

Математическая модель радиоканала со встроенным видеокодеком состоит из 6-ти частей: математическая модель кодера, математическая модель распространения радиосигнала, математическая модель антенной цепи приёмного устройства, математическая модель полосового фильтра на входе приёмного устройства, математическая модель усилителя в тракте приёмного устройства, а также математическая модель декодера (глава 4).

Математическая модель распространения сигнала представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка с переменными коэффициентами и произвольной правой частью:

$$\begin{aligned} q_1 \frac{\partial^2 u_2(t,r)}{\partial t^2} + q_2 \frac{\partial^2 u_2(t,r)}{\partial r^2} + q_3 \frac{\partial u_2(t,r)}{\partial r} &= u_1(t,r), \\ u_1(t,r), u_2(t,r) &\in \mathbb{R}, \\ q_1 &= -1, \quad q_2 = v^2, \quad q_3 = \mu v^2, \quad q_1, q_2, q_3 \in \mathbb{R}, \\ t &\in [0, T], \quad r \in [0, R], \quad t, r \in \mathbb{R}, \quad T, R \in \mathbb{R}, \end{aligned} \quad (1)$$

с возмущающим воздействием:

$$u_1(t, 0) = k_1 (s_1(t) + e_1(t)), \quad (2)$$

выражениями коэффициентов:

$$q_1 = -1, \quad q_2 = v^2, \quad q_3 = \mu v^2, \quad (3)$$

коррекцией по уровню:

$$u_2(t, L) = k_2 (a_1 r^3 + a_2 r^2 + a_3 r + a_4) u_2(t, L), \quad (4)$$

начальными условиями:

$$u_2(0, r) = 0, \quad \frac{\partial u_2(0, r)}{\partial t} = 0, \quad r \in (0, R], \quad (5)$$

и краевыми условиями:

$$u_2(t, 0) = \eta_1 u_1(t, 0), \quad \frac{\partial u_2(t, 0)}{\partial t} = \eta_2 \frac{\partial u_1(t, 0)}{\partial t}, \quad (6)$$

где: $u_1(t, r)$ – функция возмущения на передающей антенне; $u_2(t, r)$ – искомая функция распространения, описывающая реакцию на это возмущение; q_1, q_2, q_3 – коэффициенты уравнения; t – время; r – расстояние; μ – коэффициент проницаемости среды; v – скорость распространения радиосигнала; L –

координата установки приёмной антенны; R – максимальное расстояние передачи; k_1 – коэффициент связи передатчика; k_2 – коэффициент поправки по частоте; $a_1, \dots, a_4$ – коэффициенты аппроксимации кривой затухания; η_1, η_2 – коэффициенты краевых условий.

Математическая модель антенной цепи приёмного устройства представлена линейным алгебраическим уравнением вида:

$$u_3(t) = k_3(u_2(t, L) + e_2(t)), \quad (7)$$

где: $u_2(t, L)$ – вход антенной цепи; $u_3(t)$ – выход антенной цепи (вход фильтра); $e_2(t)$ – внешняя помеха радиоканала; k_3 – коэффициент связи.

Математическая модель полосового фильтра на входе приёмного устройства построена на основе преобразования Фурье с коррекцией спектра по заранее заданным $AЧХ$ и $\PhiЧХ$ фильтра:

$$u_4(t) = k_4 \cdot F^{-1}(F(u_3(t)), A(\omega), \varphi(\omega)), \quad (8)$$

где: F – прямое преобразование Фурье; F^{-1} – обратное преобразование Фурье; $u_3(t)$ – вход фильтра; $u_4(t)$ – выход фильтра; $A(\omega)$ – $AЧХ$ фильтра; $\varphi(\omega)$ – $\PhiЧХ$ фильтра; k_4 – коэффициент ослабления фильтра. Фильтрация применяется к помехе $e_2(t)$. Сигнал $s_1(t)$ пропускается на выход фильтра без изменений.

Математическая модель усилителя приёмного устройства представлена линейным алгебраическим уравнением вида:

$$u_5(t) = k_5(u_4(t) + e_3(t)), \quad (9)$$

где: $u_4(t)$ – вход усилителя; $u_5(t)$ – выход усилителя; $e_3(t)$ – собственный шум приёмника; k_5 – коэффициент усиления.

Перечень факторов, учитываемых разработанной математической моделью радиоканала, представлен ниже (таблица 1).

Таблица 1 – Перечень основных факторов, влияющих на качество беспроводной передачи цифровых видеоизображений, и способы их учёта в разработанной математической модели радиоканала

Фактор	Способ учёта
Фактор компрессии изображений	Возмущающее воздействие $u_1(t,r)$
Тип модуляции сигнала	Произвольность возмущения $u_1(t,r)$
Мощность передатчика	Уровень возмущения $u_1(t,r)$
Коэффициент связи передатчика	Включён в состав $u_1(t,r)$
Коэффициент связи приёмника	Включён в состав $u_3(t)$
Несущая частота сигнала	Наличие коэффициента поправки k_2
Расстояние передачи	Переменное значение r
Затухание сигнала в пространстве	Наличие слагаемого с q_3
Факторы свойств среды	Изменение значения q_3
Уровень шумов и помех	Наличие переменных $e_n(t)$
Спектр шумов и помех	Наличие фильтра с выходом $u_4(t)$
Наличие препятствий	Переменный характер $q_3(r)$
Отражение сигнала	Введение доп. сигнала $s_2(t)$
Многолучевое распространение	Перезадание амплитуды для $s_1(t)$

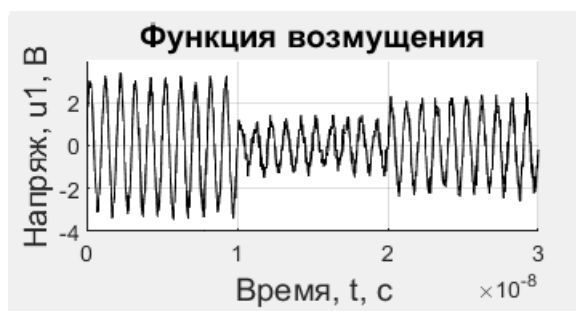
Основным достижением проведённого исследования является решение уравнения в ЧП с произвольной правой частью (глава 3). Благодаря произвольности возмущения $u_1(t,r)$ в правой части уравнения, математической моделью радиоканала охвачены все основные типы цифровой модуляции сигнала, причём как по типу дискретности (аналоговая, цифровая), так и по типу модулируемого параметра (амплитудная, частотная, фазовая). Благодаря произвольности возмущения $u_1(t,r)$ в правой части уравнения, математической моделью радиоканала охвачены также все распространённые типы шумов и помех, причём как по спектру (белый, серый), так и по распределению амплитуды (Гауссовский, Пуассоновский).

В точке установки передающей антенны возмущение $u_1(t, r)$ описывается линейным алгебраическим уравнением:

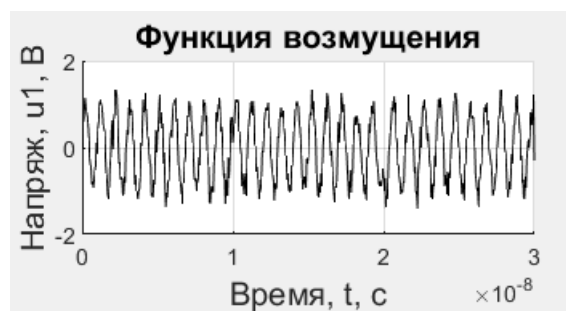
$$u_1(t, 0) = k_1 (s_1(t) + e_1(t)), \quad (10)$$

где: $s_1(t)$ – полезный сигнал; $e_1(t)$ – шум передатчика; k_1 – коэффициент связи антенной цепи по напряжению. Внешняя помеха радиоканала $e_2(t)$ добавляется либо в функции возмущения, либо на входе приёмного устройства. В конечной математической модели радиоканала реализован второй подход.

