

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Одоевский Сергей Михайлович

Санкт-Петербург – 2024

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ	14
1.1 Роль и место радиорелейных линий в транспортном сегменте сетей подвижной связи.....	14
1.2 Анализ условий функционирования и тенденций развития радиорелейных линий	30
1.3 Анализ существующего научно-методического аппарата и специализированного программного обеспечения для планирования и оптимизации радиорелейной связи	36
1.3.1 Существующий научно-методический аппарат, используемый при планировании и оптимизации радиорелейной связи	37
1.3.2 Известное специализированное программное обеспечение планирования и оптимизации радиорелейной связи	43
1.4 Постановка задачи исследований	47
1.5 Выводы по первому разделу	49
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ ЛИНИИ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ	51
2.1 Особенности реализации адаптивной модуляции в радиорелейной связи	51
2.2 Обобщённая математическая модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией	60
2.3 Математическая модель радиорелейного интервала с адаптивной модуляцией в условиях быстрых замираний	70
2.3.1 Модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в условиях райсовских замираний	71
2.3.2 Модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в условиях замираний Накагами.....	83

2.4 Математическая модель радиорелейного интервала с адаптивной модуляцией в условиях медленных замираний	88
2.5 Выводы по второму разделу	91
3. МЕТОД РАСЧЁТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ ЛИНИИ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ С УЧЁТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ.....	93
3.1 Особенности распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне..	93
3.2 Анализ статистических данных о влиянии метеоусловий на замирания сигналов на интервалах радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в диапазоне <i>E-band</i>	96
3.2.1 Анализ статистических данных о замираниях сигналов на интервалах радиорелейной линии с адаптивной модуляцией.....	97
3.2.2 Анализ влияния метеоусловий на замирания сигналов на интервалах радиорелейной линии с адаптивной модуляцией.....	100
3.3 Сравнение результатов измерений с результатами расчёта устойчивости и пропускной способности известными методами	106
3.3.1 Сравнение результатов измерений с результатами расчёта устойчивости известными методами	106
3.3.2 Сравнение результатов измерений с результатами расчёта пропускной способности известными методами	112
3.4 Обоснование предлагаемого метода расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне	114
3.5 Выводы по третьему разделу	121
4. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ ЛИНИИ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ	

ПЛАНИРОВАНИИ И ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ	123
4.1 Структура методики расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией	123
4.2 Программная реализации разработанной методики в составе программного комплекса <i>ONEPLAN RPLS-DB Link</i>	128
4.3 Предложения по программной реализации разработанного метода расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне	134
4.4 Предложения по повышению пропускной способности за счёт использования радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в транспортном сегменте сетей подвижной связи	137
4.5 Выводы по четвертому разделу	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	147
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ДЛЯ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	172
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	173

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Радиорелейные линии (РРЛ) 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 радиорелейные линии составляют основу беспроводного распределительного транспортного сегмента, так как обеспечивают 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 радиорелейных линий, в частности [1, 119]. Одним из направлений повышения пропускной способности РРЛ для удовлетворения требований сетей 5G является освоение новых диапазонов радиочастотного спектра [87, 88, 102, 139]. В отчёте Европейского института телекоммуникационных стандартов *ETSI GR mWT 012* отмечается, что повышение пропускной способности РРЛ беспроводного сегмента *Backhaul/X-Haul* распределительной транспортной сети 5G возможно на основе совместного применения уже освоенного диапазона частот (4 – 42 ГГц) и 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), который начал применяться в радиорелейной связи относительно недавно (около 10-15 лет назад).

В данной работе под пропускной способностью РРЛ как системы, у которой ограничен набор градаций скоростей, понимается максимально возможная скорость передачи данных [21, 61, 124, 133, 135, 136].

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 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*. Например, ГОСТ Р 53363-2009 по расчёту показателей качества радиорелейной линии (РРЛ) ограничивается диапазоном частот от 3,4 – 40,5 ГГц [13], а разработанная НИИР методика расчёта трасс цифровых РРЛ прямой видимости охватывает диапазон частот 2 – 20 ГГц [33]. В Рекомендации Международного Союза Электросвязи (МСЭ) *ITU-R P.530* для проектирования наземных систем прямой видимости [120] указан более высокий диапазон частот её применимости, но с осторожной оговоркой: «... по крайней мере, для частот до 100 ГГц», что также свидетельствует о недостаточной изученности влияния метеоусловий на распространение радиоволн миллиметрового диапазона.

Особенностью радиорелейной связи в миллиметровом диапазоне частот является её сильная подверженность влиянию осадков, вызывающих глубокие замирания сигналов, для борьбы с которыми на интервалах РРЛ (радиорелейных интервалах – РРИ) 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 (режимов) модуляции в зависимости от величины глубины замираний на радиорелейном интервале с целью поддержания максимальной пропускной способности радиорелейного интервала 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. Технология адаптивной квадратурной амплитудной модуляции (англ. *AQAM, Adaptive Quadrature Amplitude Modulation*) была предложена авторами *Webb* и *Steele* для применения в мобильной связи [85, 145, 146] в 1991 г., который однако существенно отличается от канала радиорелейной связи. В рамках данной работы исследуются следующие виды модуляции, которые широко применяются в радиорелейной связи: *BPSK, QPSK*, квадратурная амплитудная модуляция от *16-QAM* до *4096-QAM*.

Хотя радиорелейное оборудование в миллиметровом диапазоне с использованием адаптивной модуляции *AQAM* широко применяется на практике уже около 10 лет [48], отсутствие в существующих методах и методиках расчёта показателей качества [13, 33, 120] математического аппарата для учёта осадков в этом диапазоне и учёта использования АМ затрудняет оценку эффективности функционирования РРИ на этапе планирования, а также усложняет обоснованность соответствующих проектных и технических решений.

За время эксплуатации радиорелейного оборудования миллиметрового диапазона волн собран достаточный объём статистических данных [32], позволяющий оценить и обобщить влияние метеоусловий на замирания сигналов. На основе имеющихся статистических данных были проведены исследования указанного влияния в диапазоне *E-Band*, что позволило разработать в данном исследовании 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 данной кандидатской диссертации, направленные на учёт адаптивной модуляции и её влияния на пропускную способность цифровой радиорелейной линии (ЦРРЛ) при воздействии осадков на замирания в миллиметровом диапазоне являются актуальными и обладают научной новизной.

Степень разработанности темы исследования. Модели и методы расчёта пропускной способности радиорелейных линий с АМ, которые позволяют проводить расчёты показателей качества радиорелейных интервалов 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. Ключев, 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. Ошеровича, 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, функционирующих 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 адаптивной модуляции 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 адаптивной модуляции и количественного обоснования режимов работы радиорелейных станций (РРС) при планировании и оптимизации РРЛ с АМ.

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

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 адаптивной модуляции 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 радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в диапазоне *E-band*;

6) разработка метода расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией 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 радиорелейной линии с адаптивной модуляцией 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 радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в отличие от известных включает аналитические зависимости показателей качества, определяющих пропускную способность радиорелейной линии 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 радиорелейной линии с адаптивной модуляцией 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 радиорелейных линий с адаптивной модуляцией, в том числе в новом недостаточно изученном миллиметровом диапазоне радиоволн.

Практическая значимость заключается в том, что разработанная методика, опирающаяся на разработанные 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 RPLS-DB* планирования и оптимизации подвижной и фиксированной связи (сетевая версия) в конфигурации *ONEPLAN RPLS-DB Link* (Приложение Б), а также использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича на кафедре Радиосистем и обработки сигналов (Приложение В).

Методология и методы исследования. Решение научной задачи для достижения цели исследований основано на применении методов математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, теории связи, теории распространения радиоволн, 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 радиорелейной линии (РРЛ) с адаптивной

модуляцией (АМ), представляющая собой аналитические зависимости показателей достоверности, устойчивости и пропускной способности радиорелейных интервалов 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 радиорелейных интервалов для всех уровней модуляции, пропускной способности для непрерывного и прерывистого трафика и пересчёт полученных результатов к аналогичным показателям качества радиорелейной линии.

Степень достоверности и апробация результатов. 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. Основные результаты исследования докладывались на: X Международной конференции по инновациям, современной прикладной науке и экологическим исследованиям (*ICIES'2022*), Марокко 2022 г.; XI Международной научно-технической и научно-методической конференции (АПИНО 2022), Санкт-Петербург, 2022 г.; II Международной молодежной конференции по электронике, телекоммуникациям и информационным технологиям (*YETI 2020*), Санкт-Петербург, 2020 г.; V Международной конференции по электротехнике и фотонике (*CERC 2019*), Дармштадт 2019 г.; XIX Международной конференции по интернету вещей и умным пространствам (*NEW2AN 2019*), Санкт-

Петербург, 2019 г.; VII Международной научно-технической и научно-методической конференции (АПИНО 2018), Санкт-Петербург, 2018 г.

Получены 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2021619677 от 15 июня 2021 г., 1 патент № RU 2783387 от 11 ноября 2022 г., 1 акт реализации результатов диссертационной работы в ООО «ИнфоТел», 1 акт внедрения научных результатов диссертационной работы в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Публикации. Материалы, отражающие основные результаты работы, опубликованы в сборниках докладов научно-технических конференций, в том числе международных, а также ведущих отраслевых журналах. Всего опубликовано 16 работ, из них 6 публикаций в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 5 работ опубликованы в изданиях, рецензируемых *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. 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.

1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ

В разделе 1 рассмотрены требования транспортного сегмента сетей подвижной связи к пропускной способности и показателям качества радиорелейных линий и интервалов (подраздел 1.1), проведён анализ технологий построения современных радиорелейных линий и условий их функционирования (подраздел 1.2), проанализированы существующий научно-методический аппарат оценки показателей качества функционирования радиорелейных линий и его реализация в специализированном программном обеспечении (подраздел 1.3), где выявлены особенности, не учитываемые в существующих моделях и методиках, но являющиеся актуальными для оценки функционирования радиорелейных линий. Исходя из этого, поставлена научная задача исследования и определены пути её решения (подраздел 1.4). В завершении сделаны выводы по разделу (подраздел 1.5). В настоящей работе применены термины в соответствии с ГОСТ 53801-2010, ГОСТ 24375-80 и ГОСТ 53363-2009.

Материал настоящего раздела нашёл отражение в публикациях [19, 72, 73, 74, 127, 128, 129, 130, 132].

1.1 Роль и место радиорелейных линий в транспортном сегменте сетей подвижной связи

Предпосылкой возникновения радиорелейной связи изначально стало развитие технологий многоканальной передачи телеграфных и телефонных сообщений, а затем и телевизионных сигналов на дальние расстояния.

Развитие технологий в области радиорелейной связи в России берёт своё начало в 1920-1930-е годы [36], когда начали вестись первые работы по созданию опытного оборудования в метровом диапазоне волн. В частности, М.А. Бонч-Бруевич (в честь которого назван Государственный университет телекоммуникаций в Санкт-Петербурге) выдвигает в статье «Перспективы

ультракоротких волн» [4] новаторскую идею создания ультракоротковолновых линий связи на базе цепочек ретрансляторов. Целью этих разработок являлось создание альтернативы для проводной передачи, где прокладка проводных линий связи невозможна или трудоёмка.

