

На правах рукописи

Степанец Ирина Валерьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
МЕТОДОВ РАСЧЁТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Одоевский Сергей Михайлович**

Официальные  
оппоненты: **Тихвинский Валерий Олегович**,  
доктор экономических наук,  
кандидат технических наук, профессор,  
Ордена Трудового Красного Знамени Российской  
научно-исследовательский институт радио имени  
М.И. Кривошеева, Центр исследований  
перспективных беспроводных технологий связи,  
главный научный сотрудник

**Векшин Юрий Евгеньевич**,  
кандидат технических наук,  
16 Центральный научно-исследовательский  
испытательный ордена Красной Звезды институт  
имени Маршала войск связи А.И. Белова,  
2 Управление, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»,  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 19 июня 2024 года в 15.00 на заседании  
диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального  
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-  
Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу  
Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте [www.sut.ru](http://www.sut.ru).

Автореферат разослан 19 апреля 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 55.2.004.01,  
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Радиорелейная связь широко применяется на транспортных сетях связи и сетях доступа различного назначения благодаря возможности быстрого развёртывания с существенно меньшими затратами по сравнению с волоконно-оптическими линиями связи (ВОЛС). В сетях подвижной связи радиорелейная связь составляет основу беспроводного распределительного транспортного сегмента, так как обеспечивает информационное включение узлов радиодоступа с ядром сети напрямую или через ближайшую площадку, оборудованную точкой доступа к ВОЛС. Развитие технологий подвижной связи 5G, и в перспективе 6G, выдвигает высокие требования к пропускной способности беспроводного транспортного сегмента в целом и радиорелейной связи в частности. Одним из направлений повышения пропускной способности систем радиорелейной связи для удовлетворения требований сетей 5G является освоение новых диапазонов радиочастотного спектра. В отчёте Европейского института телекоммуникационных стандартов ETSI отмечается, что повышение пропускной способности радиорелейных систем беспроводного сегмента Backhaul/X-Haul распределительной транспортной сети 5G возможно на основе совместного применения стандартного диапазона частот (4–42 ГГц) и освоения диапазона миллиметровых волн (30–300 ГГц), включая Q-band (40,5–43,5 ГГц), V-band (59–64 ГГц), E-band (71–76/81–86 ГГц), W-band (92–96 ГГц) и D-band (150 ГГц).

В данной работе под пропускной способностью РРЛ как системы, у которой ограничен набор градаций скоростей, понимается максимально возможная скорость передачи данных.

Применение диапазона миллиметровых радиоволн позволяет в целом решить задачу повышения пропускной способности радиорелейных систем передачи. Однако, существенная зависимость распространения радиоволн указанного диапазона от метеоусловий и недостаточная изученность этой зависимости, выступают сдерживающим фактором прогнозирования качества связи в радиорелейных линиях (РРЛ) на этапе их планирования и проектирования. Сложилась ситуация, когда методы и модели расчёта показателей качества радиорелейной связи, описанные в нормативных документах отрасли и рекомендациях, отстают от технологических достижений и не охватывают широко применяемый на практике участок миллиметрового диапазона волн E-band. Особенностью радиорелейной связи в миллиметровом диапазоне частот является её сильная подверженность влиянию осадков, вызывающих глубокие замирания сигналов, для борьбы с которыми либо поддерживается повышенный запас мощности, либо используется адаптивная

модуляция (АМ), либо адаптивное управление мощностью передатчика в сочетании с АМ.

Под адаптивной модуляцией понимается автоматическое переключение уровней модуляции в зависимости от величины глубины замираний на радиорелейном интервале (РРИ) с целью поддержания максимальной пропускной способности РРИ в зависимости от текущих (контролируемых) условий распространения радиоволн. Контролируемыми параметрами являются мощность сигнала на приёме или отношение сигнал-шум, а управляемыми параметрами являются уровни модуляции. За счёт использования более высоких уровней модуляции, обеспечивающих более высокую скорость, но с меньшей устойчивостью, доступный запас на замирания может быть преобразован в увеличение пропускной способности. В рамках данной работы исследуются виды модуляции, которые широко применяются в радиорелейной связи: BPSK, QPSK, квадратурная амплитудная модуляция от 16-QAM до 4096-QAM.

Отсутствие в существующих методах и методиках расчёта показателей качества математического аппарата для учёта осадков в миллиметровом диапазоне затрудняет оценку эффективности функционирования РРИ на этапе планирования и снижает обоснованность соответствующих проектных и технических решений.

На основе имеющихся статистических данных радиорелейного оборудования миллиметрового диапазона E-Band и метеостанций были проведены исследования влияния метеоусловий на замирания сигналов, что позволило разработать метод и методику расчёта пропускной способности РРЛ с АМ в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн.

Таким образом, действующие методики оценки РРИ уже не в полной мере соответствует современным технологиям. В связи с этим, научные исследования в рамках кандидатской диссертации, направленные на учёт методов АМ и её влияния на пропускную способность ЦРРЛ при влиянии замираний от осадков в миллиметровом диапазоне являются **актуальными** и обладают научной новизной.

**Степень разработанности темы исследования.** Модели и методы расчёта пропускной способности РРЛ с АМ, которые позволяют проводить расчёты показателей качества РРИ для разных режимов работы радиорелейных станций с позиций функционирования РРЛ как системы с обратной связью, которая адаптируется к изменяющимся внешним условиям. Эти модели и методы основываются на положениях теории связи и распространения радиоволн, теории вероятности и математической статистики, теории надёжности радиотехнических систем.

Значимый вклад в развитие теории связи внесли учёные Л.М. Финк, В.И. Коржик, М.П. Долуханов, Д.Д. Кловский, А.Г. Зюко, Н.П. Хворостенко, Н.Л. Теплов, Н.Н. Клюев, Д. Проакис и др. В области исследования и разработки

моделей, методов и методик расчёта показателей качества функционирования цифровых РРЛ известен ряд основополагающих работ отечественных и зарубежных учёных А.И. Калинина, Л.В. Надененко, Е. А. Волкова, Л. Г. Ошеревича, О.С. Даниловича, С.В. Бородича, Г.О. Василенко, С.М. Одоевского, Марка Матье (Marc Mathieu) и др., а также рекомендаций и отчётов Международного союза электросвязи и спецификаций Европейского института телекоммуникационных стандартов. При этом остались недостаточно изученными вопросы расчёта показателей качества и пропускной способности РРЛ в миллиметровом диапазоне радиоволн. Вопросами исследования увеличения пропускной способности сетей связи перспективных технологий занимаются российские учёные А.Е. Кучерявый, Б.С. Гольдштейн, Г.А. Фокин и зарубежные учёные Т.Л. Марцетта (Thomas L. Marzetta), Э. Бйорнсон (Emil Björnson). Вопросам исследования адаптивных систем передачи информации с обратной связью посвящены работы учёных З.М. Каневского, В.П. Постюшкова, В.И. Коржика и др. Исследование АМ в сетях мобильной связи рассмотрены в работах Лайош Ханзо (Lajos Hanzo), Андреа Голдсмит (Andrea Goldsmith) и др. Однако, применительно к радиорелейной связи, до настоящего времени практически не уделялось внимание исследованию пропускной способности РРЛ с АМ, функционирующих как в традиционном, так и в миллиметровом диапазонах волн. Это обстоятельство и определило тему, цель и научную задачу настоящей работы.