Постановка и решение уравнения в ЧП как уравнения с произвольным возмущением $u_1(t, r)$ даёт свободу в выборе типа модуляции сигнала и задании шумов и помех. Например, комбинация белого Гауссовского и белого Пуассоновского шумов наиболее достоверно описывает работу передающего устройства (рисунок 2), поскольку модель БГ шума учитывает тепловые шумы, а модель БП шума отвечает за дробовые шумы аппаратуры.



а)



б)

Рисунок 2. Пример добавления БГ и БП шумов на выходе передающего устройства для сигналов с различными типами цифровой модуляции в разработанной математической модели радиоканала: а) – для АМ сигнала; б) – для ЧМ сигнала

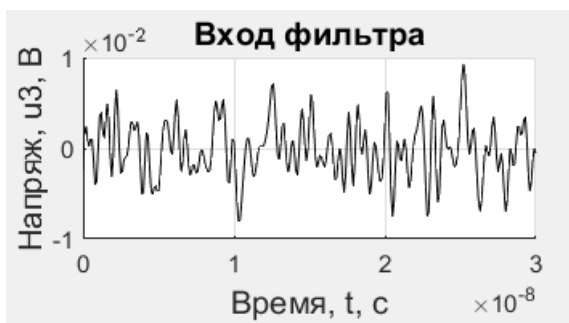
Аналогичным образом в разработанной математической модели можно комбинировать любой тип модуляции сигнала с любым типом шумов. Форма результирующего возмущения $u_1(t, 0)$ в точке передачи может быть любой. При этом затухание сигналов и шумов в пространстве обеспечивается наличием в уравнении в ЧП слагаемого с первой производной по координате r .

Наличие модели полосового фильтра на входе приёмного устройства позволяет прогнозировать отношение сигнал-шум не только на входе, но и в тракте приёмного устройства. Цифровой фильтр построен на основе преобразования Фурье с коррекцией спектра по заранее заданным $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ фильтра:

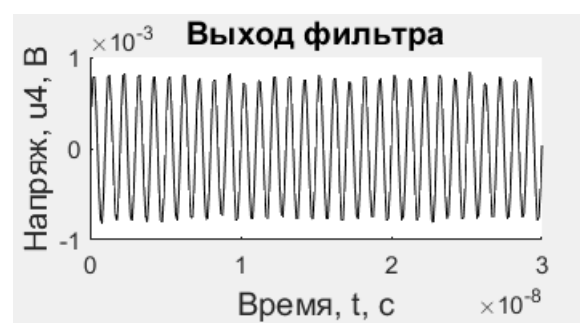
$$u_4(t) = k_4 \cdot F^{-1}\left(F(u_3(t)), A(\omega), \varphi(\omega)\right), \quad (11)$$

где: F – прямое преобразование Фурье; F^{-1} – обратное преобразование Фурье; $u_3(t)$ – вход фильтра; $u_4(t)$ – выход фильтра; $A(\omega)$ – $AЧХ$ фильтра; $\varphi(\omega)$ – $\PhiЧХ$ фильтра; k_4 – коэффициент ослабления фильтра.

Алгоритм фильтрации реализован следующим образом. Сначала к входному сигналу применяется прямое преобразование Фурье. Затем к полученным коэффициентам преобразования Фурье (гармоникам) применяется обратное преобразование Фурье, но уже с наложением $AЧХ$ и $\PhiЧХ$ фильтра. В результате спектр обратного преобразования подчиняется заранее заданным $AЧХ$ и $\PhiЧХ$ фильтра. Нужные гармоники пропускаются, ненужные – подавляются (рисунок 3).



а)



б)

Рисунок 3. Пример фильтрации $БГ$ помехи на входе приёмного устройства в разработанной математической модели радиоканала: а) – вход фильтра;

б) – выход фильтра

Характеристики $AЧХ$ и $ФЧХ$ задаются предварительно и назначаются в соответствии с характеристиками реального фильтра. В данном случае модель фильтра была настроена на $AЧХ$ и $ФЧХ$ полосового фильтра. Несущая частота – 1 ГГц. Ширина полосы пропускания – 20 МГц. Добротность фильтра – 50 единиц. Уровень напряжения помехи $e_2(t)$ на входе фильтра превышал уровень напряжения полезного сигнала примерно в 10 раз.

Основными преимуществами разработанного фильтра на основе преобразования Фурье являются высокая добротность и отсутствие переходных процессов в местах изменений модулируемых параметров (амплитуд, частот и фаз), что свойственно цифровым $KИХ$ и $БИХ$ -фильтрам. Плюс к этому, функция $ФЧХ$ в данном фильтре может быть задана нулевой, что сохраняет форму сигналов с $ЧМ$ и $ФМ$ на выходе фильтра.

Задача учёта множества факторов, влияющих на состояние среды распространения сигнала, сводится к изменению коэффициента проницаемости среды μ , входящего в состав коэффициента q_3 при слагаемом уравнения в $ЧП$ с первой производной по координате r . Итоговая проницаемость среды μ вычисляется путём расчёта приращений $\Delta\mu$ от каждого отдельно взятого фактора. Проницаемость среды под воздействием множества факторов среды вычисляется по формуле:

$$q_3 = \mu v^2, \quad \mu = \mu_0 + \sum_{n=1}^N (\Delta\mu_n), \quad (12)$$

где: μ – проницаемость среды с учётом влияющих факторов; μ_0 – начальная проницаемость среды без учёта влияющих факторов; $\Delta\mu_n$ – приращение проницаемости, вызванное фактором.

Величина проницаемости μ влияет на скорость затухания сигнала в пространстве. Чем больше проницаемость, тем меньше затухание и наоборот. Таким образом, меняя проводимость среды μ , мы регулируем скорость затухания сигнала по оси координат r , и, тем самым, учитываем факторы, влияющие на состояние среды. Приращение проницаемости $\Delta\mu$ от отдельно взятого фактора может быть как положительным, так и отрицательным.

Наличие препятствий на пути распространения сигнала учитывается за счёт переменного характера коэффициента q_3 , в состав которого входит коэффициент проницаемости среды μ . Уравнение в ЧП приобретает статус уравнения с переменными коэффициентами. Конфигурация трассы характеризуется функцией проницаемости $\mu(r)$, зависящей от расстояния r . Координатным отметкам, соответствующим свободному пространству, назначаются большие значения $\mu(r)$. Координатным отметкам, соответствующим препятствиям, назначаются малые значения $\mu(r)$. Математическая модель коэффициента q_3 с учётом фактора препятствий записывается в виде:

$$q_3(r) = \mu(r)v^2, \quad (13)$$

где: $\mu(r)$ – коэффициент проницаемости среды, зависящий от координаты r .

Препятствия «расставляются» на трассе до прогона математической модели. Каждому препятствию назначается своё значение $\mu(r)$ в зависимости от типа материала и толщины препятствия. В случае препятствий, как и в случае учёта факторов среды, затухание сигнала регулируется через изменение проводимости среды μ . Однако здесь для описания процесса затухания уже не подходит линейная зависимость μ и γ , поскольку препятствия обладают очень низкими значениями проницаемости и могут вызывать ослабление сигнала сразу на 20 дБ и более. Например, затухание сигнала при прохождении через бетонную стену толщиной 20 см составляет 16.2 дБ. По этой причине значения проницаемости μ препятствий подбираются путём моделирования.