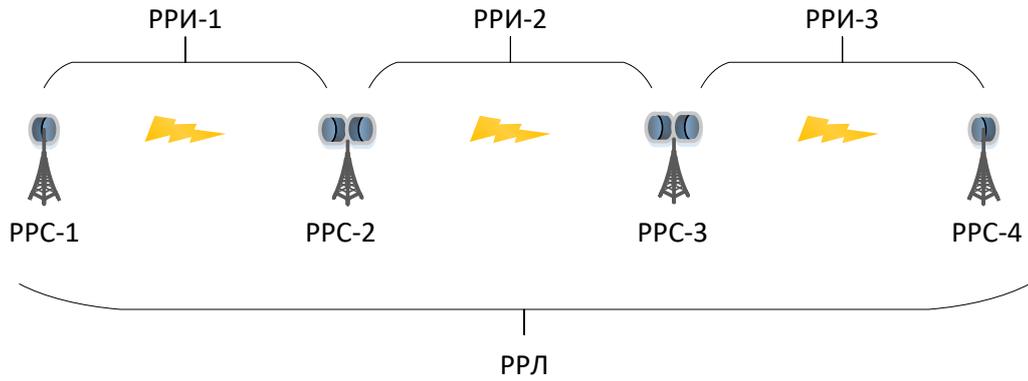
Освоение метровых, дециметровых и более коротких волн радиочастотного диапазона позволило повысить пропускную способность, т.е. на аналоговом этапе развития передавать большее количество каналов, а на цифровом этапе – передавать данные с более высокими скоростями. Для передачи сигналов на дальние расстояния в радиорелейной связи применяется принцип эстафетной передачи при помощи ретрансляторов [4, 65]. Задача ретранслятора состоит не только в усилении сигнала, но также в регенерации цифрового потока и выделении части пропускной способности потребителям.

Термин радиорелейная связь возник от французского слова *relais* – промежуточная станция [78]. На сегодняшний день термин радиорелейной связи определён согласно ГОСТ 24375-80 как наземная радиосвязь, основанная на ретрансляции сигналов на дециметровых и более коротких волнах [11, 13].

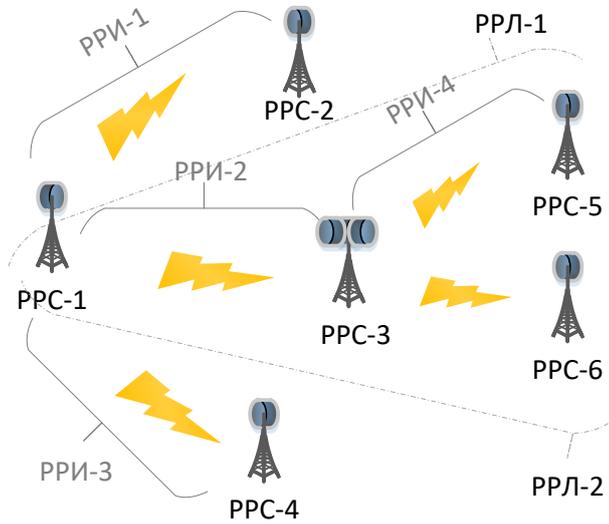
Способ организации радиорелейной связи заключается в построении радиорелейных линий (РРЛ), состоящих из цепочки радиорелейных интервалов (РРИ), или иными словами пролётов. В нормативных документах ГОСТ Р 53801-2010 РРЛ относится к одному из типов линии электросвязи [12] и определена как «совокупность технических средств и среды распространения радиосигнала для обеспечения радиорелейной связи. В частном случае радиорелейная линия связи может быть образована из двух радиорелейных станций; в этом случае она называется однопролётной радиорелейной линией» (ГОСТ 24375-80) [11]. Один РРИ образуется парой радиорелейных станций (РРС), станция А и станция Б, которые работают на направленных антеннах в диапазоне дециметровых и более коротких волн на расстояниях прямой видимости [12, 13]. На рисунке 1.1а схематически обозначена описанная организация радиорелейной связи, которая также известна под термином «точка-точка». Также может использоваться способ организации радиорелейной связи «точка-многоточка» (рисунок 1.1б), в котором

необходимо учитывать большее количество потоков у РРС, обслуживающих одновременно несколько других РРС - «многоточек» для того, чтобы выдержать требования по пропускной способности РРЛ в целом. РРС «многоточек» также называют абонентскими терминалами [49, 125]. На рисунке 1.1в отображён многосвязный способ организации радиорелейной связи, в котором предусмотрена передача потока данных между двумя РРС по различным путям.

а) Способ организации «точка-точка»



б) Способ организации «точка-многоточка»



в) Многосвязный способ организации

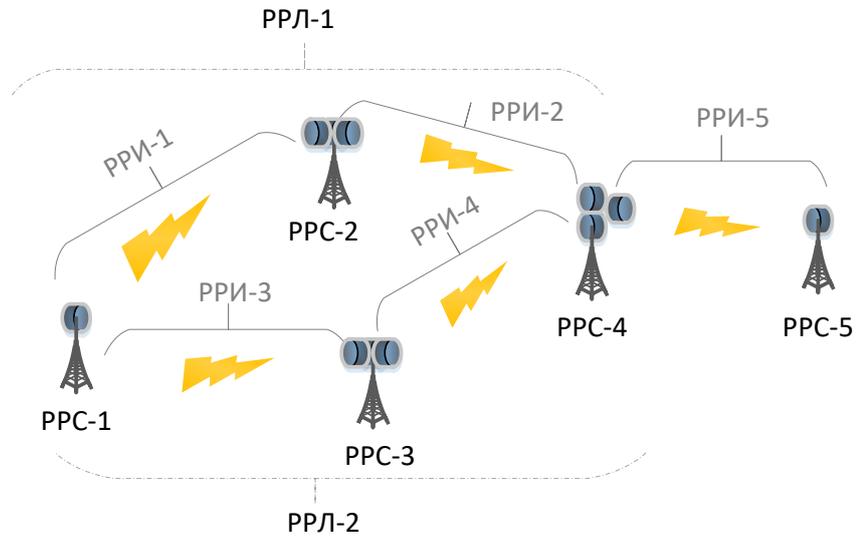


Рисунок 1.1 – Способы организации радиорелейной связи

Обоснованием выбора диапазона дециметровых и более коротких волн для организации радиорелейной связи служат такие характерные для него преимущества, как большая частотная ёмкость, практическое отсутствие в нём промышленных помех (например, от электросварки, электродвигателей и т.д.), его малая дифракционная способность [36]. Ряд этих свойств составляет достоинства радиорелейной связи. Наряду с этим к достоинствам развёртывания транспортной сети на РРЛ относятся меньшие финансовые затраты по сравнению с реализацией на основе оптоволоконной связи. Благодаря этому радиорелейная связь получила широкое применение в транспортном сегменте сетей подвижной связи [130]. Ограничивающими факторами для радиорелейной связи являются зависимость от климатических условий и рельефа земной поверхности, а также подверженность внутрисистемным помехам, возникающим внутри одной сети, и внесистемным помехам, воздействие от которых приходит от других сетей и их передающих радиоустройств [5, 22]. Эти аспекты необходимо учитывать в расчётах на этапе планирования РРЛ.

На протяжении всего периода развития радиорелейной связи [6, 13, 15, 16, 24, 27, 32, 38, 66] наиболее выражено было требование к постоянному росту пропускной способности. На цифровом этапе развития радиорелейная связь применяется на различных территориальных и функциональных участках Единой сети электросвязи Российской Федерации: международных, магистральных, зонавых, местных и сетях доступа [14], которые определяют требования к пропускной способности и устойчивости РРЛ.

В сетях подвижной связи РРЛ нашли наиболее массовое применение в транспортном сегменте, в так называемых распределительных транспортных сетях (*backhaul*), для осуществления транспортной передачи потоков данных между элементами сети доступа и ядром СПС. Под сетями доступа понимается совокупность абонентских радиолиний и оборудования базовых станций, обслуживающих доступ абонентских терминалов к СПС, при этом транспортные сети осуществляют обмен данными между базовыми станциями, ядром сети, магистральными сетевыми узлами и междугородными станциями, обеспечивают

их агрегацию, а также соединяют их каналы и узлы (национальные, международные) [14, 138].

Особенности взаимодействия сетей доступа и транспортного сегмента сетей подвижной связи разных поколений представлены на рисунке 1.2. Если в сетях доступа поколений 2G и 3G распределительная транспортная сеть обеспечивает обмен данными между контроллерами (*BSC* и *RNC*, соответственно) и базовыми станциями (*BTS* и *Node B*), то в сетях 4G и 5G задачи транспортной распределительной сети заключаются в обеспечении обмена данными между *eNB/gNB* по интерфейсам *S1* и *N2/N3* [72].

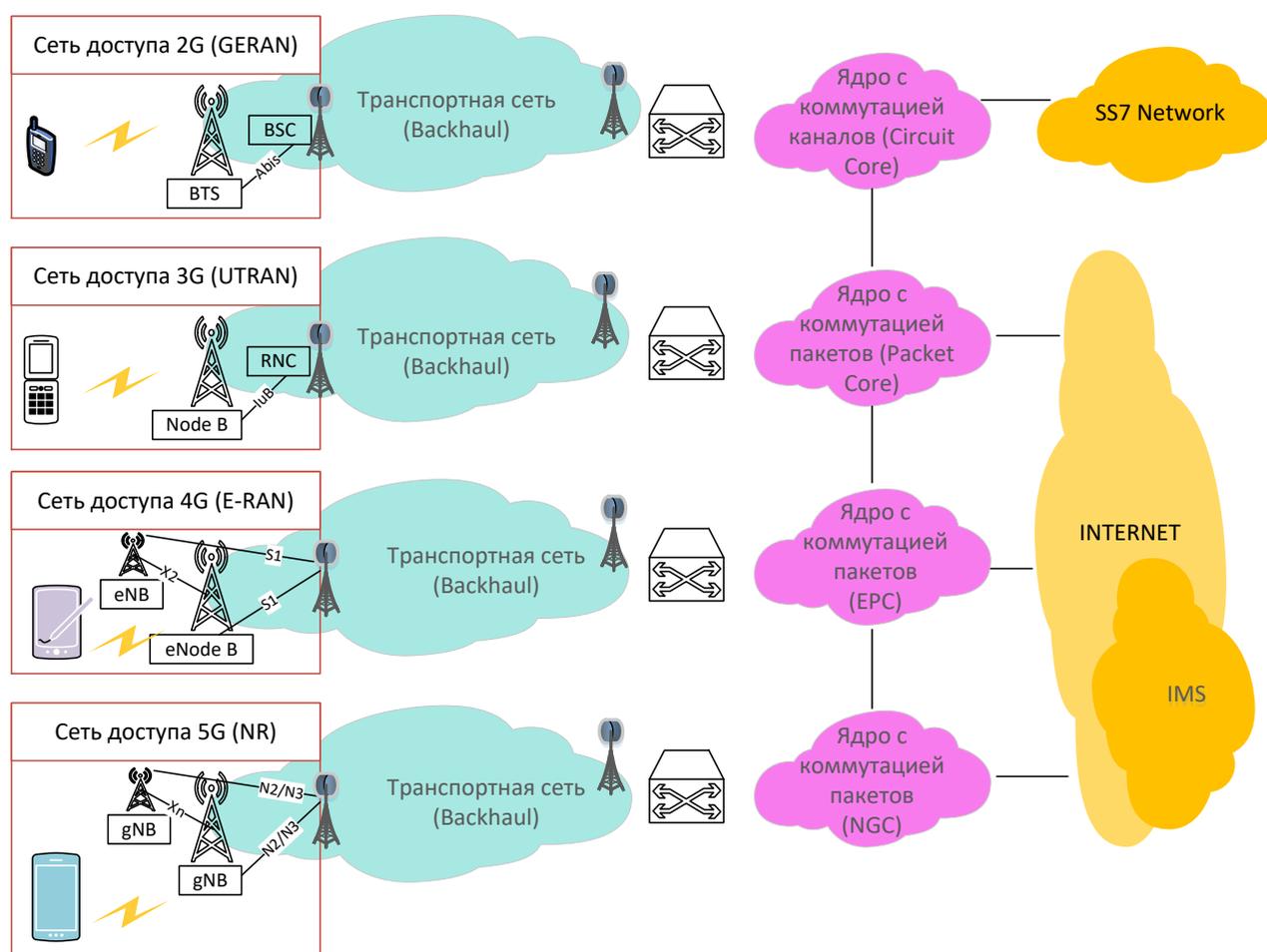


Рисунок 1.2 – Место радиорелейной связи в архитектуре сетей подвижной связи разных поколений