**Объектом исследования** в данной работе является радиорелейная линия (РРЛ) с адаптивной модуляцией (АМ). **Предметом исследования** выступают методы расчёта пропускной способности радиорелейных линий с адаптивной модуляцией.

**Цель исследования** состоит в повышении пропускной способности радиорелейных линий за счёт использования АМ и количественного обоснования режимов работы радиорелейных станций (РРС) при планировании и оптимизации РРЛ с АМ.

**Задачи исследования.** В соответствии с поставленной целью, в диссертационной работе решены следующие задачи:

1) анализ условий функционирования и тенденций развития радиорелейной связи в целом и особенностей их применения в транспортном сегменте сетей подвижной связи;

2) сравнительный анализ существующего научно-методического аппарата и специализированного программного обеспечения для планирования и оптимизации радиорелейной связи на предмет учёта характеристик современных средств радиорелейной связи и тенденций их развития;

- 3) исследование особенностей реализации АМ в современных радиорелейных станциях и инерционности процесса переключения между уровнями модуляции;
- 4) разработка математической модели РРЛ с АМ в условиях быстрых и медленных замираний;
- 5) анализ статистических данных о влиянии метеоусловий на замирания сигналов на интервалах РРЛ с АМ в диапазоне E-band;
- 6) разработка метода расчёта пропускной РРЛ с АМ с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне;
- 7) сравнение результатов расчёта пропускной способности РРЛ с АМ в диапазоне E-band известными и предложенным методами с результатами измерений;
- 8) разработка методики расчёта пропускной способности РРЛ с АМ;
- 9) разработка предложений по программной реализации предложенных метода и методики расчёта пропускной способности РРЛ с АМ в программном комплексе ONEPLAN RPLS-DB Link.

**Научная задача исследования.** Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решена следующая научная задача: Разработка метода и методики расчёта пропускной способности РРЛ с АМ при планировании и оптимизации радиорелейных линий в различных условиях применения с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне.

**Научная новизна** диссертации заключается в следующем:

- 1) разработанная математическая модель РРЛ с АМ в отличие от известных включает аналитические зависимости показателей качества, определяющих пропускную способность РРЛ с учётом специфики передачи двух типов пакетного трафика (непрерывного и прерывистого), от технических характеристик радиорелейных станций и параметров условий распространения радиоволн, характеризующихся быстрыми и медленными замираниями в используемых диапазонах волн;
- 2) разработанный метод расчёта пропускной способности РРЛ с АМ заключается в том, что он в отличие от известных опирается на новое более точное математическое выражение, описывающее распределение вероятностей глубины замираний в миллиметровом диапазоне волн;
- 3) разработанная методика расчёта пропускной способности радиорелейной линии при планировании и оптимизации РРЛ заключается в том, что она в отличие от известных учитывает особенности замираний в различных диапазонах волн и их влияние на адаптивное изменение пропускной способности, распределяемой между двумя типами мультимедийного трафика (непрерывного/real-time и прерывистого/not real-time).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** *Теоретическая значимость* заключается в дальнейшем развитии и совершенствовании моделей и методов расчёта пропускной способности РРЛ с АМ, в том числе в новом недостаточно изученном миллиметровом диапазоне радиоволн.

*Практическая значимость* заключается в том, что разработанная методика, опирающаяся на разработанную модель и метод, реализована в составе действующего программного комплекса планирования и оптимизации радиорелейной связи, который применяется федеральными и региональными операторами сотовой связи и является инструментом для разработки обоснованных и своевременных технических и проектных решений по развитию и совершенствованию беспроводного сегмента транспортной распределительной сети, построенной на РРС с АМ.

Результаты работы реализованы в программном комплексе ONEPLAN RPLSDB планирования и оптимизации подвижной и фиксированной связи (сетевая версия) в конфигурации ONEPLAN RPLS-DB Link, а также использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича на кафедре Радиосистем и обработки сигналов.

**Методология и методы исследования.** Решение научной задачи для достижения цели исследований основано на применении методов математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, теории связи, теории надёжности радиотехнических систем, компьютерного моделирования в среде специализированных пакетов программного обеспечения MATLAB, Mathcad и Python.

**Положения, выносимые на защиту.** В результате решения указанной научной задачи в ходе диссертационных исследований были получены следующие основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель РРЛ с АМ, представляющая собой аналитические зависимости показателей достоверности, устойчивости и пропускной способности РРИ и линий от технических характеристик РРС и от параметров условий распространения радиоволн.

2. Метод расчёта пропускной способности РРЛ с АМ, учитывающий особенности распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне в виде предлагаемого распределения вероятностей глубины замираний, полученного на основе обработанных результатов измерений.

3. Методика расчёта пропускной способности РРЛ с АМ при планировании и оптимизации радиорелейных линий в различных условиях применения, представляющая собой последовательность расчётов коэффициентов неустойчивости РРИ для всех уровней модуляции, пропускной способности для непрерывного и

прерывистого трафика и пересчёт полученных результатов к аналогичным показателям качества РРЛ.

**Достоверность полученных научных результатов** обеспечивается корректным применением проверенного математического аппарата и подтверждается непротиворечивостью полученных результатов предшествующим исследованиям, а также положительными отзывами и одобрением, полученными при апробации результатов на научно-технических конференциях.

**Апробация результатов.** Основные результаты исследования докладывались на: X Международной конференции по инновациям, современной прикладной науке и экологическим исследованиям (ICIES', Марокко, 2022); Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО, Санкт-Петербург, 2018, 2022); II Международной конференции по электронике, телекоммуникациям и информационным технологиям (YETI, Санкт-Петербург, 2020); V Международной конференции по электротехнике и фотонике (CERC, Дармштадт, 2019); XIX Международной конференции по интернету вещей и умным пространствам (NEW2AN, Санкт-Петербург, 2019).

Получены свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2021619677 от 15 июня 2021 г. и патент № RU 2783387 от 11 ноября 2022 г., акт реализации результатов диссертационной работы в ООО «ИнфоТел», акт внедрения научных результатов диссертационной работы в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из них: 6 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, из которых 4 опубликовано по искомой специальности, 5 в изданиях SCOPUS, 2 результата интеллектуальной деятельности, 3 работы в других научных изданиях и материалах конференций.