Отражение сигнала учитывается по схеме двухлучевого распространения. Для учёта отражения сигнала $s_1(t)$ в дополнение к сигналу $s_1(t)$ вводится дополнительный сигнал $s_2(t)$, когерентный $s_1(t)$ и смещённый относительно него по фазе на величину $\Delta\varphi$. Сигнал $s_2(t)$ является ослабленной и сдвинутой копией $s_1(t)$ и добавляется на входе приёмника. В результате итоговый сигнал антенны приёмника представляется суммой двух сигналов: прямого $s_1(t)$ и отражённого $s_2(t)$. Математическая модель входной функции $u_3(t)$ приёмного

устройства с учётом отражённого сигнала описывается линейным алгебраическим уравнением вида:

$$u_3(t) = k_3(u_2(t, L) + s_2(t) + e_2(t)), \quad (14)$$

с отражённым сигналом:

$$s_2(t) = \rho \cdot u_2(t, L, \Delta\varphi), \quad \rho \in [0, 1], \quad (15)$$

где: $s_2(t)$ – отражённый сигнал; ρ – коэффициент уровня; $\Delta\varphi$ – смещение по фазе.

Коэффициент уровня ρ учитывает расстояние передачи, свойства среды, длину траектории отражённого сигнала и свойства отражающей поверхности. В предложенной математической модели $s_2(t)$ трактуется как полезный сигнал, однако в зависимости от смещения $\Delta\varphi$ в точке приёма, он может вести себя и как сигнал, приходящий в синхронной фазе, и как помеха, приходящая в противофазе. Остальные смещения $\Delta\varphi$ являются промежуточными случаями.

Многолучевое распространение сигнала учитывается за счёт изменения огибающей амплитуды принимаемого сигнала по Релеевскому закону. Поправка на многолучевое распределение вводится на входе приёмного устройства. Математическая модель входной функции $u_3(t)$ приёмного устройства с учётом многолучевого распространения описывается линейным алгебраическим уравнением вида:

$$u_3(t) = k_3(A(t)u_2(t, L) + e_2(t)), \quad (16)$$

с Релеевским распределением огибающей амплитуды:

$$P(A) = \frac{A}{s^2} e^{-\frac{A}{2s^2}}, \quad (17)$$

где: $A(t)$ – огибающая амплитуды; s – параметр масштаба.

При такой конфигурации математической модели источник и приёмник полезного сигнала предполагаются подвижными (мобильными). Для обеспечения плавности переходов огибающей амплитуды в разработанной математической модели использовалась сплайн-интерполяция $A(t)$ полиномами 3-го порядка. Темп изменения $A(t)$ регулировался количеством узлов аппроксимации.

Метод расчёта и проектирования радиоканала, разработанный на основе предложенной математической модели, направлен на повышение качества цифровых видеоизображений в беспроводных системах связи со встроенным видеокодеком. Задача повышения качества цифровых видеоизображений рассматривается в нём как многокритериальная задача оптимизации радиоканала с перераспределением ресурсов в пользу повышения показателей помехоустойчивости и качества декодируемых изображений. Выбор приоритетов обеспечивается назначением весовых коэффициентов при соответствующих слагаемых целевой функции. Математическая модель целевой функции для решения задачи оптимизации радиоканала представляется линейным алгебраическим уравнением вида:

$$F = -c_1Y_1 + c_2Y_2 - c_3Y_3 + c_4Y_4 + c_5Y_5 - c_6Y_6, \quad F \rightarrow \max, \quad \sum_{n=1}^N c_n = 1, \quad (18)$$

с множеством варьируемых параметров:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_4\}, \quad (19)$$

множеством критериев эффективности:

$$Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_6\}, \quad (20)$$

и совокупностью ограничений:

$$X_m \in [X_{m,\min}, X_{m,\max}], \quad Y_n \in [Y_{n,\min}, Y_{n,\max}], \quad (21)$$

где: F – целевая функция; $c_1, \dots, c_6$ – весовые коэффициенты; X – множество варьируемых параметров; X_1 – тип модуляции сигнала; X_2 – уровень сигнала на выходе передатчика; X_3 – ширина полосы радиоканала; X_4 – множество настроек видеокодека; Y – множество критериев качества радиоканала; Y_1 – средняя мощность передатчика; Y_2 – пропускная способность радиоканала; Y_3 – величина битовой ошибки; Y_4 – отношение сигнал-шум в тракте приёмного устройства; Y_5 – коэффициент компрессии видеоизображений; Y_6 – среднее абсолютное отклонение сигналов кодируемого и декодируемого изображений. Значения элементов множества X – абсолютные. Значения элементов множества Y – относительные.

Поиск экстремума целевой функции осуществляется путём математического моделирования радиоканала с перебором возможных сочетаний варьируемых параметров. Основу метода в каждой итерации расчётного цикла составляет решение уравнения в ЧП второго порядка. Для подсчёта отношения сигнал-шум и прочих критериев качества, связанных с мощностями сигнала и шума, в каждой итерации цикла осуществляется 2 прогона математической модели: первый прогон – при отсутствии шумов и помех, второй прогон – при отсутствии полезного сигнала. Результатом расчёта становится совокупность итоговых значений варьируемых параметров и критериев эффективности, доставляющих максимум целевой функции.

В третьей главе на основе электродинамического уравнения в частных производных второго порядка с произвольной правой частью разработана математическая модель распространения сигнала произвольной формы, составляющая основу предложенного метода проектирования радиоканала. Описан метод и алгоритм решения указанного уравнения. Приведены примеры моделирования сигналов с различными типами цифровой модуляции.

Математическая модель распространения сигнала представляет собой линейное неоднородное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка с переменными коэффициентами и произвольной правой частью:

$$\begin{aligned}
 q_1 \frac{\partial^2 u_2(t,r)}{\partial t^2} + q_2 \frac{\partial^2 u_2(t,r)}{\partial r^2} + q_3 \frac{\partial u_2(t,r)}{\partial r} &= u_1(t,r), \\
 u_1(t,r), u_2(t,r) &\in \mathbb{R}, \\
 q_1 &= -1, \quad q_2 = v^2, \quad q_3 = \mu v^2, \quad q_1, q_2, q_3 \in \mathbb{R}, \\
 t &\in [0, T], \quad r \in [0, R], \quad t, r \in \mathbb{R}, \quad T, R \in \mathbb{R},
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

с начальными условиями:

$$u_2(0, r) = 0, \quad \frac{\partial u_2(0, r)}{\partial t} = 0,
 \tag{23}$$

и краевыми условиями:

$$u_2(t,0)=\eta_1 u_1(t,0), \quad \frac{\partial u_2(t,0)}{\partial t}=\eta_2 \frac{\partial u_1(t,0)}{\partial t}, \quad (24)$$

где: $u_1(t,r)$ – функция возмущения; $u_2(t,r)$ – искомая функция распространения, описывающая реакцию на это возмущение; q_1, q_2, q_3 – коэффициенты уравнения; t – время; r – расстояние; η_1, η_2 – коэффициенты краевых условий.

Благодаря произвольности возмущения $u_1(t,r)$ модель позволила охватить все основные типы модуляции сигнала, а также все разновидности шумов и помех.

Метод решения предложенного уравнения получен на стыке аналитических и численных методов. Суть метода решения уравнения в ЧП с произвольной правой частью состоит в следующем (рисунок 4). Искомая функция $u_2(t,r)$ и функция возмущения $u_1(t,r)$ аппроксимируются рядами Фурье. Вклад каждой гармоники учитывается отдельно. Каждому коэффициенту разложения Фурье $c_{1,k}$ в функции $u_1(t,r)$ соответствует свой коэффициент разложения Фурье $c_{2,k}$ в функции $u_2(t,r)$. Коэффициенты разложения $c_{1,k}$ функции возмущения $u_1(t,r)$ являются известными, поскольку возмущение задано. Коэффициенты разложения $c_{2,k}$ искомой функции $u_2(t,r)$ предстоит найти. Таким образом, задача решения уравнения в частных производных сводится к тому, чтобы найти все коэффициенты разложения искомой функции $u_2(t,r)$ при известных значениях коэффициентов разложения функции возмущения $u_1(t,r)$.