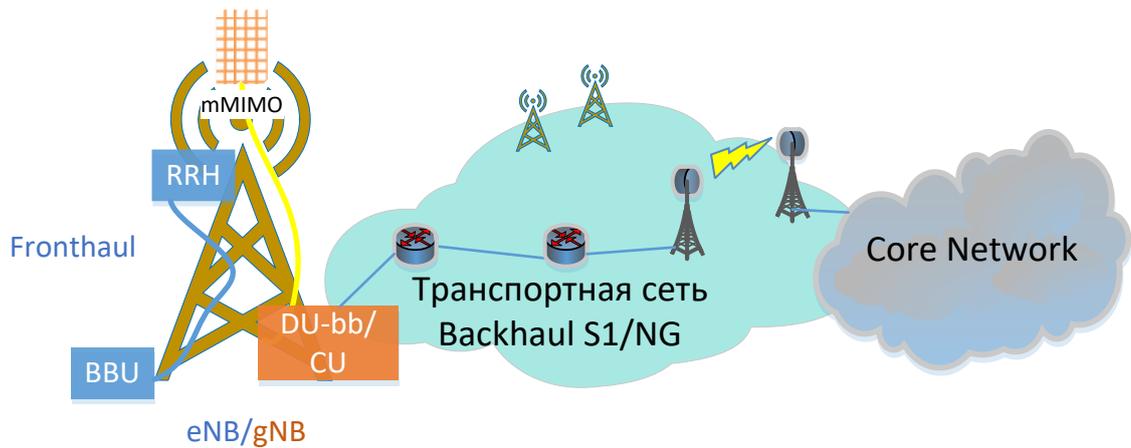
Принципиально новые решения по совершенствованию архитектуры и технологий радиодоступа в сетях 5-го поколения (*5G, 5th Generation*) обеспечивают

не только удовлетворение требований по сверхнадежной высокоскоростной передаче данных [51, 73], но также являются движущей силой развития систем фиксированной связи, в том числе радиорелейной. В архитектуре сетей 5G, как и предыдущих поколений, радиорелейная связь массово применяется в распределительных транспортных сетях, которые представляют собой объединение двух сегментов, *backhaul* и *fronthaul*. Сегмент *backhaul* обеспечивает соединение многих базовых станций с элементами ядра сети [107]. Сегмент *fronthaul* предназначен для соединения удаленных радиомодулей с базовой станцией. Например, в сети *LTE* сегмент *fronthaul* представляет собой соединение удаленных радиомодулей *Remote Radio Unit (RRU)* с блоком обработки сигналов *Base Band Unit (BBU)* (рисунок 1.3а).

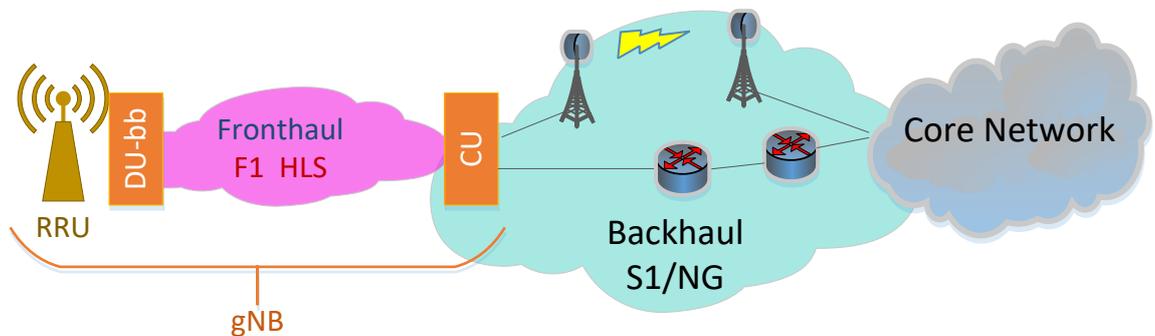
Архитектура сетей 5G существенно отличается от предыдущих поколений и предполагает различные варианты пространственного и функционального разделения сети радиодоступа *Radio Access Network (RAN)* с целью достижения беспроводными сегментами распределительной транспортной сети наибольшей пропускной способности, минимального времени задержки, улучшенной спектральной эффективности, высокой точности синхронизации, расширенных сетевых функций и автоматизации управления сетью [88]. В связи с этим, применительно к сетям 5G, Группой разработки сетей пятого поколения *5GPPP (5G Infrastructure Public Private Partnership)* был запущен проект *X-Haul*, который разрабатывает концепцию взаимосвязи *backhaul* и *fronthaul* с целью достижения требуемых ключевых показателей эффективности функционирования распределительной транспортной сети при различных вариантах разделения *RAN* [139].

Разделение сетевой архитектуры сетей 5G предполагает реализацию облачной концепции, что позволяет упростить вычислительную часть базовых станций и абонентских терминалов. В условиях высокой плотности размещения *gNB (next generation New radio Base station)* реализация облачной концепции является экономически оправданным шагом. Возможные варианты централизованной архитектуры *RAN* представлены на рисунках 1.3б и 1.3в [88].

а) Классическая распределённая архитектура RAN



б) Централизованная архитектура с высокоуровневым разделением



в) Централизованная архитектура с низкоуровневым разделением

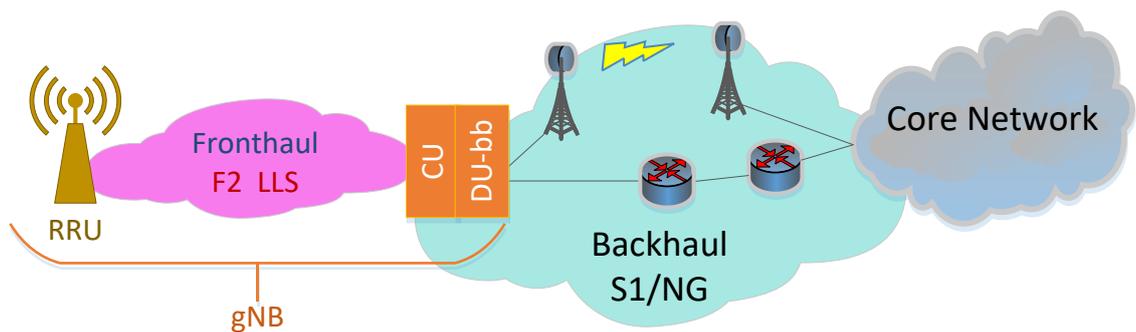


Рисунок 1.3 – Варианты распределённой и централизованной архитектуры RAN

Типовой вариант распределённой архитектуры RAN, представленный на рисунке 1.3а, применяется в сетях 4G и также может применяться в сетях 5G. В данном варианте каждый *eNB/gNB* располагается на своей площадке (сайте) и

связан с ядром сети через интерфейсы *SI/NG*. При этом в сетях *5G* все функции *gNB* реализуются на площадке в блоках *BBU* и *RRU*, взаимодействие между которыми обеспечивается сегментом *fronthaul*.

С целью построения гибкой архитектуры сети в зависимости от требований к времени задержек или скорости передачи данных и осуществления реализации облачной концепции, т.е. виртуализации сети, организация *ETSI* предлагает подход централизованного радиодоступа с беспроводными сегментами *backhaul* и *fronthaul* [88]. Варианты централизованной архитектуры с высокоуровневым разделением *High-Layer Split (HLS)* и низкоуровневым разделением *Low-Layer Split (LLS)* представлены на рисунках 1.3б и 1.3в соответственно.

Централизованный радиодоступ подразумевает территориальное разделение функций *gNB*. Часть функций *gNB* возлагается на централизованные компоненты *Centralized Unit (CU)*, а часть – на распределённые компоненты *Distributed Unit (DU)*. Для обеспечения оптимальной координации сети радиодоступа и реализации преимуществ виртуализации, элементы *CU* смещаются ближе к ядру сети, в то время как *DU* может оставаться на сайте. Для варианта высокоуровневого разделения *HLS* (рисунок 1.3б) компонент *DU* включает в свой состав устройства формирования и обработки сигналов *Distributed baseband unit (DU-bb)* и остаётся на сайте вблизи радиомодуля *Radio Unit (RU)*. Соединение по *fronthaul* между *CU* и *DU-bb* происходит на более высоких уровнях стека протоколов *5G*, а именно на уровнях *L2* и *L3*. При этом функции уровней *L2* (не в режиме реального времени) и *L3* смещаются с *BBU* на *CU*, а функции уровней *L2* (режима реального времени) перенесены с *BBU* на *DU-bb* [103, 137]. При низкоуровневом разделении *LLS* компонент *DU-bb* перемещается в более центральное место сети и может быть совмещен с *CU*, как показано на рисунке 1.3в. В этом случае на сайте остаются только выносные радиомодули *Remote Radio Unit (RRU)*, а соединение по *fronthaul* между *CU/DU-bb* и радиоэлементом сайта *RRU* происходит только по низкому физическому уровню *L1*.

Взаимодействие между территориально распределёнными функциональными компонентами *gNB* обеспечивается сегментом транспортной

распределительной сети *X-Haul* посредством интерфейсов *F1/HLS* при высокоуровневом разделении и *F2/LLS* при низкоуровневом разделении. В зависимости от заданных на сайте услуг и от уровня функционального разделения, новые интерфейсы *X-Haul* предъявляют различные требования с точки зрения пропускной способности и задержек. Решение о применении варианта *HLS* или *LLS* принимается локально на основе требуемых услуг в заданной местности. Например, для услуг сверхнадежной связи с низкими задержками (*URLLC, Ultra-Reliable Low Latency Communication*), где согласно рекомендациям *ETSI* [4] время задержки не должны превышать 1 мс, целесообразно использовать вариант *HLS*. В этом варианте обработка сигнала выполняется локально вблизи радиоэлемента, что сократит маршрут передачи сигнала для его обработки на *DU-bb* и тем самым уменьшит время задержки [7]. С другой стороны, для услуг сверхширокополосной мобильной связи (*eMBB, enhanced Mobile Broadband*) первым приоритетом является увеличение пропускной способности до 100 Гбит/с. Поэтому для увеличения агрегации потоков данных, целесообразно использовать вариант *LLS*, где *DU-bb* расположены более центрально к ядру сети. В случае предоставления услуг *eMBB* требования к времени задержки менее жёсткие, чем для услуг *URLLC*, времени задержки при *eMBB* не должно превышать 10 мс.

Радиорелейная связь в сегментах *backhaul* и *fronthaul* распределительной транспортной сети применяется, как правило, для обеспечения информационного включения *gNB* к элементам ядра сети напрямую или через ближайшую площадку, оборудованную точкой доступа к волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Плотность расположения узлов *gNB*, расстояния до элементов ядра сети и точек доступа к ВОЛС определяют не только требования к радиорелейным системам станциям (PPS) по пропускной способности, устойчивости функционирования и допустимым задержкам, но также к построению их топологии в сегментах *backhaul* и *fronthaul* распределительной транспортной сети [72].

Из сказанного выше следует, что целью развития различных решений архитектуры СПС является удовлетворение заявленных в руководящих документах требований к показателям качества функционирования сети, что

определяет требования к характеристикам транспортного сегмента. В целом, к радиорелейным линиям, как составной части транспортного сегмента СПС, определены две группы показателей качества: пропускная способность [87, 88] и устойчивость, или готовность (надёжность) связи [13, 33, 49]. Под пропускной способностью РРЛ понимается максимально возможное количество данных, переданное за единицу времени, или максимально возможная скорость передачи данных [21, 61, 124, 133, 135, 136]. Готовность РРЛ характеризует устойчивость её функционирования при воздействии дестабилизирующих факторов естественного и искусственного происхождения.