**Соответствие научной специальности.** Работа соответствует пунктам 2, 8 и 13 паспорта специальности 2.2.13. «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

**Личный вклад автора.** Результаты, содержащиеся в диссертационной работе, получены автором самостоятельно, что подтверждается наличием единоличных публикаций. Личное участие автора в получении изложенных в диссертации результатов подтверждено соавторами и отражено в совместных публикациях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы (147 источников) и 3 приложений. Общий объём работы – 173 страницы, включая 54 рисунка и 23 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и ее основные задачи, отмечена новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложено краткое содержание работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** представлены результаты анализа технических возможностей и особенностей применения современных РРЛ. Выявлены роль и место РРЛ в транспортном сегменте сетей подвижной связи (СПС). Проведён анализ условий функционирования и тенденций развития РРЛ. В завершении раздела приведены результаты анализа существующего научно-методического аппарата, применяемого для оценки показателей качества функционирования РРЛ, и выявлены элементы, не учитываемые в существующих моделях методах и методиках, но являющиеся актуальными для расчётов пропускной способности и устойчивости РРЛ с АМ. Исходя из этого, поставлена задача на исследование и определены пути её решения.

Общее развитие СПС оказывает влияние на применяемые технологии в радиорелейной связи. В таблице 1 сопоставлены основные требования к пропускной способности сети доступа 5G и соответствующие им требуемые характеристики и технологии к сегментам Backhaul/X-Haul беспроводной транспортной сети для различных типов местности.

Проведённый анализ показал, что требования, выдвинутые группой 3GPP к задержкам и к пропускной способности базовой станции в сети доступа 5G ведут к ещё более жёстким требованиям к беспроводному транспортному сегменту. Построение беспроводного транспортного сегмента сети 5G, отвечающего предъявленным требованиям по пропускной способности, основано на освоении более высоких диапазонов радиочастот (колонка Диапазоны частот в табл. 1) и применении на РРЛ различных технологий и конфигураций для повышения пропускной способности (колонка Технологии в табл. 1).

С одной стороны, АМ обеспечивает устойчивость работы РРЛ при воздействии неблагоприятных факторов за счёт перехода на более низкие режимы модуляции, а с другой стороны, даже при работе на низких режимах модуляции обеспечивает передачу приоритетных данных с более низкой скоростью. Следовательно, АМ влияет как на устойчивость, так и на пропускную способность РРЛ. Разработка модели РРЛ с АМ для оценки устойчивости и пропускной способности является научной задачей, обладающей новизной и практической значимостью.

Таблица 1 – Требования к пропускной способности сетей доступа 5G и соответствующие им требования к технологиям транспортной сети

Параметры сети доступа 5G (gNB)			Характеристики беспроводного транспортного сегмента Backhaul/X-Haul			
Тип местности	Расстояние между узлами, км	Пропускная способность, Гбит/с	Типовая топология	Пропускная способность, Гбит/с	Диапазоны частот	Технологии и конфигурации
Регион (Rural)	> 10	< 3	Точка-Точка (PtP), радиорелейная линия (РРЛ)	2 – 4	6 – 15 ГГц, агрегация ВСА MW (Low +High)	Полоса (56-112) МГц XРІС
Сельская (Semi-Rural)	< 10	< 5	Точка-Точка (PtP), радиорелейная линия (РРЛ)	4 – 10	15 – 42 ГГц, агрегация ВСА (MW+mmW)	Полоса (56-224) МГц XРІС, LOS 2×2 MIMO
Пригород (Sub-Urban)	< 7	< 5	Точка-Точка (PtP), радиорелейная линия (РРЛ)	4 – 10	15 – 42 ГГц, агрегация ВСА (MW+mmW)	Полоса (56-224) МГц XРІС, LOS 2×2MIMO
Город (Urban)	< 3	5 – 10	Точка-Точка (PtP), Точка-Многоточка (PmP)	10 – 100	V-band E-band W-band D-band Традиционный диапазон $\geq 23$ ГГц	Полоса от 500 МГц до 4ГГц XРІС, LOS 2×2MIMO/OA M
Плотный город (Dense Urban)	< 1	$\geq 10$	Точка-Точка (PtP), Точка-Многоточка (PmP)	10 – 100	V-band E-band W-band D-band	Полоса от 500 МГц до 4ГГц XРІС, LOS 2×2MIMO/OA M

Результат анализа существующего научно-методического аппарата, используемого при планировании и оптимизации радиорелейной связи представлен в сводной таблице 2.

Ни одна из существующих методик и рекомендаций не охватывает современных диапазонов частот радиорелейной связи и не учитывает особенностей работы РРС в режиме АМ, в то время, как на практике применение АМ и использование упомянутых миллиметровых диапазонов существенно повышает пропускную способность и качество связи РРЛ. Недостаток в существующих рекомендациях методов для расчёта РРЛ с учётом работы в миллиметровом диапазоне и в режиме АМ существенно затрудняет

процедуру планирования РРЛ и принятия решения о её построении. В связи с этим, тема диссертационной работы, направленная на исследование и разработку методов расчета пропускной способности РРЛ с АМ, является актуальной и имеет практическую значимость.

Таблица 2 – Основные существующие методики и рекомендации по расчёту показателей качества РРЛ

Наименование документа	Разработчик	Авторы методики/рекомендации	Год разработки	Учитываемый частотный диапазон, ГГц	Учёт адаптивной модуляции
1 «Расчёт радиорелейных и тропосферных линий связи при их планировании и строительстве»	ВАС	Л.Г. Ошерович	1974	0,3 – 10	нет
2 «Методика расчёта радиорелейных и тропосферных линий связи»	ВАС	Е.А. Волков	1977	0,3 – 10	нет
3 «Методика расчёта трасс цифровых РРЛ прямой видимости в диапазоне частот 2-20 ГГц»	ФГБУ НИИР	В.М. Минкин Л.В. Надененко Р.К. Панова В.В. Святогор А.И. Калинин	1998	2 – 20	нет
4 ГОСТ 53363-2009 «Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчёта»	СПБГУТ, ООО «СвязьСервис»	Е.И. Мосур, В.Н. Прусакова, И.Е. Черепкова, Г.О. Василенко	2009, Переиздание 2020	3,4 – 40,5	нет
5 Рекомендация ITU-R P.530	МСЭ (ITU)	МСЭ-R, Сектор радиосвязи	1994, Переиздание 2021	2 – 40, для дождей по крайней мере до 100	нет

На основе проведённого анализа была формализована цель и задачи исследования.

**Во втором разделе** представлена математическая модель РРЛ с АМ. Приведены модели РРИ с постоянной и адаптивно изменяемой битовой скоростью передачи в

условиях замираний, в том числе с учётом особенностей быстрых и медленных замираний в РРЛ с АМ. Модели представляют собой совокупность математических зависимостей показателей устойчивости и пропускной способности РРИ от заданных параметров, внешних факторов и управляемых параметров режимов работы РРИ с АМ, в том числе от вида трафика, передаваемого в РРЛ.