Вследствие применения преобразования Фурье к функциям $u_1(t,r)$ и $u_2(t,r)$, исходное уравнение в частных производных (ЧП) распадается на несколько сотен обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), по одному для каждой гармоники. Каждое отдельно взятое ОДУ связывает пару коэффициентов разложения $c_{1,k}$ и $c_{2,k}$. Решая эти ОДУ, последовательно находим коэффициенты разложения $c_{2,k}$ искомой функции $u_2(t,r)$ при известных коэффициентах разложения $c_{1,k}$ функции возмущения $u_1(t,r)$. Алгоритм решения уравнения в ЧП с произвольной правой частью приведен на рисунке 4.

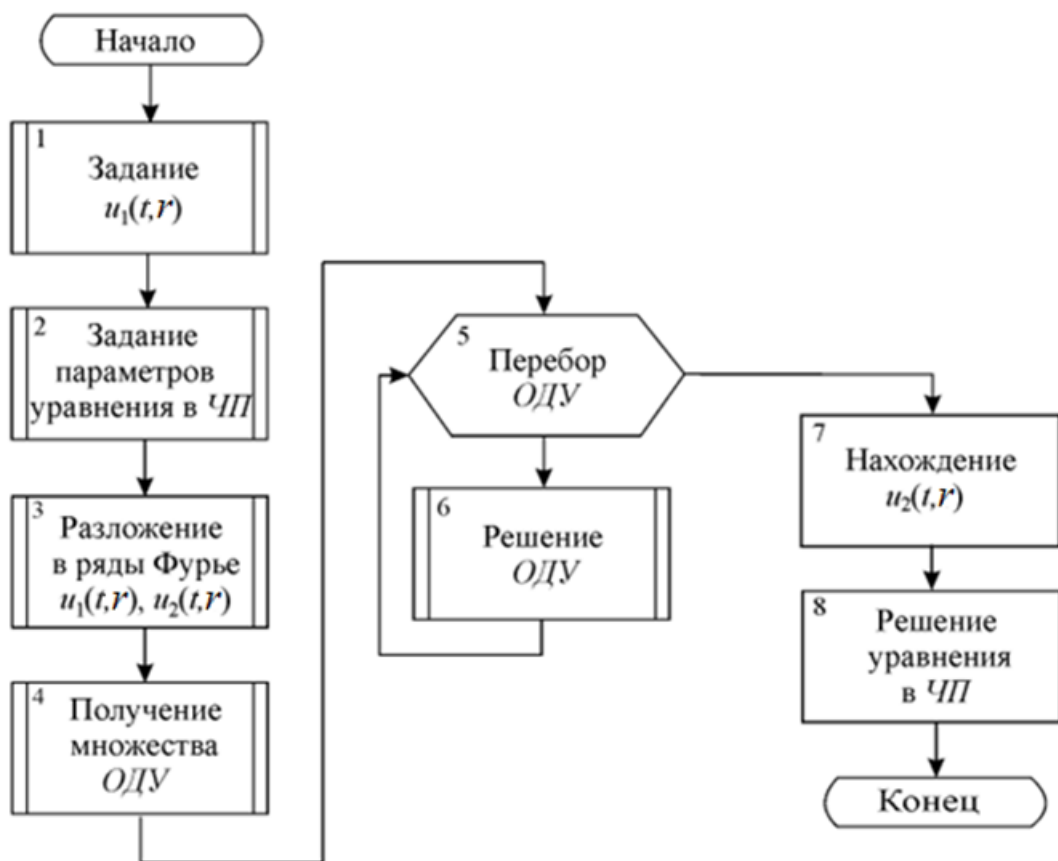


Рисунок 4. Алгоритм решения уравнения в ЧП
с произвольной правой частью

Полученные *ОДУ* решаются последовательно, одно за другим. Решение *ОДУ* осуществляется компьютерными средствами. Найденные по отдельности решения *ОДУ* вновь собираются «воедино». Результатом решения всех *ОДУ* является набор коэффициентов разложения $c_{2,k}$ искомой функции $u_2(t,r)$. По набору найденных коэффициентов разложения $c_{2,k}$ восстанавливается искомая функция $u_2(t,r)$ и из неё извлекается реакция на возмущение $u_1(t,r)$.

Точность представления функций $u_1(t,r)$ и $u_2(t,r)$ зависит от количества гармоник в преобразовании Фурье. Чем больше гармоник используется для описания возмущения $u_1(t,r)$ и реакции $u_2(t,r)$, тем точнее отражаются формы сигналов, шумов и помех, но тем больше машинного времени требуется на поиск численных решений совокупностей *ОДУ*. Количество используемых гармоник выбирается с учётом спектров сигналов, шумов и помех.

Поясним суть предложенного метода решения уравнения в ЧП. Сигнал размещается в действительной части $u_1(t, r)$. Разложение по временному базису функции входных воздействий $u_1(t, r)$ и искомой функцией $u_2(t, r)$ даёт:

$$u_1(t, r) = \sum_{k=0}^{K-1} c_{1,k}(r) e^{i \frac{2\pi k t}{T}}, \quad u_2(t, r) = \sum_{k=0}^{K-1} c_{2,k}(r) e^{i \frac{2\pi k t}{T}}, \quad (25)$$

где: $c_{1,k}(r), c_{2,k}(r)$ – комплексные коэффициенты разложения функции входных воздействий и искомой функции соответственно; k – индекс коэффициентов разложения (индекс гармоник); K – количество коэффициентов (гармоник) разложения; i – мнимая единица.

Коэффициенты разложения $c_{1,k}(r)$ функции входных воздействий $u_1(t, r)$ известны, поскольку возмущение задано. Коэффициенты $c_{2,k}(r)$ искомой функции $u_2(t, r)$ предстоит найти. Используя введённые обозначения, для нахождения коэффициентов $c_{2,k}(r)$ приходим к совокупности комплексных дифференциальных уравнений вида:

$$q_2 c_{2,k}''(r) + q_3 c_{2,k}'(r) - q_1 \left(\frac{2\pi k}{T} \right)^2 c_{2,k}(r) = c_{1,k}(r). \quad (26)$$

Данные уравнения решаются численными методами с заменой производных разностными отношениями. После нахождения всех $c_{2,k}(r)$ следует возврат к разложению искомой функции:

$$u_2(t, r) = \sum_{k=0}^{K-1} c_{2,k}(r) e^{i \frac{2\pi k t}{T}}. \quad (27)$$

Реакция на возмущение извлекается из действительной части $u_2(t, r)$. Из найденного общего решения $u_2(t, r)$ выделяется частное решение, соответствующее расстоянию передачи с фиксированным r .

Благодаря произвольности возмущения $u_1(t,r)$ в правой части уравнения, математической моделью радиоканала охвачены все основные типы цифровой модуляции сигнала, а также все разновидности шумов и помех. При этом, помимо типа модуляции и наличия шумов и помех, математическая модель радиоканала на основе уравнения в ЧП позволила совместно учесть целый ряд других влияющих факторов, включая: свойства среды, несущую частоту, расстояние передачи, а также наличие препятствий, отражений и многолучевое распространение.

В четвёртой главе разработан перспективный метод компрессии цифровых видеоизображений, а также видеокодек на его основе применительно к задаче о транспортных потоках. Главной отличительной особенностью метода является возможность совместного увеличения коэффициента компрессии и качества декодируемых изображений. Указанный технический эффект достигается за счёт того, что задача компрессии рассматривается как задача классического вариационного исчисления с перераспределением приоритетов по принципу «объём кода - качество декодируемого изображения».