При этом следует отметить, что общее развитие СПС оказывает влияние на применяемые технологии в радиорелейной связи. Результаты анализа ключевых технологических особенностей разных поколений СПС и радиорелейной связи представлены в таблице 1.1. Такой фундаментальный технологический прорыв, как переход с аналоговой на цифровую приёмопередачу в СПС – это трансформация, оказавшая существенное влияние на развитие радиорелейной связи. Начиная со второго поколения СПС в беспроводном сегменте транспортной сети начали массово применяться цифровые радиорелейные станции. Применение в РРЛ на данном этапе бинарной (*BPSK, Binary Phase-Shift Keying*), квадратурной (*QPSK, Quadrature Phase-Shift Keying*) модуляции, а также квадратурной амплитудной модуляции (*QAM, Quadrature Amplitude Modulation*) высоких уровней обусловлено требованиями к пропускной способности РРЛ со стороны СПС. Увеличение объёмов передаваемого трафика потребовало от радиорелейной связи высокоскоростной передачи, и, как следствие, использования более широкой полосы частот сигнала, что стало возможным на основе освоения новых, более высокочастотных, диапазонов радиочастот (таблица 1.1). Тенденция освоения для радиорелейной связи более высокого диапазона частот с целью обеспечения высокой пропускной способности сохранилась и на современном этапе.

Таблица 1.1 – Взаимосвязь поколений подвижной связи и технологий транспортного сегмента, построенного на радиорелейных средствах

Поколение подвижной связи	Период	Радиорелейная связь			
		Тип передачи	Тип модуляции и сигнала	Тип канала	Диапазон частот
1G: Алтай, <i>NMT-450</i> , <i>AMPS</i> . Аналоговая подвижная связь	1963 – 2000 г.г.	Аналоговый	ЧМ/ФМ	Каналы ТЧ	МВ/ДМВ/СМВ
2G: <i>DAMPS</i> , <i>GSM</i> . Цифровая подвижная связь, голос – коммутация каналов.	1994 – по н.вр.	Цифровой	<i>BPSK/QPSK/QAM</i>	<i>TDM</i>	ДМВ/СМВ
3G: <i>CDMA-450</i> , <i>UMTS</i> . Цифровая связь голос – коммутация каналов, данные – пакетная передача <i>IP</i>	2007 – по н.вр.	Цифровой	<i>BPSK/QPSK/QAM</i>	<i>IP/TDM</i>	СМВ/ММВ
4G: <i>LTE</i> , <i>LTE-A</i> . Цифровая связь, голос <i>VoLTE</i> , данные – <i>IP</i> .	2011 – по н.вр.	Цифровой	<i>BPSK/QPSK/QAM/OFDM</i>	<i>IP</i>	СМВ/ММВ
5G: <i>NR</i> . Цифровая связь, голос <i>VoIP</i> , данные – <i>IP</i> .	2021 – по н.вр.	Цифровой	<i>BPSK/QPSK/QAM/OFDM</i>	<i>IP</i>	СМВ/ММВ

Требования к пропускной способности транспортного канала для подключения одной соты разных технологий подвижной связи представлены в таблице 1.2 [45]. Представленные данные получены на основе решения практических задач по подключению базовых станций федеральных операторов к транспортному сегменту сети подвижной связи. Например, для технологии подвижной связи *GSM (Global System for Mobile Communications)* требуемая пропускная способность достигала значений от 4 Мбит/с до 12 Мбит/с, а для *LTE (Long Term Evolution)* – от 80 Мбит/с до 500 Мбит/с, следовательно, с развитием технологий требования к пропускной способности увеличились примерно в 40 раз.

Таблица 1.2 – Требования к пропускной способности транспортного канала для различных поколений подвижной связи

Поколение подвижной связи	Набор используемых технологий	Требования к пропускной способности транспортного канала, Мбит/с
2G (GSM)	<i>GSM 900</i> с 2-мя потоками <i>E1</i>	4
	<i>GSM 900, GSM 1800</i> с 4-мя потоками <i>E1</i>	8
	<i>GSM 900, GSM 1800, EDGE</i> с 6-ю потоками <i>E1</i>	12
3G (UMTS)	<i>HSPA+, 64QAM</i>	55,2
	<i>HSPA+, 16QAM, MIMO 2x2</i>	72,6
	<i>HSPA+, 64QAM, MIMO 2x2</i>	100
4G (LTE)	<i>TDD, MIMO 2x2</i> , полоса частот 10 МГц	80
	<i>FDD, MIMO 2x2</i> , полоса частот 10 МГц	125
	<i>TDD, MIMO 2x2</i> , полоса частот 20 МГц	150
	<i>FDD, MIMO 2x2</i> , полоса частот 20 МГц	250
	<i>TDD, MIMO 4x4</i> , полоса частот 20 МГц	300
	<i>FDD, MIMO 4x4</i> , полоса частот 20 МГц	500

Подобно влиянию развития подвижных сетей на радиорелейную связь, наблюдаемому в предыдущие десятилетия, современные технологии и возможности сетей подвижной связи [73, 74, 127, 128, 129, 132] диктуют требования к транспортному сегменту сетей поколения 5G, реализованному на основе радиорелейной связи [88]. В соответствии со стандартами, разработанными группами 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [1], Международным Союзом Электросвязи (МСЭ, англ. *ITU-R, International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector*) [119] и ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*) [88], в таблице 1.3 сопоставлены основные требования к пропускной способности сети доступа 5G и соответствующие им требуемые характеристики и технологии к сегментам *Backhaul/X-Haul* [88] беспроводной транспортной сети для различных типов местности.

Таблица 1.3 – Требования к пропускной способности сетей доступа 5G и соответствующие им требования к технологиям транспортной сети

Параметры сети доступа 5G (<i>gNB</i>)			Характеристики беспроводного транспортного сегмента <i>Backhaul/X-Haul</i>			
Тип местнос-ти	Расстоя-ние между узлами	Пропуск-ная способ-ность	Типовая топология	Пропуск-ная способ-ность	Диапазоны частот	Технологии и конфигурации
Регион (<i>Rural</i>)	> 10 км	< 3 Гбит/с	Точка-Точка (<i>PtP</i>), радиорелейная линия (РРЛ)	2 – 4 Гбит/с	6 – 15 ГГц, агрегация <i>BCA MW (Low + High)</i>	Полоса (56-112) МГц <i>XPIC</i>
Сельская (<i>Semi-Rural</i>)	< 10 км	< 5 Гбит/с	Точка-Точка (<i>PtP</i>), радиорелейная линия (РРЛ)	4 – 10 Гбит/с	15 – 42 ГГц, агрегация <i>BCA (MW+mmW)</i>	Полоса (56-224) МГц <i>XPIC, LOS 2x2MIMO</i>
Пригород (<i>Sub-Urban</i>)	< 7 км	< 5 Гбит/с	Точка-Точка (<i>PtP</i>), радиорелейная линия (РРЛ)	4 – 10 Гбит/с	15 – 42 ГГц, агрегация <i>BCA (MW+mmW)</i>	Полоса (56-224) МГц <i>XPIC, LOS 2x2MIMO</i>
Город (<i>Urban</i>)	< 3 км	5 – 10 Гбит/с	Точка-Точка (<i>PtP</i>), Точка-Многоточка (<i>PmP</i>)	10 – 100 Гбит/с	<i>V-band</i> <i>E-band</i> <i>W-band</i> <i>D-band</i> Традицион-ный диапазон ≥ 23 ГГц	Полоса от 500 МГц до 4ГГц <i>XPIC, LOS 2x2MIMO/OAM</i>
Плотный город (<i>Dense Urban</i>)	< 1 км	≥ 10 Гбит/с	Точка-Точка (<i>PtP</i>), Точка-Многоточка (<i>PmP</i>)	10 – 100 Гбит/с	<i>V-band</i> <i>E-band</i> <i>W-band</i> <i>D-band</i>	Полоса от 500 МГц до 4ГГц <i>XPIC, LOS 2x2MIMO/OAM</i>

Проведённый в [130] анализ показал, что требования, выдвинутые группой 3GPP к задержкам (от 1 мс до 100 мс в зависимости от критичности сервиса) и к пропускной способности базовой станции (от 10 Гбит/с для сети в плотной городской застройке) в сети доступа 5G [1, 119] ведут к ещё более жёстким требованиям к беспроводному транспортному сегменту [88]. Таким образом, чтобы реализовать сервисы в сетях доступа 5G в условиях высокой плотности размещения узлов базовых станций *gNB* (*next generation New radio Base station*), необходимо, чтобы точка доступа транспортного сегмента обеспечивала ещё более высокую пропускную способность (до 100 Гбит/с) и ещё более малые задержки (от 10 мкс до 250 мкс). Построение беспроводного транспортного сегмента сети 5G, отвечающего предъявленным требованиям по пропускной способности, базируется на освоении более высоких диапазонов радиочастот (колонка Диапазоны частот в таблице 1.3) и применении на РРЛ различных технологий и конфигураций (колонка

Технологии в таблице 1.3). Эти аспекты будут освещены в разделе 1.2 более подробно.

Второй группой показателей качества РРЛ является устойчивость, которая характеризуется показателями готовности (неготовности) и показателями качества по ошибкам. Определение указанных показателей РРЛ и требования к ним приведены в руководящих документах и рекомендациях – ГОСТ 53363-2009 [13], методика НИИР [33], Приказ №92 РФ [44], Рекомендациях МСЭ-*R* F.592 [49], МСЭ-*T* G.821 [116], МСЭ-*T* G.826 [117].

К основным показателям качества по ошибкам, наряду с *BER*, относятся [13]:
секунда с ошибками (*ES, Errored Second*): односекундный интервал, содержащий по крайней мере одну ошибку;

сильнопоражённая ошибками секунда (*SES, Severely Errored Second*): односекундный интервал, для которого коэффициент ошибок превышает 10^{-3} (для основного цифрового канала), или односекундный интервал, содержащий 30% или более процентов блоков с ошибками (для сетевых трактов);

коэффициент сильнопоражённых секунд (*SESR, Severely Errored Second Rate*): отношение числа сильнопоражённых ошибками секунд к общему числу секунд в период готовности за время наблюдения [13].

Готовность (неготовность) РРЛ представляет собой способность (неспособность) к выполнению требуемой функции в данный момент времени или в любой момент времени в пределах данного интервала времени [49] и характеризуется следующими основными показателями [13]:

период неготовности: период, начинающийся с десяти последовательных *SES* (считающихся частью периода неготовности) и заканчивающийся десятью последовательными секундами, не являющимися *SES* (считающимися частью периода готовности);

период готовности: период времени, не относящийся к периоду неготовности;

коэффициент неготовности $K_{нг}$: отношение длительности периода неготовности, вызванной отказом аппаратуры или неблагоприятным воздействием среды распространения радиосигнала, к общему времени наблюдения [13].

Типовое значение требований для BER составляет 10^{-6} [90, 115]. В таблице 1.4 представлены требования для показателей $SESR$ и $K_{нг}$ для реконструируемых цифровых РРЛ взаимоувязанных сетей связи (ВСС) [33].

Таблица 1.4 – Предельные нормируемые значения для реконструируемых цифровых РРЛ [33]

Участок ВСС	Длина тракта, км	Показатель $SESR$, %	Коэффициент неготовности $K_{нг}$, %	Распределение доли $SESR$, $K_{нг}$ для реальных линий
Международный участок	12500	0,07	1,5	$L \geq 2500$ км $K_{нг}$ пропорционально L $SESR=0,5+0,02\frac{L}{12500}$
Национальный участок: Магистральная сеть	2500	0,054	0,3	пропорционально L для $L \geq 50$ км
Внутризоновая сеть	600	0,025	0,05	- пропорционально L для $L > 600$ км - независимо от длины для $600 > L > 200$ км
	200	0,025	0,05	пропорционально L для $50 < L < 200$ км
	50	0,006	0,0125	независимо от длины для $L < 50$ км
Местная сеть	100	0,015	0,05	независимо от длины для $L < 100$ км
Сеть доступа	-	0,015	0,05	независимо от длины

Для достижения заданных параметров пропускной способности и показателей качества в РРЛ, применяются технологии, способные обеспечить передачу данных согласно требованиям. Их анализ приведён в разделе 1.2.