В отличие от существующих методик разработанная математическая модель РРЛ с АМ позволяет рассчитывать пропускную способность, в чём заключается новизна предлагаемой модели. В существующих методиках пропускная способность задавалась в качестве исходных данных. Кроме того, разработанная модель позволяет получить численную оценку для трёх типов трафика: непрерывного (приоритетного/real-time), прерывистого (неприоритетного/not real-time) и агрегированного.

Под пропускной способностью РРИ без АМ с непрерывным типом трафика, работающего с постоянной скоростью передачи, понимается максимальная скорость  $C_{max}$ , поддерживаемая радиорелейным оборудованием, при условии, что коэффициент неготовности  $K_{нг}$  не превышает требуемого значения  $K_{нг.тр}$ :

$$C_{max} = \max_{i=1,n} C_i | K_{нг.i} \leq K_{нг.тр}, \quad (1)$$

где  $K_{нг.i} = F(V_i)$  – вероятность того, что уровень сигнала упадёт ниже чувствительности.

Предлагается оценивать пропускную способность РРИ отдельно для двух типов трафика: 1) приоритетный, требующий постоянную скорость передачи, рассматривается с максимальной скоростью  $C_{max}$  по формуле (1) и 2) неприоритетный, допускающий переменную скорость передачи, рассматривается со средней скоростью передачи  $C_{cp}$  по формуле (2):

$$C_{cp} = \sum_{i=1}^n C_i (F(V_{i+1}) - F(V_i)), \quad (2)$$

где  $V_i$  – допустимое ослабление сигнала.

В случае передачи обоих типов трафика одновременно именно по величине коэффициента неготовности РРИ с АМ при передаче первого типа трафика с заданной скоростью  $C'_{тр}$  делается вывод о пригодности интервала:

$$C''_{cp} = \sum_{i=j}^n (C_i - C'_{тр}) (F(V_{i+1}) - F(V_i)) = \sum_{i=j}^n (C_i - C'_{тр}) (P_{н.i+1} - P_{н.i}). \quad (3)$$

Приведенные формулы (1)–(3) являются основной отличительной особенностью разработанной методики расчёта пропускной способности РРЛ с АМ для расчёта

пропускной способности и КнГ отдельных РРЛ с учётом АМ, что было невозможно с использованием известных моделей расчёта РРЛ без АМ.

Для расчёта пропускной способности РРЛ с АМ по формулам (1–3) необходимо знать функцию распределения вероятностей (ФРВ) ослабления сигнала (функцию распределения замираний)  $F(V)$ . Если помимо функции  $F(V)$  известна функция плотности распределения вероятности (ФПВ) ОСШ  $f_{\gamma_{Fading}}$  в канале, то по предложенным формулам расчёта можно получить пропускную способность (4), вероятность ошибки (5) и коэффициент неготовности КнГ (6) для радиорелейного канала с АМ:

$$B_{adapt} = \sum_{i=1}^N L_i \cdot \int_{SNR_i}^{SNR_{i+1}} f_{\gamma_{Fading}}(\gamma_s) d\gamma_s, \quad (4)$$

где  $i$  – перебор номеров уровней модуляции, используемых в системе с АМ;  $L_i$  – количество бит в модуляционном символе  $i$ -го уровня модуляции  $M_i$ -QAM;  $f_{\gamma_{Fading}}$  – ФПВ случайной величины, характеризующая исследуемый канал;  $SNR_i$  – порог переключения ОСШ на  $i$ -ю модуляционную схему.

$$BER_{adapt} = B_{adapt}^{-1} \left( \sum_{i=1}^N L_i \cdot \int_{SNR_i}^{SNR_{i+1}} P_{b-AWGN_i}(\gamma_s) \cdot f_{\gamma_{Fading}}(\gamma_s) d\gamma_s \right), \quad (5)$$

где  $P_{b-AWGN_i}(\gamma_s)$  – вероятность ошибки в гауссовском канале для  $i$ -ой модуляции.

$$КнГ_{adapt} = \begin{cases} \int_0^{F_{SNR_1}} f_{\gamma_{Fading}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{SNR_1} \\ \dots \\ \int_0^{F_{SNR_N}} f_{\gamma_{Fading}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{SNR_N} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $F_{SNR_i}$  – пороговое значение запаса на замирания для  $i$ -го уровня работы интервала РРЛ с АМ,  $F$  – текущий запас на замирания.

На рисунке 1 представлен пример результатов расчёта  $B_{adapt}$  и  $BER_{adapt}$  для интервала РРЛ с АМ и интервалов с фиксированными режимами модуляции.

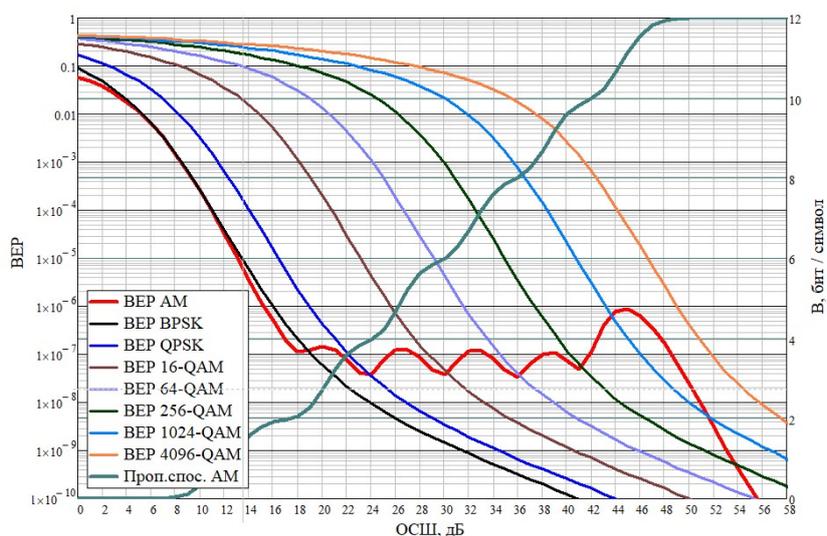


Рисунок 1 – Вероятность битовой ошибки и средняя скорость передачи (бит/символ) в канале РРЛ с АМ и замираниями Райса при значении  $k = 15$  для  $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

Результаты расчёта устойчивости (Кнг) интервала РРЛ с АМ и интервалов с фиксированными режимами модуляции при значении  $k$ -фактора распределения Райса  $k = 15$  представлены на рисунке 2.