В качестве базового метода компрессии, исходя из требования режима реального времени, выбрано вейвлет-преобразование Хаара с полусуммами и полуразностями. Компрессия низкочастотного компонента полусумм L осуществляется одинаково и в прототипном, и в предложенном методах. Различие состоит в кодировании высокочастотного компонента полуразностей H , как наиболее «неудобного» для компрессии.

Суть технического решения по компрессии сигнала W высокочастотного компонента H состоит в том (рисунок 5), что к данному сигналу в кодере построчно подмешивается дополнительный сигнал Q (более низкочастотный, чем W), который на стороне компрессии сглаживает первую построчную производную W и повышает коэффициент компрессии, а на стороне декодирования подавляется фильтром высоких частот с целью сохранения качества декодируемого изображения.

Декодеру передаётся не исходный высокочастотный W , а первая производная суммы $W+Q$, то есть величина S' , равная $(W+Q)'$. Сигнал S , вычисленный как сумма $W+Q$, оказывается достаточно гладкой функцией, первая построчная производная S' которой имеет малые абсолютные значения и большие скопления нулей, что позволяет укорачивать разрядную сетку для представления H и является основной причиной повышения коэффициента компрессии.

За счёт малых абсолютных значений S' коэффициент компрессии видеокодека повышается. Однако низкочастотный компонент Q оказывается лишним в декодере и подавляется с помощью фильтра высоких частот в пользу сохранения качества декодируемого изображения. Для того, чтобы иметь такую возможность, сигнал Q ещё изначально в кодере задаётся с более низкочастотным спектром, чем исходный сигнал W .

С математической точки зрения задачу компрессии для одной строки сигнала W отражает функционал J , содержащий целевую функцию с двумя приоритетными слагаемыми, и одно ограничение связи при множителе Лагранжа (скобка при λ), то есть:

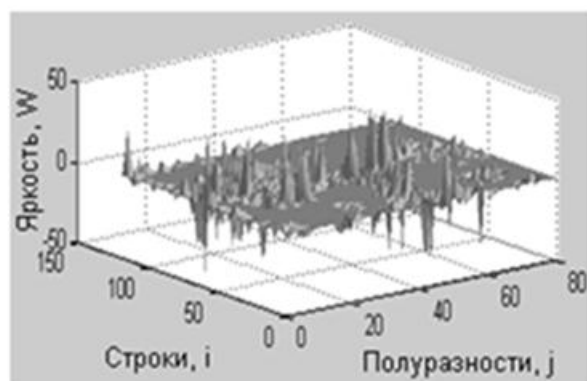
$$J(q, f) = \int_0^b \left(c_1 ((w+q)')^2 + c_2 (w-f)^2 + \lambda (a(k(w+q)-f)' - f) \right) dx, \quad (28)$$

$$J \in \mathbf{R}, \quad x \in \mathbf{R}, \quad b \in \mathbf{N}, \quad x \in [0, b],$$

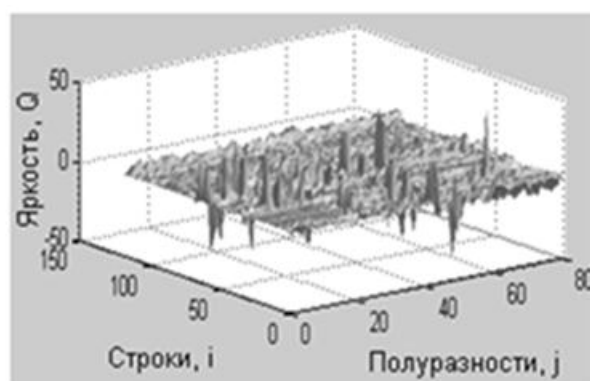
$$w(x), q(x), f(x) \in \mathbf{R}, \quad \lambda(x) \in \mathbf{R}, \quad a, k \in \mathbf{R},$$

$$c_1 \in \mathbf{R}_+, \quad c_2 \in \mathbf{R}_+,$$

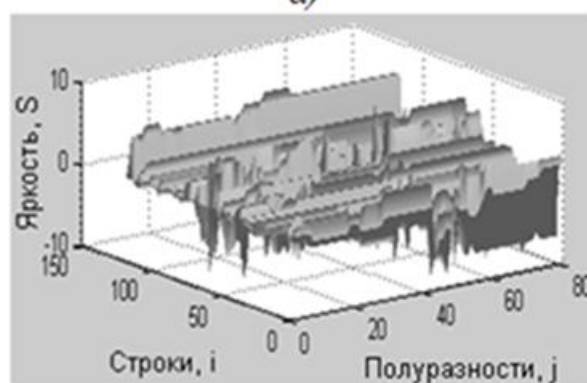
где: $J(q, f)$ – функционал; x – аргумент (в дискретном виде ассоциируется с индексом элемента преобразования в строке); b – верхняя граница области интегрирования (в дискретном виде ассоциируется с концом текущей строки); $w(x)$ – входная функция; $q(x)$ – добавочная функция; $f(x)$ – функция выхода фильтра декодера; c_1, c_2 – весовые коэффициенты; $\lambda(x)$ – функция-множитель Лагранжа; a – параметр фильтра; k – коэффициент усиления фильтра.



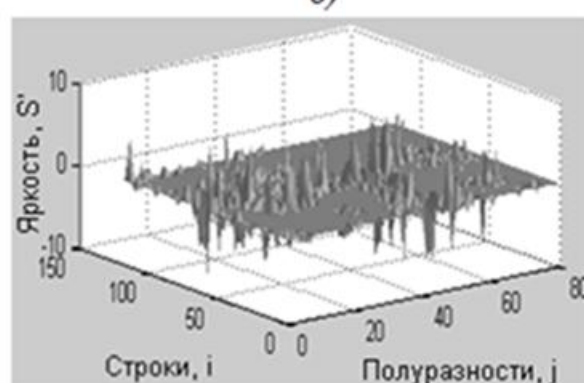
а)



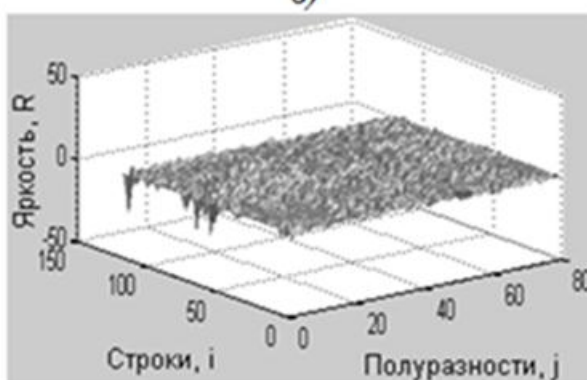
б)



в)



г)



д)

Рисунок 5. Графики компрессии H :
 а) – исходная функция W ;
 б) – добавочный компонент Q ;
 в) – сумма S ; г) – первая построчная
 производная S' ; д) – рассогласование
 R для W в кодере и декодере

Первое слагаемое функционала с коэффициентом c_1 характеризует цель повышения степени гладкости производной суммарной функции (требование объёма кодов). Второе слагаемое с коэффициентом c_2 характеризует цель сохранения незначительного различия входного кодируемого и выходного декодируемого сигналов (требование качества изображения). Приоритеты между указанными целями регулируются весовыми коэффициентами c_1, c_2 .

Чем выше значение c_1 , тем более гладкой становится суммарная функция $s=w+q$, тем меньшая разрядная сетка требуется для хранения значений её первой производной и тем больше проявляется эффект уплотнения кода. Выбор в пользу повышения значения c_2 , напротив, сохраняет качество изображения, устремляя к нулю разность $w-f$, но при этом обеспечивает низкий коэффициент компрессии. Ограничение связи при функции-множителе Лагранжа λ по смыслу представляет собой фильтр высоких частот. Через параметр a задаётся частота среза фильтра.