1.2 Анализ условий функционирования и тенденций развития радиорелейных линий

Особенность радиорелейной связи как вида наземной радиосвязи с прямой видимостью заключается в ограниченности её дальности из-за кривизны земной поверхности, рельефа местности и наземных объектов. Это обусловлено свойствами дециметрового и более высоких диапазонов частот, используемых в радиорелейной связи [11]. В настоящее время для радиорелейных систем передачи МСЭ рекомендует разные полосы частот в диапазоне от 0,4 ГГц до 94 ГГц [50], которые могут уточняться национальными нормативными документами. Основным руководящим документом на территории нашей страны являются «Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации» [39], которые утверждаются Постановлением Правительства Российской Федерации. Согласно нормативному документу «Правила применения систем радиорелейной связи» (части 1, 2, 5 и 6) [41, 43, 42, 40] для цифрового приёмопередающего оборудования радиорелейных станций выделены полосы радиочастот в диапазоне 0,06-60 ГГц. Решениями ГКРЧ № 10-07-04-1 от 15.07.2010г. и № 10-07-04-2 от 15.07.2010г. также выделены дополнительные полосы радиочастот в диапазоне, соответственно, (71-76; 81-86) ГГц и (92-94; 94,1-95) ГГц.

Сводные данные по выделенным для радиорелейной связи полосам частот представлены в таблице 1.5. Диапазон радиочастот от 2 ГГц до 40 ГГц [6] достаточно давно и широко применяется в радиорелейной связи, хорошо изучен и в связи с этим его принято также называть «классическим» или «традиционным» (англ. *Common Band*). Для классического диапазона радиочастот установлены две градации максимальной ширины полосы сигнала 28 и 56 МГц. Введённые в последние годы полосы частот выше 40 ГГц являются перспективными в плане создания высокоскоростных РРЛ и требуют дополнительного изучения.

Как было описано в разделе 1.1, с ростом требований к пропускной способности радиорелейных линий в транспортном сегменте СПС возникла

необходимость расширения полос радиочастот как на уже освоенных участках диапазона, так и путём освоения более высоких диапазонов радиочастот.

Таблица 1.5 – Диапазоны частот для систем радиорелейной связи

Условное наименование	Полоса частот, МГц	Технология передачи данных
0,06 ГГц	60 - 70	ПЦИ/PDH, ППД/Ethernet
0,16 ГГц	Низ: 150,0625 - 150,4875 Верх: 165,0625 - 165,4875 Низ: 150,5 - 151,7 Верх: 165,5 - 166,7	ПЦИ/PDH, ППД/Ethernet
0,4 ГГц	Низ: 394 - 410 Верх: 434 - 450	ПЦИ/PDH, ППД/Ethernet
2 ГГц	1427 - 1530	ПЦИ/PDH, ППД/Ethernet
	2300 - 2500	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	2500 - 2700	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
4 ГГц	3400 - 3900	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	3600 - 4200	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	3700 - 4200	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
5 ГГц	4400 - 5000	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	4400 - 5000	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
6 ГГц	5670 - 6170	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	5925 - 6425	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
7 ГГц	6700 - 7100	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	6425 - 7110	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	7250 - 7550	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
8 ГГц	7900 - 8400	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
10 ГГц	10 380 - 10 680	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	10 500 - 10 680	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
11 ГГц	10 700 - 11 700	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
13 ГГц	12 750 - 13 250	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
15 ГГц	14 500 - 15 350	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
18 ГГц	17 700 - 19 700	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
23 ГГц	21 200 - 23 600	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
25 ГГц	24 250 - 25 250	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
26 ГГц	24 250 - 26 500	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	25 250 - 27 500	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
28 ГГц	27 500 - 29 500	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
31 ГГц	31 000 - 31 300	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
37 ГГц	36 000 - 37 000	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
38 ГГц	37 000 - 39 500	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
40 ГГц	39 500 - 40 500	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
52 ГГц	51 400 - 52 600	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
57 ГГц	54 250 - 58 200	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	54 250 - 57 200	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	57 200 - 58 200	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
	57 000 - 59 000	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
60 ГГц	58 250 - 63 250	ПЦИ/PDH, СЦИ/SDH, ППД/Ethernet
70/80 ГГц	71 000 - 76 000	ППД/Ethernet
	81 000 - 86 000	
94 ГГц	92 000 - 94 000	ППД/Ethernet
	94 100 - 95 000	

Результаты анализа руководящих документов [87, 102, 88] на предмет нововведённых для транспортного сегмента 5G диапазонов радиочастот и их

характеристик [130] сведены в таблице 1.6. Диапазон 42 ГГц (*Q-band*) представляет собой расширение уже освоенного диапазона 40 ГГц на полосу радиочастот, равной 3 ГГц. Диапазоны 60 Гц (*V-band*) и 70/80 ГГц (*E-band*) уже выделены для радиорелейной связи и применяются на практике [81]. Диапазон 100 ГГц (*W-band*) является расширением диапазона 94 ГГц с общей полосой радиочастот, равной 22 500 МГц. Новым, ранее не выделяемым для систем радиорелейной связи, является диапазон 150 ГГц (*D-band*).

Максимальная ширина полосы сигнала для диапазона 42 ГГц составляет 224 МГц, для диапазона 60 ГГц кратна 50 МГц, а для диапазонов 70/80, 100 и 150 ГГц кратна 250 МГц [130]. Для указанных параметров диапазонов радиочастот и ширины сигнала скорость передачи данных в РРЛ (пропускная способность) варьируется от 1 до 100 Гбит/с в зависимости от выделенной ширины полосы. Задержки и длина интервала ограничены физическими свойствами радиочастот и находятся в пределах от <10 до <250 мкс и 1-20 км, соответственно. Для дополнительного повышения пропускной способности существует возможность комбинировать несколько поддиапазонов из разных диапазонов для одновременного использования, а также агрегировать несущие частоты внутри диапазона *BCA (Bands and Carriers Aggregation)*.

Таблица 1.6 – Диапазоны частот для беспроводного транспортного сегмента сетей подвижной связи 5G и их характеристики [130]

Наименование диапазона	Полоса частот, ГГц	Максимальная полоса сигнала, МГц	Пропускная способность, Гбит/с	Задержка, мкс	Длина интервала, км
42 ГГц (<i>Q-band</i>)	40,5–43,5	224	1	< 250	≤20
60 ГГц (<i>V-band</i>)	59–64	$N \times 50$	>4	< 500	<10
70/80 ГГц (<i>E-band</i>)	71–76/81–86	$N \times 250$	3–10	< 50–100	<7
100 ГГц (<i>W-band</i>)	92–114,5	$N \times 250$	≤20	10	<3
150 ГГц (<i>D-band</i>)	130–174,8	$N \times 250$	≤100	< 10	1–3

Как для классического, так и для вновь введённых диапазонов радиочастот обязательным условием обеспечения устойчивости функционирования РРЛ является наличие прямой радиовидимости, т.е. интервалы РРЛ должны быть открытыми, иметь положительный просвет по заданному критерию.

Для всех указанных диапазонов радиочастот основными эффектами распространения радиоволн на интервале РРЛ являются: рефракция, затухание в свободном пространстве, затухание за счёт трассы на интервале (дифракция на закрытых и полуоткрытых интервалах, интерференция на открытых интервалах), затухание в атмосфере.

Рефракция зависит от климатических особенностей региона и представляет собой искривление траектории распространения радиоволн, обусловленное неоднородным строением тропосферы вследствие изменения диэлектрической проницаемости воздуха с высотой.

Затухание в свободном пространстве возникает за счёт рассеяния энергии передаваемой волны [31, 54] и зависит только от частоты радиосигнала и расстояния. Затухание за счёт трассы определяется типом интервала и его геометрическими параметрами (просвет, критический просвет, форма и размеры препятствий, подстилающая поверхность и т.д.), влияющими на условия экранирования препятствиями и отражения сигнала от земной поверхности, за счёт чего возникают эффекты дифракции и интерференции [56].

По причине воздействия дестабилизирующих факторов радиосигналы на интервалах РРЛ подвержены замираниям, которые представляют собой случайные изменения уровня сигнала на входе приёмника. Различают медленные и быстрые замирания [5, 22, 67].

Медленные (рефракционные) замирания представляют собой случайные изменения уровня сигнала на входе приёмника, обусловленные изменением условий рефракции радиоволн (коэффициента рефракции), вследствие изменения состояния тропосферы. Различают рефракционные замирания дифракционного типа, которые наблюдаются на полуоткрытых интервалах, и рефракционные замирания интерференционного типа, что характерно для открытых интервалов. Глубина медленных замираний составляет 20-30 дБ, интервал корреляции (квазипериод) – от единиц до десятков минут и часов [5].

Быстрые (интерференционные) замирания характеризуются случайными изменениями уровня сигнала на входе приёмника, обусловленными

возникновением многолучёвости распространения радиоволн, вследствие переизлучения (рассеяния) радиоволн от неоднородностей нижних слоёв тропосферы. Глубина медленных замираний составляет 20-30 дБ, интервал корреляции (квазипериод) – от долей до единиц секунд [5].

Перечисленные эффекты могут изменять степень своего влияния в зависимости от климатической зоны, в которой расположены РРИ, что в свою очередь влияет на неготовность РРИ. Для снижения процента времени неготовности РРИ и обеспечения устойчивости РРЛ наряду с пространственно-разнесённым и частотно-разнесённым приёмом в современных РРС предусмотрены адаптивное управление мощностью, видом модуляции и шириной полосы сигнала и вместе с тем различные способы борьбы с замираниями и зависимостью устойчивости РРЛ от климатических условий.

Например, чтобы предотвратить медленные замирания, увеличивают энергетический запас на входе приёмника, это также позволяет снизить негативные влияния на пропускную способность. Для борьбы с быстрыми замираниями применяют различные методы разнесённого приёма [5, 13, 22, 67].

Знание закона распределения замираний в канале РРЛ позволяет рассчитать величину энергетического запаса на замирания, при которой обеспечивается достижение требуемых значений показателей качества функционирования линии. Эксперименты показали, что замирания в канале РРЛ с достаточной для практики точностью описываются законом распределения Райса [5, 37, 67, 100]. В справочнике *ITU-R R-HDB-24* [100] приводится график зависимости вероятности глубины замираний P в логарифмических единицах от величины глубины замираний F для разных значений коэффициента возникновения замираний r (рисунок 1.4). При значении $r=1$ замирания описываются законом Релея, а при $r<1$ – законом Райса. График получен на основе обработки статистических данных о замираниях сигнала на интервалах РРЛ разной длины, функционирующих в разных диапазонах частот в различных климатических регионах мира. Приведённый график будет использоваться в разделе 2 для определения зависимости между значениями коэффициента r и k -фактора распределения Райса.