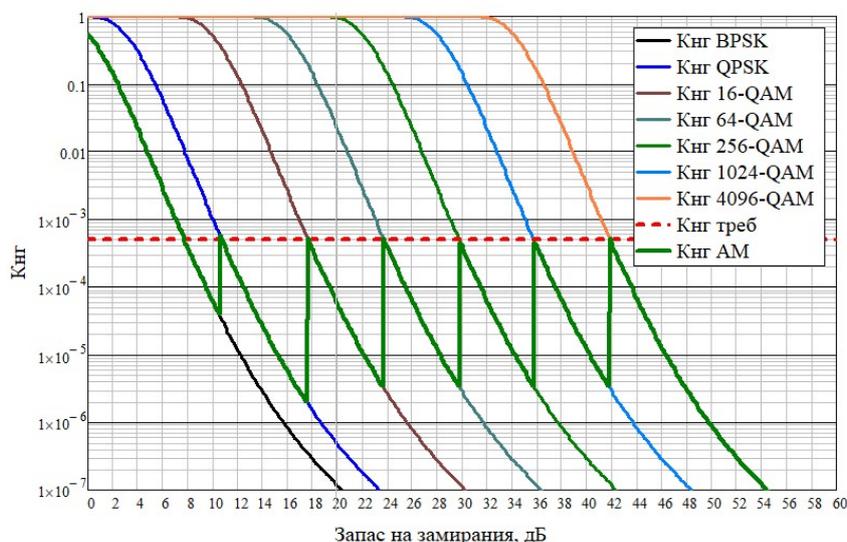


Рисунок 2 – Неготовность интервала РРЛ с АМ и замираниями Райса при значении  $k = 15$  для  $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

Предложенная модель интервала РРЛ с АМ в условиях замираний позволяет оценить помехоустойчивость по показателю вероятности битовой ошибки и пропускную способность по показателю средней скорости передачи, а также Кнг РРЛ в условиях быстрых и медленных замираний для высоких уровней адаптивной модуляции А-QAM.

**В третьем разделе** представлен метод расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне.

Приведены результаты анализа статистических данных о влиянии метеоусловий на замирания сигналов на интервалах РРЛ с АМ в диапазоне E-band. Проведено сравнение результатов измерений с результатами расчёта устойчивости и пропускной способности известными методами. На основе результатов сбора и обработки статистических данных с действующих в миллиметровом диапазоне РРИ и близлежащих метеостанций предложен метод расчёта пропускной способности РРЛ с АМ и изложено обоснование предлагаемого метода расчёта с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне в условиях воздействия погодных факторов, вызывающих замирания.

Сбор статистики измерений уровней сигналов происходил в умеренном климатическом поясе Европейского континента на 23-х радиорелейных интервалах и 41-й близлежащей метеостанции в течение 15 следующих друг за другом месяцев. На всех РРИ использовался режим АМ. Пространственные параметры наблюдаемых РРИ характеризовались длиной интервалов от 3 до 10 км и высотой подвеса антенн от 23 до 79 м. Расстояния между площадками с радиорелейными станциями (РРС) и метеостанциями составляли от 0,6 до 10 км. Технические параметры РРС: максимальная мощность передатчика +18 дБм; реальная чувствительность приёмника от -71,5 дБм (BPSK) до -48 дБм (128-QAM) для  $BER = 10^{-6}$ , ширина полосы сигнала 2000 МГц; диаметр антенны 0,60 м; ширина диаграммы направленности антенны 0,5°; коэффициент усиления антенны 50 дБ; доступные уровни модуляции 4QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM.

На основе статистических данных были получены усреднённые статистические функции плотности вероятности (ФПВ) и функции распределения вероятностей (ФРВ) уровней сигналов при разных уровнях АМ, которые представлены на рисунке 3.

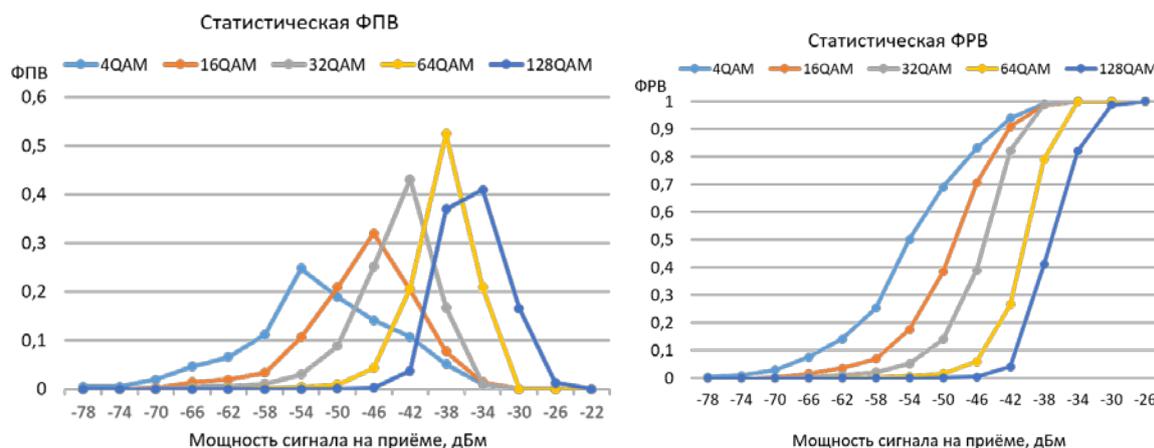


Рисунок 3 – Статистические функции плотности вероятности и статистические функции распределения вероятности мощности сигнала на входе приёмников РРС с АМ

Для выявления влияния различных погодных условий на замирания радиорелейного сигнала статистика РРИ была совмещена с метеорологической статистикой с использованием языка программирования Python. Это позволило выявить степень зависимости уровня сигнала на приёме РРИ от погодных параметров: температуры, температуры точки росы, давления, ветра, дождей, влажности.

В качестве примера на рисунке 4 представлены совмещённые графики двух групп статистик, снятых с периодом 15 минут на 1-м выбранном из 23-х РРИ: уровни мощности сигнала на входе приёмника РРС и погодных явлений вблизи этой станции (дата и время по горизонтальной оси, вертикальные оси имеют две шкалы: левая – совокупная для нескольких показателей, правая – интенсивность дождя [мм/15мин]).

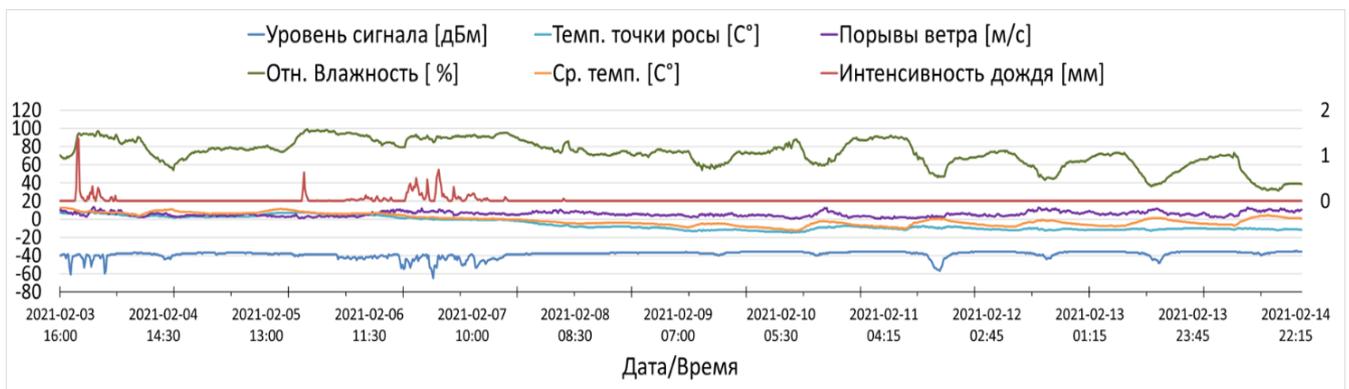


Рисунок 4 – Пример совмещённой статистики для РРИ № 2

Расчёты коэффициентов корреляции показали, что среди погодных явлений основной фактор – интенсивность дождя как непосредственно влияющий на уровень сигнала в диапазоне E-band и независимый от других погодных явлений.