Необходимые условия экстремума состоят в равенстве нулю первой вариации функционала. Применительно к рассматриваемому функционалу, в соответствии с методом неопределённых множителей Лагранжа, в качестве необходимых условий экстремума имеем два уравнения Эйлера и одно ограничение связи, объединённых в систему обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} 2c_1 w'' + 2c_1 q'' + ak\lambda' = 0, \\ -a\lambda' + 2c_2 w - 2c_2 f + \lambda = 0, \\ akw' + akq' - af' - f = 0. \end{cases} \quad (29)$$

Данная система решается на программном уровне в дискретном виде приближёнными методами с заменой производных разностными отношениями. Помимо необходимых условий экстремума, в работе на основе второй вариации и матрицы Гёссе определены также достаточные условия экстремума функционала, после чего по критерию Гурвица проанализирована устойчивость оптимального решения.

В пятой главе на основе теоретических и экспериментальных исследований проведены сравнительный анализ и оценка эффективности предложенных методов, после чего представлены сведения о внедрении результатов исследования. Теоретические исследования проводились путём математического моделирования с помощью программного средства Matlab. Для проведения экспериментальных исследований были разработаны 2 лабораторных стенда (рисунок 6, таблица 2).

Стенды имеют идентичную конструкцию, но разное программное обеспечение. Первый стенд использовался в качестве источника, второй – в качестве приёмника. Оба стенда были спроектированы и изготовлены самостоятельно с помощью программы Altium Disigner. Программное обеспечение стендов разработано с помощью программных средств Cube MX и Keil uVision. В качестве источника помехи использовался широкополосный генератор помех с белым Гауссовским шумом. В качестве шумомера использовался спектральный анализатор.

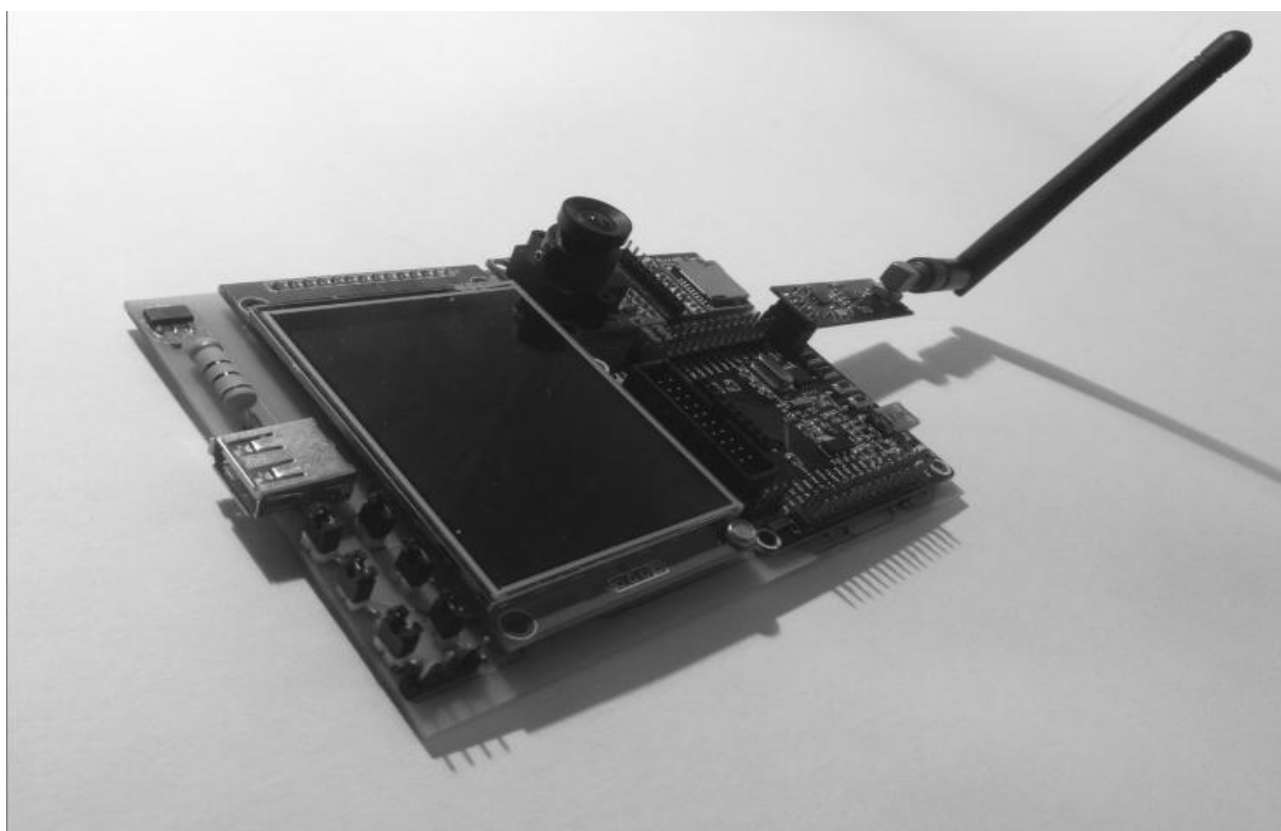


Рисунок 6. Фотография экспериментального стенда

Таблица 2 – Основные компоненты стенда

№	Компонент	Маркировка
1	Отладочная плата	STM32F103-51
2	Жидкокристаллический дисплей	ILI9341
3	Цифровая видеокамера	OV2640
4	Модуль внешней памяти	SD-MICRO-9
5	Модуль беспроводной связи	NRF24L01

Алгоритм проведения эксперимента для отдельно взятого изображения (кадра) устроен следующим образом. Источник получает очередное изображение с помощью цифровой видеокамеры, сохраняет исходное изображение на SD-карту, отображает изображение на экране LCD-дисплея, выполняет компрессию, после чего передаёт коды изображения приёмнику. Приёмник получает коды изображения, выполняет декомпрессию, отображает восстановленное изображение на экране LCD-дисплея, после чего сохраняет декодированное изображение на SD-карту. Критерии помехоустойчивости радиоканала измеряются во время передачи изображений по линии связи. Критерии качества видеокодека оцениваются апостериорно, по парам кодируемых и декодируемых изображений, сохранённых на SD-картах источника и приёмника.

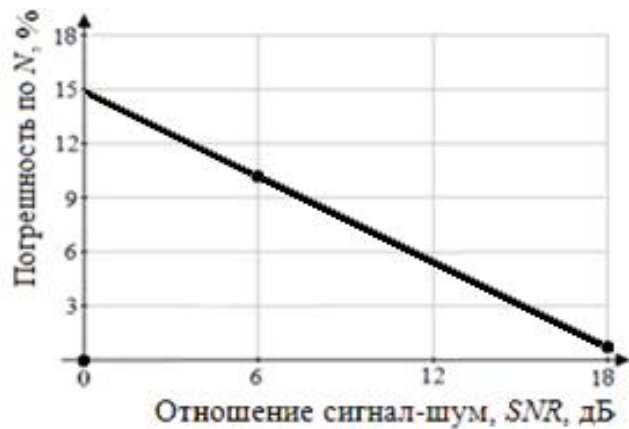
По результатам сравнительного анализа прототипных и предложенных решений были получены следующие результаты. В однолучевой схеме распространения, характеризующей распространение сигнала в свободном пространстве при отсутствии препятствий и отражений, средний выигрыш предложенного метода проектирования радиоканала по точности оценки отношения сигнал-шум составил 12.7%, максимальный выигрыш – 23.2% по сравнению с ближайшим аналогом. В двухлучевой схеме распространения, характеризующей случай с отражением сигнала от металлической крыши автомобиля, средний выигрыш предложенного метода проектирования радиоканала по точности оценки отношения сигнал-шум составил 38.5%, максимальный выигрыш – 44.2% по сравнению с ближайшим аналогом. Средние выигрыши в коэффициенте компрессии и качестве декодируемого изображения оказались равными 4.2% и 7.7%. Максимальные показатели улучшения по указанным критериям составили 9.2% и 17.6% соответственно.