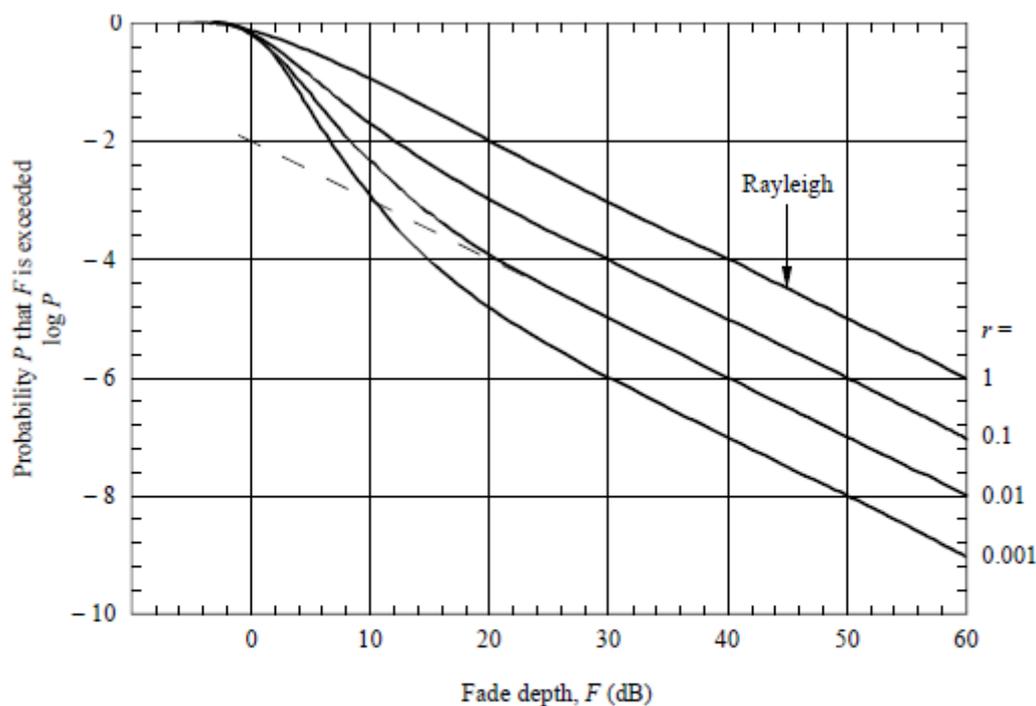


FIGURE 5.1.2-1

**Cumulative distributions for single-frequency signals on
line-of-sight radio paths – the Rice distribution**

Рисунок 1.4 – Копия графика вероятности глубины замираний из справочника *ITU-R R-HDB-24*

Для повышения пропускной способности кроме традиционных способов, таких как увеличение ширины полосы радиосигнала, освоение более высоких диапазонов радиочастот, применение модуляции более высоких уровней, также нашли применение технические методы объединения частотных стволов РРЛ. К таким методам относятся технологии *SDB (Super Dual Band)*, т.е. объединение стволов классического диапазона и *E-band*, агрегация несущих и реализация конфигураций (4+0, 8+0) в пределах одного диапазона радиочастот, а также объединение стволов соседних диапазонов радиочастот, например, 7 и 8 ГГц.

С целью повышения пропускной способности РРЛ на практике применяется поляризационное разнесение с компенсацией взаимных помех *XPIC (Cross-Polarization Interference Compensation)* [81]. Перспективными направлениями повышения пропускной способности РРЛ являются применение режима *MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)*, использование специализированных

поляризационных антенных систем, реализующих режим орбитального углового момента *OAM (Orbital Angular Momentum)* [81], а также мультиплексирование с ортогональным частотным разделением *OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)* [87, 88].

Интересным как с научной, так и с практической точки зрения свойством обладают адаптивная модуляция *A-QAM (Adaptive Quadrature Amplitude Modulation)* [105] и адаптивное управление мощностью передатчика [68, 72, 130]. С одной стороны, адаптивное переключение 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, адаптивная модуляция влияет как на устойчивость, так и на пропускную способность РРЛ. Разработка модели РРЛ с адаптивной модуляцией для оценки устойчивости и пропускной способности является научной задачей, обладающей новизной и практической значимостью. Оценке состояния существующего научно-методического аппарата на предмет учёта особенностей функционирования РРЛ с адаптивной модуляцией посвящён подраздел 1.3.

1.3 Анализ существующего научно-методического аппарата и специализированного программного обеспечения для планирования и оптимизации радиорелейной связи

На настоящий момент существует ряд международных документов, описывающих научно-методический аппарат по оценке показателей качества функционирования радиорелейных линий. В их состав входят рекомендации, справочники и отчёты группы МСЭ [52, 53, 55, 57, 58, 59, 60, 67, 120], где представлен учёт таких эффектов, как потери в свободном пространстве, ослабление в атмосферных газах, дифракционные замирания и дифракционные

потери, сцинтилляционные замирания, многолучевые замирания [101] и ослабление в осадках и других частицах в атмосфере.

1.3.1 Существующий научно-методический аппарат, используемый при планировании и оптимизации радиорелейной связи

Основным международным документом, содержащим методы и модели для расчёта РРИ, является Рекомендация *ITU-R P.530-18* [120], в которую входит учёт потерь вследствие атмосферных газов, многолучёвости, закрытия трассы, колебания угла прихода и выхода, геоклиматических особенностей и осадков, в частности, дождей. Для учёта характеристик разных климатических параметров при расчёте потерь распространения радиоволн (РРВ) применяются климатические карты в векторном или/и матричном форматах [19]. Данные о коэффициенте рефракции радиоволн [53], температуре [52], атмосферному давлению [58] и влажности [59] зависят от географического региона и учитываются в неограниченном диапазоне частот. Потери в атмосферных газах также зависят от климатических параметров, т.е. географического региона, и учитываются на частотах выше 10 ГГц [57, 120]. Замирания и усиление, обусловленные многолучёвостью, также зависят от географического региона, имеют частотную зависимость и учитываются через геоклиматический фактор, региональные коэффициенты и фактор земной поверхности [13, 33, 120]. Потерями в гидрометеорах (дождь, снег, град и туман) [60] на частотах ниже примерно 5-8 ГГц можно пренебречь, а на частотах выше 10 ГГц их влияние становится определяющим [33, 120].

Вышеперечисленные модели по отдельности охватывают все известные эффекты распространения радиоволн, влияющие на показатели качества функционирования радиорелейных линий. Однако, в документах МСЭ отсутствует единая методика, которая определяла бы полноценный алгоритм по расчёту РРЛ. Кроме того, в названных моделях отсутствуют рекомендации по учёту особенностей адаптивной модуляции и управления мощностью при расчёте

показателей качества функционирования РРЛ, включая показатели неготовности, качества по ошибкам и пропускной способности. Это вызывает затруднения при обосновании технических и проектных решений в процессе развёртывания и модернизации сетей подвижной связи.

В Российской Федерации разработаны две официальные методики расчёта показателей качества цифровых РРЛ, изданные в виде нормативных документов. Это «Методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости в диапазоне частот 2–20 ГГц» [33], разработанная ФГУП НИИР, и ГОСТ Р 53363-2009 «Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета» [13], разработанный коллективом авторов из СПбГУТ, ООО «НПК «Связь-Сервис» и Технического комитета по стандартизации ТК 30 [13]. Отличительной особенностью методик является не только обобщение моделей и данных МСЭ, но также применение собственных моделей и климатических данных, наиболее полно учитывающих особенности территории Российской Федерации. Наличие в этих документах методик по расчёту показателей качества РРЛ, как последовательности действий, составляет их преимущество перед документами МСЭ. Однако, адаптивная модуляция также не моделируется при расчёте показателей качества РРЛ.

Основные характеристики существующих методик и рекомендаций по расчёту показателей качества РРЛ представлен в таблице 1.7.

Таблица 1.7 - 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. Ошеревич	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. Наденко 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» ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств»	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

Представленные методики объединяет общий подход к расчёту РРЛ, который сводится к следующим этапам [5, 10, 13, 23, 31, 33, 35]:

1. По карте выбираются места размещения РРС на планируемой трассе.
2. Определяются азимуты на корреспондентов для каждой РРС.
3. Рассчитывается затухание радиоволн на каждом интервале РРЛ.
4. Определяются медианные значения мощности на входах приёмников каждого i -го интервала:

$$P_{\text{при}}(\text{дБ}) = P_{\text{эi}}(\text{дБ}) - W_i(\text{дБ}) \quad (1.1)$$

где $P_{\text{эi}}(\text{дБ})$ – эффективная излучаемая мощность сигнала передатчиком РРС, вычисленная для конкретного режима работы;

W_i (дБ) – затухание радиоволн на i -м интервале РРЛ, учитывающее все компоненты ослабления.

Эффективная излучаемая мощность сигнала РРС $P_{эi}$ (дБ) определяется для любого режима выражением:

$$P_{эi}(\text{дБ}) = P_{\text{пер}} + G_{\text{Апер}} + G_{\text{Апр}} + \eta_{\text{Фпер}} + \eta_{\text{Фпр}} - \Delta P_{\text{экспл}} \quad (1.2)$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика, дБ;

$G_{\text{Апер}}$ и $G_{\text{Апр}}$ – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенны, соответственно, дБ;

$\eta_{\text{Фпер}}$ и $\eta_{\text{Фпр}}$ – потери в передающем и приёмном фидерах, соответственно, дБ;

$\Delta P_{\text{экспл}}$ – эксплуатационный запас на разброс технических характеристик оборудования.

Затухание радиоволн определяются формулой:

$$W_i(\text{дБ}) = W_{\text{св}} + W_{\text{р}} + W_{\text{з}} \quad (1.3)$$

где $W_{\text{св}}$ – затухания в свободном пространстве;

$W_{\text{р}}$ – затухания, вносимые рельефом местности;

$W_{\text{з}}$ – затухания, вызываемые замираниями сигнала на интервале.

5. Рассчитывается значение мощности, требуемое на входе приёмника РРС для обеспечения связи с заданным качеством в заданном режиме, т.е. реальная чувствительность приёмника $P_{\text{рч}}$ в заданном режиме. На практике используют значение реальной чувствительности приёмника $P_{\text{рч}}$, данное в технических характеристиках оборудования. Как правило, $P_{\text{рч}}$ задаётся для вероятности ошибки BER , равной 10^{-6} или 10^{-9} . Существующие методики предполагают выполнение расчётов только для одного режима работы и не учитывают зависимость показателей качества

РРЛ при смене режима работы, что, однако характерно для современных цифровых РРС.

6. Определяется запас уровня радиосигнала M_i на входе приёмника каждого интервала по формуле:

$$M_i = P_{\text{при}} - P_{\text{рч}} \quad (1.4)$$

7. Рассчитываются показатели неготовности на каждом интервале и на линии в целом для цифровых РРЛ.
8. Рассчитываются показатели качества по ошибкам для каждого интервала и линии в целом.
9. Формируются выводы о пригодности РРЛ для обеспечения связи в заданных режимах по принятым при расчёте критериям качества.

В качестве примера на рисунке 1.5 приведён алгоритм расчёта РРИ согласно ГОСТ, который включает в себя основные этапы, перечисленные выше. Отличительными особенностями алгоритма являются:

- расчёт коэффициента аппаратурной неготовности, который является составной частью показателя устойчивости работы РРИ. Если требуемое значение не обеспечивается, то расчёт прекращается;
- расчёты производятся только для открытых и полукрытых интервалов РРЛ;
- учёт разнесённого приёма при расчёте показателей качества РРИ;
- учёт влияния интерференции, дождей и субрефракции на показатели качества;
- расчёт результирующих значений показателей качества;
- сравнение рассчитанных значений с заданными.