Проведён анализ точности расчёта влияния дождей на уровень сигнала в диапазоне E-band по существующим методикам и рекомендациям, в результате которого оказалось, что ни одна из них не даёт результатов, соответствующих действительным значениям ФРВ уровня сигнала РРЛ, работающей в диапазоне E-band. Поэтому был разработан новый метод нахождения теоретической ФРВ замираний и расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом особенности распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне.

Предлагаемый в данной работе способ нахождения теоретической ФРВ замираний основан на методе моментов с помощью параметров, характерных для заданного статистического материала. Предлагается использовать экспоненциальное выражение для интегральной ФРВ:

$$F(A, \alpha, \beta, \delta) = \begin{cases} \alpha(\delta^2 e^{\beta \delta^2 A} + \delta e^{\beta \delta A} + e^{\beta A}), & A < 0, \\ 1, & A \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

где  $A$  – ослабление радиоволн в дожде, дБ. Определить параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  можно, основываясь на характерные для заданной статистики значения:  $P_d$  – вероятность наличия дождя, в долях;  $A_{sr}$  – статистическое среднее ослабление в дожде, дБ;  $D_A$  – статистическая дисперсия ослабления во время дождя, дБ<sup>2</sup>. Параметры  $P_d$ ,  $A_{sr}$ ,  $D_A$  могут быть получены на основе  $d_r$  – длины РРИ с учётом коэффициента дальности  $r$ ,  $\gamma_R$  – удельного затухания (дБ/км).

Для определения параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  при заданных значениях  $P_d$ ,  $A_{sr}$ ,  $D_A$  необходимо решить следующую систему уравнений относительно данных параметров:

$$\begin{cases} P_d = \alpha(\delta^2 + \delta + 1), \\ A_{sr} = \frac{-3}{\beta(\delta^2 + \delta + 1)}, \\ D_A = \frac{2}{\beta^2\delta^2} - A_{sr}^2, \end{cases} \quad (8)$$

где  $P_d$  – вероятность возникновения ослабления в результате дождя.

Результат расчёта ФРВ замираний по предложенному методу моментов и его сравнение с эмпирическими значениями и со значениями, полученными по Рекомендация ИТУ-R P.530, представлены на рисунке 5. На графике видна опасность применения чрезмерно оптимистичного прогноза, данного Рекомендацией ИТУ-R P.530, что на практике может повлечь к нарушению устойчивой работы РРИ в реальных условиях. Более надёжный прогноз даёт разработанный метод (сиреневая линия), который хорошо согласуется со статистическими данными (чёрная линия) и позволяет избежать указанных рисков.

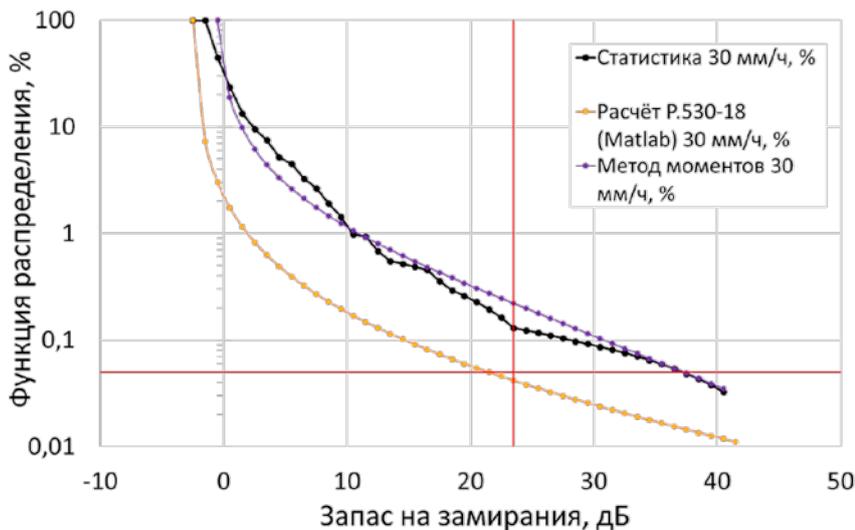


Рисунок 5 – Функции распределения вероятности уровня мощности сигнала на входе приёмника, рассчитанная для РРИ № 4 по предложенной и ИТУ-R методикам, и их сравнение со статистическими данными

Результаты расчёта пропускной способности представлены на рисунке 6.

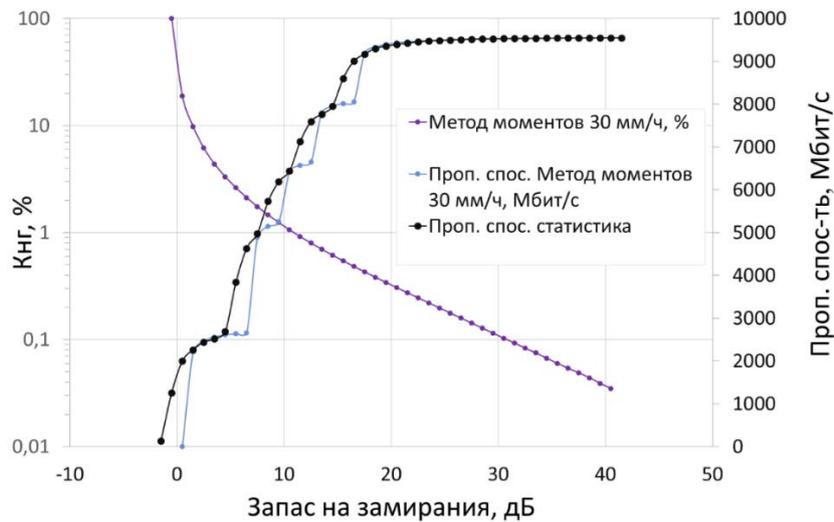


Рисунок 6 – Результаты расчёта пропускной способности и Кнг РРЛ № 4, полученные разработанным методом и на основе статистики

Численное сравнение результатов моделирования, полученных по разработанному методу и существующей Рекомендации ITU-R P.530 с эмпирическими значениями было проведено по критерию согласия Колмогорова для уровня значимости 5 % (табл. 3), что позволяет считать допустимой гипотезу о соответствии значений предложенного аналитического распределения и пропускной способности статистическим значениям.