В задаче о транспортных потоках полученные выигрыши были конвертированы в повышение точности распознавания автомобильных проекций (рисунки 7,8). Согласно результатам исследования, предложенные технические решения, взятые в совокупности, позволили удержать погрешность автоматического распознавания автомобильных проекций в кадре

на отметке не более 6% во всём диапазоне экспериментальной высот от 15 до 70 м. Количество промахов автоматического распознавания при этом было сокращено в среднем на 27.2% по сравнению с методами-прототипами.



а)



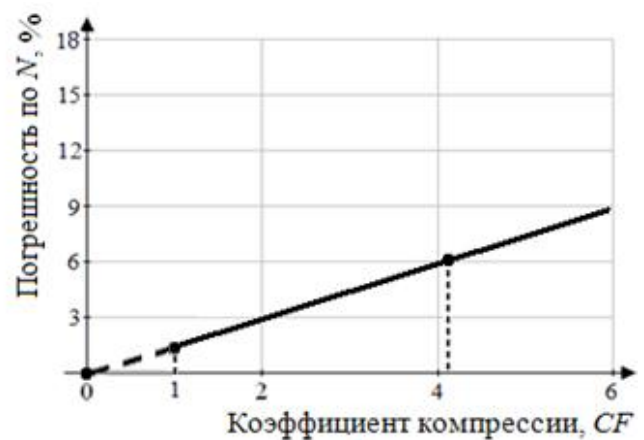
б)

Рисунок 7. Погрешность по количеству автомобилей, вносимая шумовым фоном: а) – пример зашумлённого изображения;

б) – аппроксимация погрешности по количеству автомобилей в зависимости от отношения сигнал-шум в тракте приёмного устройства



а)



б)

Рисунок 8. Погрешность по количеству автомобилей, вносимая компрессией:

а) – пример декодированного изображения; б) – аппроксимация погрешности в зависимости от коэффициента компрессии видеокодека

В заключении подытожены основные результаты исследования, указано, за счёт чего решена научная проблема, а также достигнуты цель и задачи исследования, после чего приведены сведения о внедрении результатов исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведён аналитический обзор и сравнительный анализ существующих методов проектирования радиоканалов со встроенным видеокодеком применительно к задаче беспроводного мониторинга транспортных потоков города. Установлено, что основными недостатками известных технических решений, препятствующими повышению качества беспроводной передачи цифровых изображений и повышению точности распознавания автомобильных проекций, являются низкая точность параметрического расчёта радиоканала по критериям помехоустойчивости, а также наличие фактора компрессии изображений;

2. На основе электродинамического уравнения в частных производных второго порядка с произвольной правой частью разработана математическая модель радиоканала беспроводной передачи цифровых видеоизображений с учётом городских условий, включая следующие основные факторы: тип модуляции сигнала, несущая частота, расстояние передачи, наличие шумов и помех, свойства среды, а также наличие препятствий, отражений и многолучевого характера распространения сигнала. Близость математической модели к реальным условиям позволила повысить расчётную точность радиоканала;

3. На основе постановки и решения задачи оптимизации разработан метод проектирования радиоканала со встроенным видеокодеком, обеспечивший оптимизацию радиоканала по следующим основным критериям: мощность передающего устройства, ширина полосы радиоканала, отношение сигнал-шум, вероятность битовой ошибки, коэффициент компрессии и качество декодируемых изображений. Многокритериальный подход позволил рационально перераспределить ресурсы радиоканала в пользу повышения качества беспроводной передачи цифровых изображений с учётом требований помехоустойчивости и фактора компрессии и обеспечил повышение расчётной точности оценки отношения сигнал-шум в среднем на 23.2% по сравнению с ближайшим методом-прототипом;

4. На основе постановки и решения задачи вариационного исчисления разработан метод компрессии цифровых видеоизображений, обеспечивший совместное повышение коэффициента компрессии и качества декодируемых изображений в режиме реального времени. Видеокодек, разработанный на основе данного метода обеспечил выигрыш в коэффициенте компрессии на 9.2% и в качестве декодируемых изображений на 17.6% по сравнению с ближайшим аналогом. Подтверждена эффективность видеокодека по отношению, в том числе, к изображениям с высокочастотным спектром, к числу которых относятся изображения с большим количеством автомобилей в кадре;

5. Проведены теоретические и экспериментальные исследования разработанных технических решений. Осуществлён сравнительный анализ прототипных и предложенных методов. Показано, что в задаче о транспортных потоках повышение качества декодируемых изображений обеспечивает значительное увеличение точности распознавания автомобильных проекций и сокращает количество промахов автоматического распознавания в среднем на 27.2%, что способствует повышению эффективности анализа и управления транспортными потоками.

6. Результаты исследования были рекомендованы для построения беспроводных систем мониторинга транспортных потоков и внедрены в Управлении ГИБДД УМВД России по Тульской области для сбора статистических сведений о транспортных потоках и их анализа применительно к различным участкам автотрасс.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Калистратов, Д.С. Статистический анализ и компрессия цифровых аэровидеоизображений транспортных потоков: монография / Д.С. Калистратов, Е.И. Минаков, В.А. Бархоткин, А.П. Киселёв, – Тула: Издательство ТулГУ, 2016. – 121 с.
2. Калистратов, Д.С. Видеокодирование. Способы компенсации движения в цифровых динамических видеоизображениях: монография / Д.С. Калистратов. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2014. – 96 с.
3. Калистратов, Д.С. Видеокодирование. Оптимизация методов компрессии статических видеоизображений: монография / Д.С. Калистратов, Е.И. Минаков, В.А. Бархоткин, – Тула: Издательство ТулГУ, 2016. – 104 с.
4. Калистратов, Д.С. Модель видеокодека для микропроцессоров отечественного производства: монография / Д.С. Калистратов, Е.И. Минаков, В.А. Бархоткин, А.П. Киселев – Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 104 с.

Публикации в изданиях из перечня ВАК

5. Калистратов, Д.С. Особенности беспроводной передачи цифровых изображений по радиоканалу со встроенным видеокодеком / Д.С. Калистратов, А.Г. Самойлов // Проектирование и технология электронных средств. – 2026. – № 1. – С. 25 – 31.
6. Калистратов Д.С., Учёт фактора гидрометеоров в математических моделях радиоканалов передачи цифровых изображений / Д.С. Калистратов, А.Г. Самойлов // Проектирование и технология электронных средств. – 2025. – № 4. – С. 39 – 44.
7. Калистратов, Д.С. Особенности определения отношения сигнал-шум в системах радиосвязи с цифровой модуляцией сигнала по методу комплексной огибающей / Д.С. Калистратов, Д.Г. Митрофанов // Современная наука:

актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2025. – № 8. – С. 58 – 63.

8. Калистратов, Д.С. Методы определения отношения сигнал-шум в системах радиосвязи / Д.С. Калистратов, Д.Г. Митрофанов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2025. – № 13. – С. 1 – 9. DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.023.

9. Калистратов, Д.С. Метод компрессии цифровых статических видеоизображений / Д.С. Калистратов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 6 (180). – С.10 – 15.

10. Калистратов, Д.С. Об устойчивости экстремалей целевого функционала в вариационных задачах компрессии цифровых видеоизображений / Д.С. Калистратов // Перспективы науки. – 2019. – № 6 (117). – С.10 – 14.

11. Калистратов, Д.С. Перспективные системы мониторинга автотранспортных потоков мегаполисов / Д.С. Калистратов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2019. – № 12. – С.62 – 65.