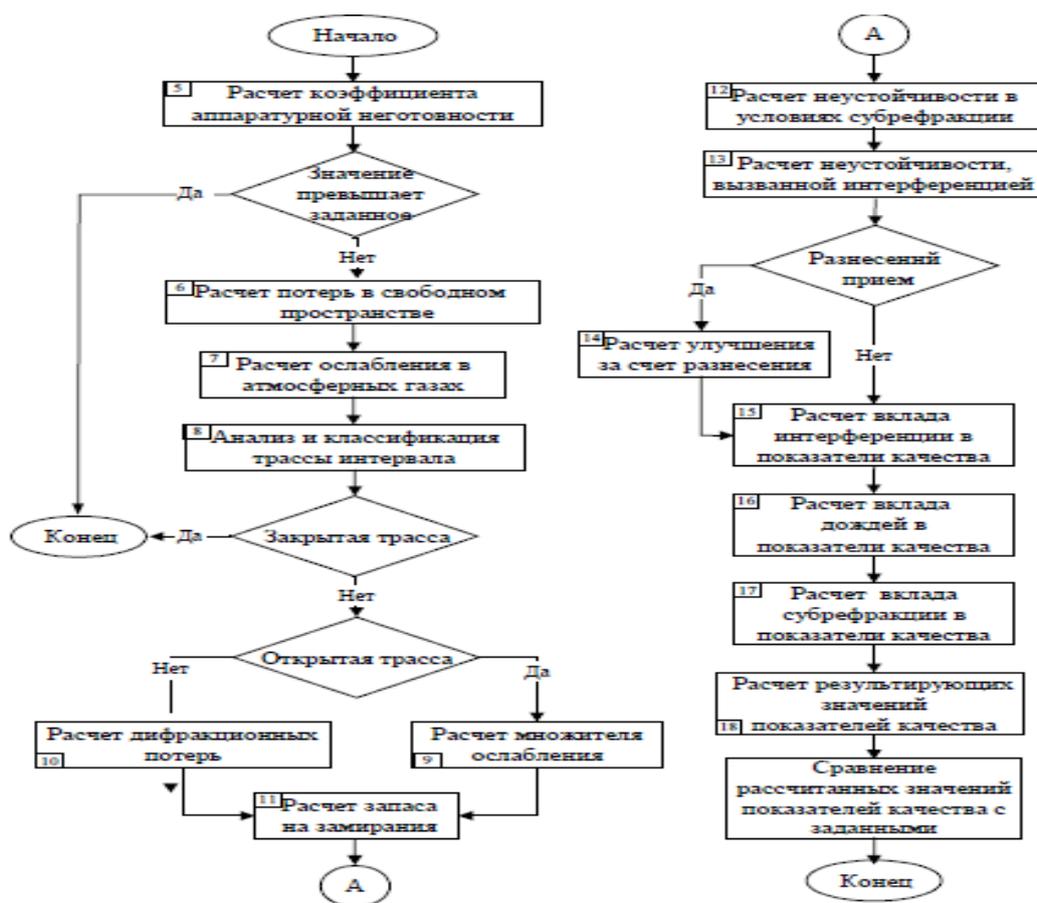


Рисунок 1.5 – Алгоритм расчёта РРЛ согласно ГОСТ Р 53363—2009

Как видно из таблицы 1.7, ни одна из существующих методик и рекомендаций не охватывает современных диапазонов частот радиорелейной связи и не учитывает особенностей работы РРС в режиме адаптивной модуляции, в то время, как на практике применение адаптивной модуляции 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 адаптивной модуляцией существенно затрудняет процедуру планирования радиорелейных линий и принятия решения о её построении. В связи с этим, тема диссертационной работы, направленная на исследование и разработку методов расчета пропускной способности радиорелейных линий с адаптивной модуляцией, является актуальной и имеет практическую значимость.

1.3.2 Известное специализированное программное обеспечение планирования и оптимизации радиорелейной связи

Приводя обзор практической реализации расчёта РРЛ на специализированном программном обеспечении (ПО), необходимо отметить, что в настоящее время существует несколько программных комплексов по решению задач планирования радиорелейных сетей связи, как отечественных, так и зарубежных.

Все ПО объединяет общий подход к расчёту, представленный на рисунке 1.6, который состоит из анализа (планирования) РРЛ и синтеза (оптимизации) РРЛ. В анализ входят расчёт с использованием моделей, где в качестве исходных данных выступают технические характеристики (ТХ) РРС, условия РРВ, требования к РРЛ и параметры модели. Получаются промежуточные или итоговые результаты, на основе которых принимается решение о пригодности РРЛ (РРИ).

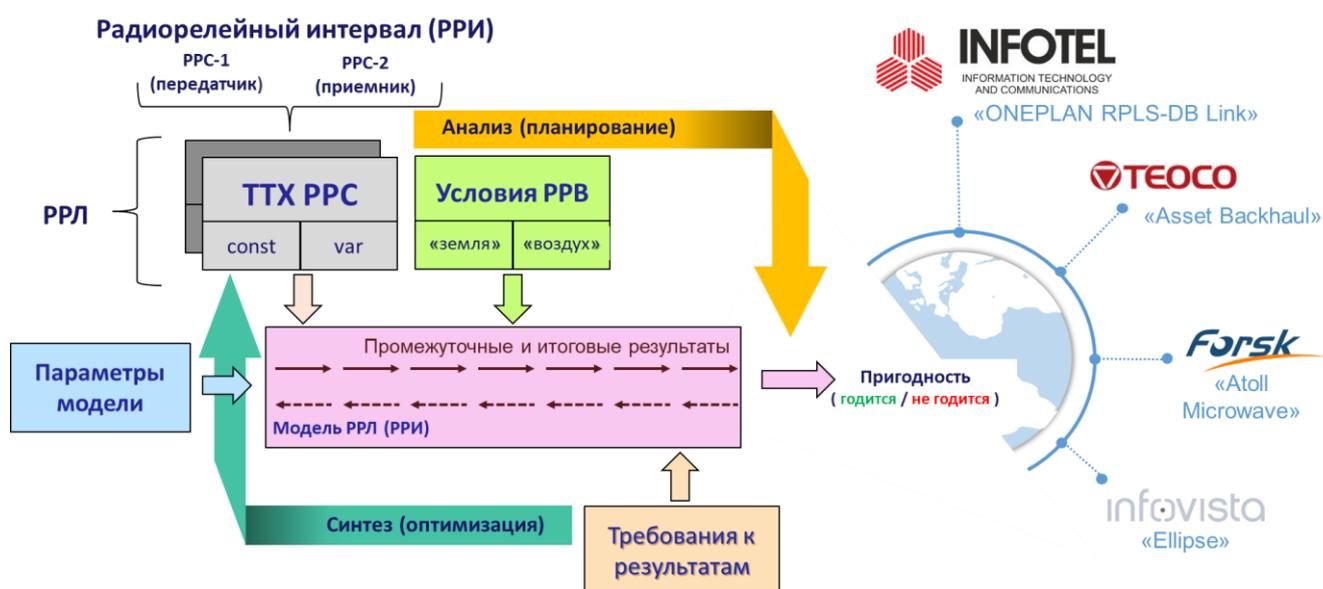


Рисунок 1.6 – Типовой обобщённый состав исходных данных и их взаимосвязь с результатами расчёта РРЛ в ПО

Среди зарубежных ПО существуют следующие решения.

Компания «Infovista» представляет продукт «Ellipse» для планирования и оптимизации транспортных сетей, разработанных для универсального применения, как для радиорелейных, так и для проводных сетей. С одной стороны, как

утверждает компания «*Infovista*»¹, в силу своей универсальности такой продукт может сэкономить затраты на *CAPEX* (*capital expenditures*), но, с другой стороны, это несёт в себе существенный недостаток: в силу своей расфокусировки, продукт не способен проводить точные расчёты для транспортных сетей радиорелейной связи, что может снизить качество передачи и даже привести к потере данных, и, как следствие, к потере прибыли оператора связи.

Компания *Forsk* предлагает решения по расчёту РРИ в отдельном продукте для радиорелейного планирования «*Atoll Microwave*»². Программа использует при расчёте исключительно Рекомендации *ITU-R*, не учитывая методик ГОСТ и НИИР. При расчёте РРИ учитываются адаптивная модуляция и управление мощностью передатчика (*ATPC, Automatic Transmit Power Control*).

Компания *TEOCO* предлагает решения по планированию проводной и радиорелейной транспортной связи в одном модуле «*ASSET Backhaul*»³. При планировании радиорелейных линий модуль способен осуществлять расчёт профиля РРИ, проводить анализ частот и интерференций, а также обеспечивать оптимизацию маршрутизации и пропускной способности. Алгоритмы расчёта потерь и затухания на трассе проводятся в соответствии со стандартными рекомендациями *ITU*, не учитывая методик ГОСТ и НИИР.

Компания *ATDI* в продукте радио-планирования «*HTZ Communications*»⁴ реализовала встроенную функцию расчёта РРИ. Из основных характеристик и возможностей функции расчёта РРИ можно выделить следующее. Такие параметры, как *ESR* (*Errored Second Ratio*), *SESR* (*Severely Errored Second Ratio*), *BBER* (*Background Block Error Ratio*) рассчитываются на основе Рекомендаций *ITU-R F.1703, ITU-T G.827* [118, 123]. Доступен расчёт неготовности РРИ для требуемого коэффициента битовых ошибок *BER* (*Bit Error Rate*), достигающего лишь $BER=10^{-3}$ и $BER=10^{-6}$, однако, современные требования к реальным параметрам оборудования достигают $BER=10^{-9}$. Также не учитываются затухания в

¹ URL: https://www.2test.ru/upload/iblock/795/ds_infovista_mentum_ellipse_1.pdf (дата обращения: 28.12.2023)

² URL: <https://www.forsk.com/atoll-microwave> (дата обращения: 28.12.2023)

³ URL: <https://www.teoco.com/products-services/ran-solutions/planning/backhaul-planning/> (дата обращения: 28.12.2023)

⁴ URL: <https://atdi.com/wp-content/uploads/2021/06/MW-link-profile.pdf.pdf> (дата обращения: 28.12.2023)

атмосфере и дождях при расчёте запаса (*margin calculation*) и мощности сигнала на приёме (*receive power*). Адаптивная модуляция в расчётах учитывается частично, информация о методах расчёта отсутствует, технические решения многодиапазонных интервалов и агрегации несущих частот моделируются.

Подводя итоги по обзору зарубежных разработок в области инструментов расчёта РРИ, необходимо отметить, что все из них основываются на Рекомендациях *ITU*, которые не в полной мере учитывают работу радиорелейной связи в диапазоне *E-Band*. Кроме компании *Forsk* ни одна из зарубежных компаний не включает возможность расчёта адаптивной модуляции. Существенным практическим недостатком всех зарубежных ПО является отсутствие оценки работы РРИ по методикам ГОСТ и НИИР.

Среди отечественных разработок существуют следующие ПО для планирования РРЛ.

Лидером по точности расчётов и функциональному многообразию являются российские продукты «*ONEPLAN RPLS-DB Link*» и «*ONEPLAN RPLS-XML*» компании-разработчика ИнфоТел⁵. Продукт «*ONEPLAN RPLS-DB Link*» сфокусирован на планирование сетей радиорелейной связи. Богатый функциональный набор позволяет рассчитывать РРИ с учётом климатических условий, дождей, проводить частотный анализ, рассчитывать интерференции, учитывать в расчёте адаптивную модуляцию и режим *SDB (Super Dual Band)*. При этом высокая точность расчётов подтверждается измерениями [34]. Продукт «*ONEPLAN RPLS-XML*» представляет собой универсальную версию ПО и предназначен для широкого применения в планировании подвижных (*NR, LTE, LTE-A, UMTS, GSM, LoRaWAN, WiMAX, DVB*) и транспортных радиорелейных сетей. В продукте реализованы методики и модели расчёта не только по ГОСТ, НИИР и Рекомендациям *ITU-R*, но и собственные модели и разработки.

Научно-исследовательский институт радио (НИИР) предложил одну из наиболее практико-ориентированных методик по расчёту РРИ до 40 ГГц. На

⁵ URL: <https://www.rpls.ru/ru/products/> (дата обращения: 28.12.2023)

официальном сайте НИИР заявлено дополнение методики до 100 ГГц, которая реализована в Программе автоматизированного проектирования цифровых радиорелейных линий связи (ПАП-ЦРПЛ)⁶. Однако в настоящее время это ПО, как и сама методика расчёта, до 100 ГГц пока не доступны.

Ленинградское отделение Научно-исследовательского института радио (ЛОНИИР) разработало систему автоматизированного проектирования (САПР) "Балтика"⁷, предназначенную для частотно-территориального планирования сетей радиосвязи. Подсистема "Балтика РРЛ" предназначена для расчёта радиорелейных линий и в настоящий момент также ограничена методикой до 40 ГГц.