Таблица 3 – Численное сравнение результатов моделирования

Уровень значимости по Колмогорову	5 %
Объём выборки	3088
Критерий согласия $\lambda_{\text{порог}}$	1,35
Критерий согласия $\lambda_{\text{P-530-18\_расч}}$	50,84
Критерий согласия $\lambda_{\text{Мет.моментов\_расч}}$	1,31

**В четвёртом разделе** представлена методика расчёта пропускной способности РРЛ с АМ при планировании и оптимизации РРЛ в различных условиях применения и изложена её обобщенная структура с использованием предложенного метода. Представлена программная реализации разработанной методики в составе программного комплекса ONEPLAN RPLS-DB Link. Описаны предложения по программной реализации разработанного метода расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне.

Раскрыты предложения по повышению пропускной способности за счёт использования РРЛ с АМ в транспортном сегменте сетей подвижной связи.

Целью разработки методики является прогноз и оценка пропускной способности, показателей качества РРЛ с АМ, а также нахождение оптимальных значений варьируемых параметров антенн проектируемой РРЛ с АМ на основе известных исходных данных.

Отличительной особенностью разработанной методики является возможность рассчитать пропускную способность в условиях функционирования РРЛ, а не задавать её значение перед расчётом в качестве исходного параметра, как это делается в существующих. Также, в отличие от известных, предлагаемая методика учитывает особенности замираний в различных диапазонах волн и их влияние на адаптивное изменение пропускной способности, распределяемой между двумя типами мультимедийного трафика (непрерывного/real-time и прерывистого/not real-time).

Предлагаемая методика расчёта РРЛ с АМ является дополнением к уже существующим методикам расчёта РРЛ.

Была проведена реализация предложенной методики, в результате которой был доработан интерфейс программного комплекса ONEPLAN RPLS-DB Link для учёта АМ (рисунок 7), а также была добавлена функция определения скоростей приоритетного и неприоритетного потоков согласно математической модели РРЛ с АМ, описанной во 2-м разделе (рисунок 7).

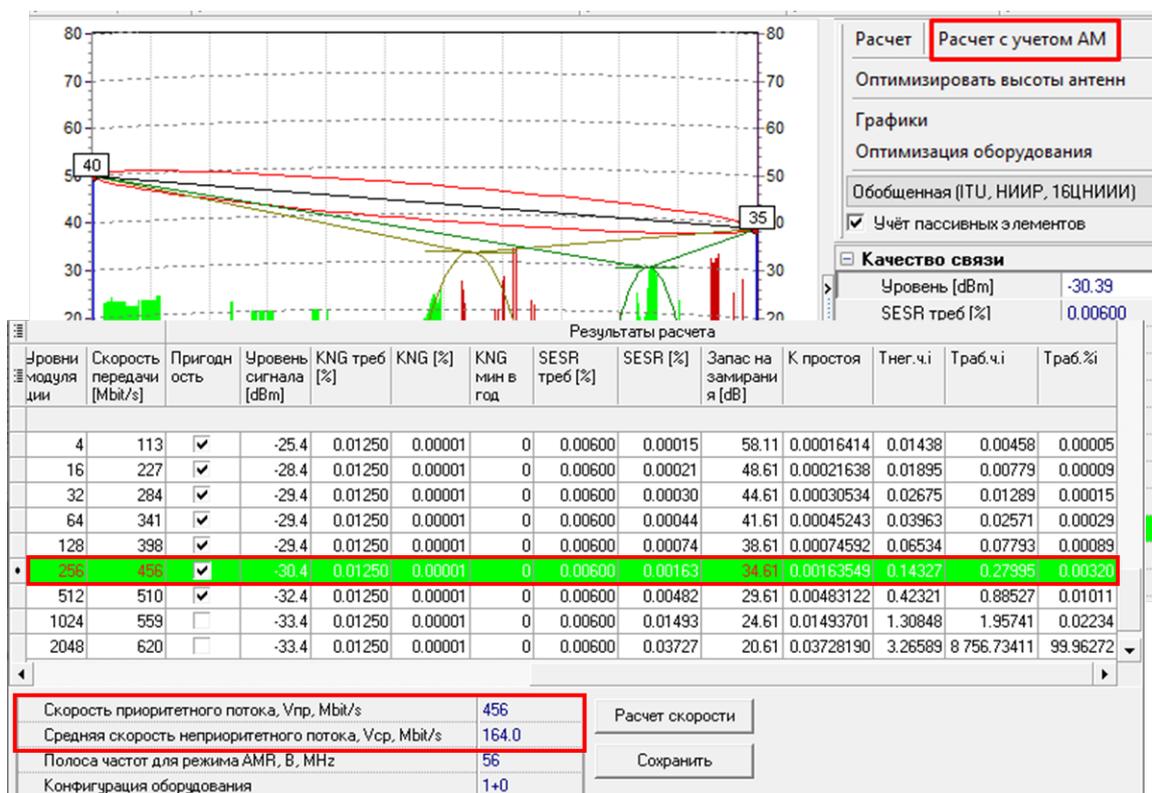


Рисунок 7– Визуализация результата расчёта РРЛ с АМ на профиле интервала

Было предложено включить параметры учёта дождя в программную реализацию для осуществления автоматического расчёта РРЛ с АМ (рисунок 8).

☐ Условия распространения радиоволн E-диапазон	
1. Среднее значение градиента диэл. проницаемости, $10^{-8}$ , 1/м	-9
2. Стандартное отклонение градиента, $10^{-8}$ , 1/м	7
3. Абсолютная влажность водяного пара, г/куб.м	7.5
4. Температура воздуха, гр.С	15
5. Атмосферное давление, мбар	1013
6. Средняя интенсивность дождя, мм/ч	20
7. Вероятность наличия дождя в долях	0.4976
8. Статистическая дисперсия ослабления, дБ <sup>2</sup>	3.099
9. Рассчитанное значение alpha	0.043
10. Рассчитанное значение beta	0.175
11. Рассчитанное значение delta	2.781
ВВЕР норм [%]	0

Рисунок 8 – Предложения по программной реализации учёта затухания в дожде в диапазоне E-Band

На основе результатов расчёта по разработанной методике было предложено на этапе планирования РРЛ количественно оценивать возможность применения способов повышения пропускной способности. Наряду с АМ было предложено учитывать в расчёте способы ХРПС, SDB, спаренные интервалы, агрегация несущих, что позволит достичь максимально возможной пропускной способности РРЛ, выдержав при этом требования к устойчивости РРЛ.