12. Калистратов, Д.С. Проблемы кодирования и передачи квазистационарных аэровидеоизображений в информационно-измерительных системах видеомониторинга состояния автотранспортных потоков / Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов, А.П. Киселёв // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – № 6. – С.48–51.

13. Калистратов, Д.С. Необходимые и достаточные условия экстремума функционала в задачах компрессии цифровых видеоизображений, решаемых методами классического вариационного исчисления / Д.С. Калистратов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2019. – № 3. – С.74 – 79.

14. Калистратов, Д.С. Метод формирования бинарной кадровой маски движения / Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 1. – С. 34–37.

15. Калистратов, Д.С. Особенности статистической обработки и компрессии аэровидеоизображений в электронно-измерительных системах мониторинга состояния транспортных потоков / Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов, А.П. Киселев // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2018. – № 11. – С.84 – 87.

16. Калистратов, Д.С. Метод геометрической стабилизации квазистационарных аэровидеоизображений в информационно-измерительных системах видеомониторинга / Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов // Вестник компьютерных и информационных технологий.– 2016. – № 4. – С.46–49.

17. Калистратов, Д.С. Методика геометрической реконструкции проекции асфальтового покрытия в задачах статистического анализа и компрессии аэровидеоизображений транспортных потоков / И.Е. Агуреев, Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов, А. П. Киселёв, Н.А. Фролов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 200 – 205.

18. Калистратов, Д.С. Применение векторных полей для анализа и прогнозирования движения в цифровых динамических видеоизображениях / Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 494–498.

19. Калистратов, Д.С. Метод ускоренной геометрической стабилизации изображений видеосигнала нестационарного источника аэровидеосъёмки / И.Е. Агуреев, Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – № 11. – С. 238 – 244.

20. Калистратов, Д.С. Методы геометрической реконструкции пространственной стереовидеоповерхности / Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. – № 11. – С. 25 – 27.

21. Калистратов, Д.С. Модель электронно-измерительной системы видеомониторинга состояния транспортных потоков на основе компрессии и передачи панорамных аэровидеоизображений / В.А. Бархоткин, Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов // Наноиндустрия. 2016. – № 5. – С. 189 – 193.

22. Калистратов, Д.С. Применение гибридных аналогово-цифровых систем для повышения эффективности телевизионных изображений / Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – № 1. – С. 100 – 102.

23. Калистратов, Д.С. Режимы формирования кадровых прогнозов в компенсаторах движения видеообъектов / Е.И. Минаков, Д.С. Калистратов // Известия Тул ГУ. Технические науки. – 2012. – №. 11. – С. 188 – 193.

Патентная документация

24. Калистратов Д.С., Минаков Е.И., Киселев А.П., Способ оценки отношения сигнал-шум на входе приёмного устройства для радиосигнала с цифровой амплитудной модуляцией // Патент России на изобретение № 2695953. 2019. Бюл. № 22 -2019.

25. Калистратов Д.С., Минаков Е.И., Способ беспроводной передачи цифровых панорамных аэровидеоизображений // Патент России на изобретение № 2707139. 2019. Бюл. № 33 -2019.

26. Калистратов Д.С., Минаков Е.И., Способ кодирования – декодирования цифровых видеоизображений // Патент России на изобретение № 2616176. 2017. Бюл. № 11 -2017.

27. Калистратов Д.С., Минаков Е.И., Способ кодирования – декодирования цифровых статических видеоизображений // Патент России на изобретение № 2616178. 2017. Бюл. № 11 -2017.

28. Калистратов Д.С., Минаков Е.И., Способ компенсации движения в цифровых динамических видеоизображениях // Патент России на изобретение № 2552139. 2015. Бюл. № 16 -2015.

29. Калистратов Д.С., Минаков Е.И., Способ компенсации движения в цифровых динамических стереовидеоизображениях // Патент России на изобретение № 2550544. 2015. Бюл. № 13 -2015.

30. Калистратов, Д.С. Эмулятор распространения радиосигнала с цифровой модуляцией / Д.С. Калистратов, Е.И. Минаков // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2019611310, РОСПАТЕНТ, 24.01.2019.

31. Калистратов, Д.С. Видеокодек / Д.С. Калистратов, Е.И. Минаков // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014616903, РОСПАТЕНТ, 08.09.2014.

32. Калистратов, Д.С. Анализатор автотранспортных потоков по цифровым панорамным видеоизображениям / Д.С. Калистратов, Е.И. Минаков, А.П. Киселев // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018664907, РОСПАТЕНТ, 26.11.2018.

Публикации в Web of Science и SCOPUS

33. Kalistratov D. (2019) Wireless Video Monitoring of the Megacities Transport Infrastructure. Civil Engineering Journal, vol. 5, no 5, pp. 1033–1040. DOI: 10.28991/cej-2019-03091309.

34. Kalistratov D. (2020) Image Compression as a Variation Calculus Task. Journal of Communications, vol. 15, no. 1, pp. 95-100, January 2020. DOI: 10.12720/jcm.15.1.95-100.

35. Barhotkin V.A., Minakov E.I., Kalistratov D.S., Kochetkov M.P. (2017) Methods of artificial intelligence in the tasks of information and measuring analysis and digital processing of quasistationary aerovideoimages. Conference Proceedings – 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2016 (Saratov, Russia, September 22-23, 2016), v.2, pp. 305 – 311, DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879017.

36. Barhotkin V.A., Minakov E.I., Kalistratov D.S., Kochetkov M.P. (2017) Methods of digital filtering in the tasks of information and measuring analysis and compression of panoramic videoimages of road traffic. Conference Proceedings – 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2016 (Saratov, Russia, September 22-23, 2016), v.2, pp. 311 – 316, DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879018.

Доклады на научных конференциях

37. Калистратов, Д.С. Особенности оценки и измерений отношения сигнал-шум в задачах беспроводной передачи видеоизображений с цифровой амплитудной модуляцией радиосигнала / Д.С. Калистратов, Е.И. Минаков, // Моделирование и анализ сложных технических и технологических систем: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Магнитогорск: Издательство Аэтерна, 2018. –С. 41 – 44.

38. Калистратов, Д.С. О распознавании асфальтовой проекции в задачах статистического анализа и компрессии аэровидеоизображений транспортных потоков / Д.С. Калистратов, А.П. Киселев // Теоретические и практические проблемы развития современной науки: сборник материалов XI Международной научно-практической конференции. – Махачкала: Издательство ООО «Апробация», 2016. –С. 24 – 26.

39. Калистратов, Д.С. Сочетание методов геометрической стабилизации и компрессии аэровидеоизображений транспортных потоков / Д.С. Калистратов, А.П. Киселёв // Теоретические и практические проблемы развития современной науки: сборник материалов XI Международной научно-практической конференции. – Махачкала: Издательство ООО «Апробация», 2016. –С. 23 – 24.

40. Калистратов, Д.С. Перспективы использования многомерных функций для оценки качества работы современных видеокодеков / Д.С. Калистратов // Перспективы развития информационных технологий: сборник статей материалов XVIII Международной научно-практической конференции под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2014. – С. 29 – 31.

41. Калистратов, Д.С. Способы компенсации движения в цифровых динамических видеоизображениях / Д.С. Калистратов // Перспективы развития информационных технологий: сборник статей материалов XVIII Международной научно-практической конференции под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2014. – С. 31 – 36.

42. Калистратов, Д.С. Методы формирования бинарной кадровой маски движения / Д.С. Калистратов // Микроэлектроника и информатика: тезисы докладов 20-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Москва: Издательство МИЭТ. – 2013. – С. 188.

Калистратов Дмитрий Сергеевич

**МЕТОДОЛОГИЯ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВЫХ
ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА
ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ГОРОДА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 27.05.2026 г.

Формат 60x84/16. Усл. Печ. Л. 2,0. Тираж 100 экз.

Издательство Владимирского государственного университета
Имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87