Благодаря использованию автоматизированных функций расчёта, реализованных в ПО ONEPLAN RPLS-DB Link, можно выявить оптимальный режим работы РРЛ с АМ по показателям устойчивости, с одной стороны, и пропускной способности, с другой стороны. Это позволит избежать ситуации, когда доступные модуляционные схемы на РРЛ с АМ используются не в полной мере, или, когда возникают потери в устойчивости связи при активации завышенной модуляционной схемы.

Таким образом, с помощью результатов расчёта по предложенной методике можно получить численное обоснование применения максимально возможного уровня модуляции на заданных РРЛ/РРЛ при дополнительном применении технологий повышения пропускной способности и провести численную оценку максимально возможной общей пропускной способности РРЛ с АМ в соответствии с требованиями к параметрам устойчивости, что позволит повысить общую пропускную способность РРЛ с АМ в заданных условиях.

**В заключении** изложены итоги выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель РРЛ с АМ, которая включает зависимости пропускной способности от ФРВ замираний для различных типов трафика в РРЛ: для приоритетного непрерывного типа трафика без использования АМ, для неприоритетного прерывистого типа трафика с использованием АМ и для агрегированного типа трафика.

2. Разработанная модель включает зависимости пропускной способности (информационный бит/модуляционный символ) и вероятности ошибки (BER) от ОСШ для систем радиорелейной связи типа «точка-точка» (характеризуемых замираниями с распределением Райса) и «точка-многоточка» (характеризуемых замираниями с распределением Накагами) с АМ, включающей BPSK-QPSK-MQAM, в условиях быстрых замираний.

3. Разработанная модель включает зависимости коэффициента неготовности Кнг от ОСШ для систем радиорелейной связи типа «точка-точка» (распределение Райса) и «точка-многоточка» (распределением Накагами) с АМ, включающей BPSK-QPSK-MQAM, в условиях быстрых и медленных замираний.

4. Достоинством разработанной модели является то, что она учитывает высокие уровни АМ до 4096-QAM и более. При определении порогов переключения использовались точные формулы для нахождения порогов переключения модуляции.

5. Представлены результаты обработки статистики замираний на интервалах РРЛ в диапазоне E-band и метеоданных, на основе которых была выявлена их взаимосвязь, учтённая в предлагаемом аналитическом выражении ФРВ замираний.

6. Разработан метод расчёта пропускной РРЛ с АМ в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн, который является наиболее точным по сравнению с существующими.

7. Отличительной особенностью разработанной методики расчёта пропускной способности РРЛ с АМ является учёт особенностей замираний в различных диапазонах волн и их влияние на адаптивное изменение текущей скорости передачи, распределяемой между двумя типами мультимедийного трафика (непрерывного/real-time и прерывистого/not real-time), на основе разработанных модели и методе, что позволяет повысить общую пропускную способность РРЛ с АМ в заданных условиях функционирования.

8. Разработанная методика позволяет проводить расчёт множества коэффициентов неустойчивости для всех поддерживаемых уровней модуляции, на основании которых оценивается средняя величина общей скорости агрегированного потока для отдельных РРИ и для всей РРЛ.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Научные статьи, опубликованные изданиях рекомендованных ВАК

1. Степанец И.В. Методика расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн / И. В. Степанец // Труды учебных заведений связи. – 2023. – Т. 9. – № 3. – 91-103 (по спец 2.2.13).

2. Степанец И.В. Модель функционирования сети связи, построенной на основе радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов / И.В. Степанец, С.М. Одоевский, В.О. Ключников // Труды учебных заведений связи. – 2021. – Т. 7. – № 4. – С. 63-76 (по спец 2.2.13).

3. Степанец И.В. Особенности применения и планирования радиорелейной связи в сетях 5-го поколения / И.В. Степанец, С.М. Одоевский, В.А. Степанец, Е.М. Зайчик // Информатизация и связь. – 2019. – № 3. – С. 77-83 (по спец 2.2.13).

4. Stepanets I.V. Capacity estimation ways of massive MIMO systems / G.A. Fokin, A. Mueller // T-Comm. – 2018. – Т. 12. – № 10. – P. 64-69 (по спец 2.2.13).

5. Степанец И.В. Обработка и учёт статистических характеристик мультимедийного трафика / И.В. Степанец, С.М. Одоевский, М.И. Рафальская // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 385-390.

6. Степанец И.В. Особенности реализации Massive MIMO в сетях 5G / И.В. Степанец, Г.А. Фокин // Первая миля. – 2018. – № 1. – С. 46-52.

### Свидетельства о результатах интеллектуальной деятельности

7. Степанец И.В. Патент № RU 2783387 от 11.11.2022. Способ передачи данных между радиорелейными станциями с адаптивной модуляцией / В.О. Ключников, С.М. Одоевский // Заявитель и патентообладатель Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. – 2022.

8. Степанец И.В. Программная реализация для ЭВМ. Расчёт радиорелейных интервалов с адаптивной модуляцией. Свидетельство о государственной регистрации № 2021619677 от 15.06.2021 г. / В.О. Ключников, С.М. Одоевский. – 2021.

### Публикации изданиях, индексируемых в WoS и Scopus

9. Stepanets I. Beamforming signal processing performance analysis for massive MIMO systems / I. Stepanets, G. Fokin // International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking. – Cham: Springer International Publishing. – 2019. – P. 329-341.

10. Stepanets I. Beamforming Techniques Performance Evaluation for 5G Massive MIMO Systems / I. Stepanets, G. Fokin, A. Müller // CERC. – 2019. – P. 57-68.

11. Stepanets I. Model of integrated radio access and wireless backhaul for 5th generation network / I. Stepanets, G. Fokin, S. Odoevskii // International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies: Proceedings of the YETI 2020, St. Petersburg, Russia. – Cham : Springer International Publishing. – 2020. – P. 637-645.

12. Stepanets I. Model of microwave link channel with adaptive modulation under the fading conditions / I. Stepanets, S. Odoevskii // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2022. – Т. 351. – P. 01064/1-01064/6.

13. Stepanets I. Positioning for location-aware beamforming in 5G ultra-dense networks / I. Stepanets, V. Lazarev, G.Fokin // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE. – 2019. – P. 136-139.

#### **Публикации в других изданиях и конференциях**

14. Степанец И.В. Методика расчёта пропускной способности радиорелейного интервала с адаптивной модуляцией в условиях райсовских замираний / И.В. Степанец // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. – СПб.: СПбГУТ, 2022. – Т. 3. – С. 371-376.

15. Степанец И.В. Оценка показателей качества разнесённого приёма систем Massive MIMO / И.В. Степанец, Г.А. Фокин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. – СПб.: СПбГУТ, 2018. – С. 279-284.

16. Степанец И.В. Тестирование программных средств анализа статистических характеристик мультимедийного трафика / И.В. Степанец, С.М. Одоевский, М.И. Рафальская // Цифровые средства связи: Вопросы их внедрения. Сборник трудов Международной научно-практической конференции кафедры связи. – Алматы, 2021. – С. 13-21.