Информационный космический центр «Северная корона» предлагает ПО «Альбатрос - Территория»⁸ для расчёта РРИ по методике ГОСТ и Рекомендации *ITU-R P.530* с сопровождающими ей документами. Расчёт адаптивной модуляции не поддерживается.

Компания «СвязьСервис» предлагает ПО «Эксперт РРЛ»⁹, реализованное на основе методики ГОСТ Р 53363 2009 для диапазона частот от 3,4 МГц до 40,5 ГГц. Расчёт адаптивной модуляции не поддерживается.

Организация «ЦТТ» заявляла возможность расчёта РРИ в диапазоне частот от 140 МГц до 86 ГГц¹⁰ по методикам НИИР, ГОСТ, *ITU-R P.530-17* (2017), Виганта-Барнета, однако ни одна из заявленных методик не предусматривает расчёт РРИ выше 40 ГГц.

⁶ URL: <https://www.niir.ru/proekty/proizvodstvo/programma-avtomatizirovannogo-proektirovaniya-cifrovyyh-radiorelejnyh-linij-svyazi/> (дата обращения: 28.12.2023)

⁷ URL: https://vk.com/wall-195927011_4030?ysclid=ll9hwcvm7y352222668 (дата обращения: 28.12.2023)

⁸ URL: https://spacecenter.ru/Alb_IM.htm (дата обращения: 28.12.2023)

⁹ URL: <http://www.comm-serv.ru/programmnoe-obespechenie/ekspert-rrl.html> (дата обращения: 28.12.2023)

¹⁰ URL: <https://www.ctt-group.ru/drrl> (дата обращения: 28.12.2023)

1.4 Постановка задачи исследований

На основании вышеприведенного анализа, раскрывающего технические возможности и особенности применения современных радиорелейных линий, на рисунке 1.7 приведена обобщённая модель взаимодействия рассматриваемых РРЛ с АМ как части транспортного сегмента сети подвижной связи (СПС) с внешними системами в виде совокупности внешних и внутренних характеристик функционирования РРЛ с АМ.

Транспортный сегмент состоит из множества направлений связи, направления – из РРЛ с АМ, РРЛ с АМ состоит из совокупности РРИ с АМ, в состав которых входят РРС с АМ. РРС с АМ, как единичный элемент в этой общей структуре, обладает набором технических характеристик (ТХ) – параметров $m \in M$, влияющих на работу РРИ в частности и на всю сеть в целом. Также существуют различные параметры РРВ $u \in U$: потери в атмосфере, в газах, которые описываются в случае радиорелейной связи законами распределения Райса [37, 100, 101], Накагами [93, 97, 111] и логарифмически-нормальным законом [47, 93, 113]. Задаются требования к таким показателям качества РРЛ с АМ, как устойчивость и BER , обозначенные символом $Q_{тр}$, на основе перечисленных зависимостей необходимо получить результаты расчёта РРЛ с АМ $Q(m, u)$.

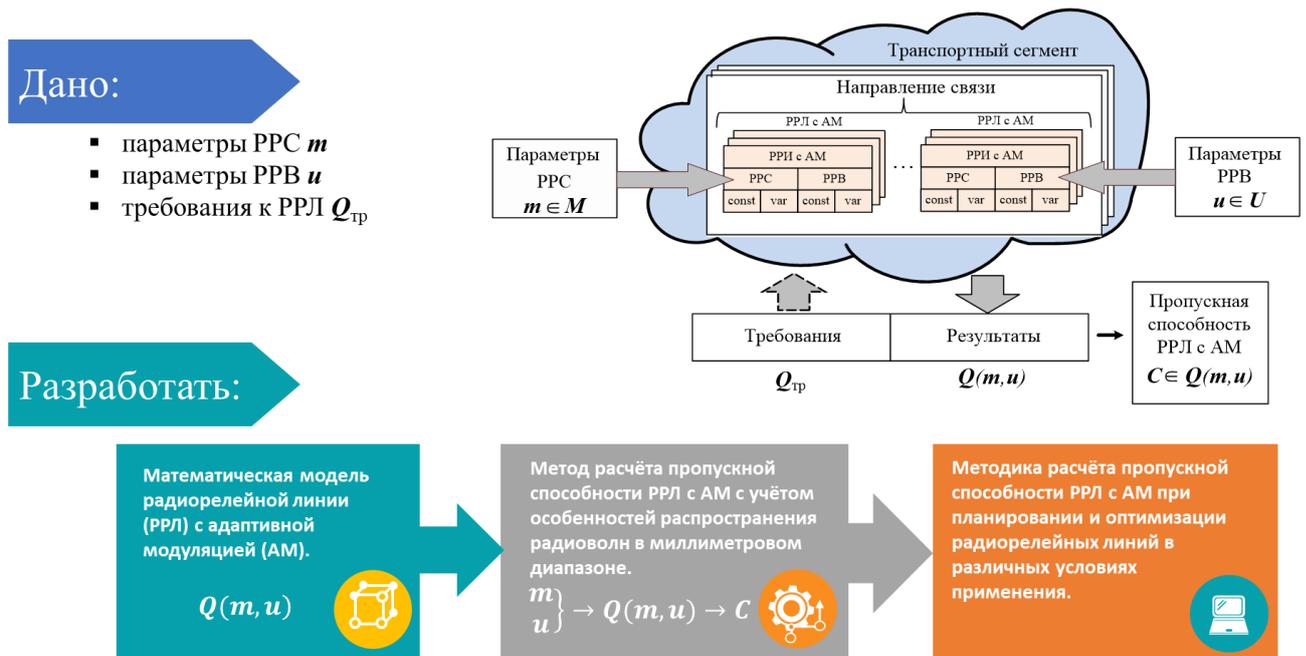


Рисунок 1.7 – Формализованная постановка научной задачи

Таким образом, даны: параметры РРС m , параметры РРВ u , требования к РРЛ $Q_{\text{тр}}$. Из всех представленных зависимостей в данной работе интерес представляет пропускная способность $C \in Q(m, u)$, прогноз которой необходимо получить.

Это отражает цель исследования, которая заключается в повышение пропускной способности радиорелейных линий за счёт использования адаптивной модуляции и количественного обоснования режимов работы радиорелейных станций (РРС) при планировании и оптимизации РРЛ с АМ [70, 130].

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе должна быть решена следующая научная задача: разработать математическую модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, метод расчёта пропускной способности данной радиорелейной линии с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне, а также методику расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией при планировании и оптимизации радиорелейных линий в различных условиях применения.

В рамках указанной общей научной задачи должны быть решены следующие частные задачи исследований:

- Разработать математическую модель радиорелейной линии (РРЛ) с адаптивной модуляцией (АМ) $Q(m, u)$;
- Разработать метод расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне $\left. \begin{matrix} m \\ u \end{matrix} \right\} \rightarrow Q(m, u) \rightarrow C$;
- Разработать методику расчёта пропускной способности РРЛ с АМ при планировании и оптимизации радиорелейных линий в различных условиях применения.

При этом математическая модель входит в состав метода, а метод в свою очередь находит отражение в методике расчёта пропускной способности РРЛ с АМ и научно-технических предложениях по её программной реализации и по повышению пропускной способности.

Решение указанных трёх задач рассматривается последовательно в следующих трёх главах диссертационной работы.

1.5 Выводы по первому разделу

1. Современные тенденции развития СПС направлены на достижение максимально возможной пропускной способности, минимального времени задержки, улучшенной спектральной эффективности, высокой точности синхронизации и т.д. Базовая станция сетей доступа 5G должна обеспечить пропускную способность от 3 до 10 Гбит/с и более. Для полноценного обеспечения заданных требований к СПС необходим высокоскоростной беспроводный транспортный сегмент СПС, обладающий ещё более высокой пропускной способностью (от 4 до 100 Гбит/с) и устойчивостью, чем сеть доступа.

2. Основными тенденциями развития беспроводного транспортного сегмента СПС, которые позволяют повысить его пропускную способность, являются использование технологий *XPIC*, *SDB* и агрегации несущих, освоение миллиметрового диапазона частот, в частности, 42 ГГц (*Q-band*), 60 ГГц (*V-band*),

70/80 ГГц (*E-band*), 100 ГГц (*W-band*), 150 ГГц (*D-band*), а также применение радиорелейных линий с адаптивной модуляцией.

3. В практике построения СПС возникла ситуация, когда РРЛ обеспечивают связь и в *fronthaul*, и в *backhaul*, при этом трафик может быть разных категорий и носить непрерывный (для приоритетного потока) или прерывистый (для неприоритетного потока) характер.

4. Применение РРЛ с АМ позволяет существенно увеличить устойчивость и пропускную способность транспортного сегмента СПС за счёт сохранения связи в периоды замираний на пониженной скорости и использования максимально возможной скорости в периоды отсутствия замираний, обеспечивая при этом разное требуемое качество обслуживания разных категорий трафика.

5. Анализ существующего научно-методического аппарата и специализированного ПО для планирования и оптимизации РРЛ показал, что реализованные в них существующие методики и рекомендации МСЭ не учитывают:

- особенности работы РРЛ с АМ в условиях быстрых и медленных замираний;
- особенности условий РРВ в миллиметровом диапазоне *E-band*, проявляющиеся в процессе функционирования РРЛ с АМ;
- особенности пакетной передачи данных по РРЛ с АМ в транспортном сегменте сетей подвижной связи.

6. Сложилась ситуация, когда технологии уже внедрены в использование, а научно-методический аппарат их ещё не учитывает. Для устранения указанных недостатков существующих методик и программного обеспечения необходимо: разработать модель, метод и методику расчёта пропускной способности радиорелейных линий с адаптивной модуляцией, а также научно-технические предложения по программной реализации данной методики при планировании и оптимизации РРЛ с АМ в различных условиях применения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ ЛИНИИ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В настоящем разделе представлены результаты решения сформулированной в конце первого раздела задачи разработки модели радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, позволяющей оценивать влияние режимов работы радиорелейных станций с адаптивной модуляцией на устойчивость функционирования РРЛ в условиях воздействия замираний.

В подразделе 2.1 раскрываются технические особенности работы РРИ с адаптивной модуляцией. В подразделе 2.2 приводится обобщённая математическая модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией. В подразделе 2.3 представлены результаты разработки модели радиорелейного интервала с адаптивно изменяемой битовой скоростью передачи в условиях замираний. Подраздел 2.4 посвящён модели радиорелейной линии с адаптивно изменяемой битовой скоростью передачи в условиях медленных замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн. В подразделе 2.5 представлены выводы к главе 2.

Материал настоящего раздела нашёл отражение в публикациях [68, 70, 130, 131].

2.1 Особенности реализации адаптивной модуляции в радиорелейной связи

Особенностью канала беспроводного сегмента транспортной сети 5-го (5G) и последующих (6G и далее) поколений является требование обеспечить постоянный рост пропускной способности. При этом пропускная способность беспроводного транспортного сегмента должна быть на порядок выше, чем в сетях радиодоступа. Требованиями Европейского института по стандартизации в области телекоммуникаций *ETSI (European Telecommunications Standards Institute)* определена скорость канала связи беспроводного транспортного сегмента до 100 Гбит/с [89, 131]. Для обеспечения высоких скоростей передачи данных необходимо использовать схемы модуляции *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)* более

высоких уровней M , чем в предыдущих поколениях связи¹¹. M обозначает размерность созвездия QAM , или общее число вариантов позиций символов в созвездии, при этом $M = L^2$, где L – количество бит в одном символе. В современных системах РРЛ применяются размерности QAM до $M=4096$ [96].

За счёт изменения внешних условий и состояния канала постоянное применение высоких уровней модуляции QAM может привести к потере данных. Поэтому требуется использование адаптивной модуляции *adaptive QAM* (A- QAM) [131], которая способна автоматически переключать уровень модуляции в соответствии с состоянием канала (рисунок 2.1). При улучшении отношения сигнал-шум (ОСШ) происходит адаптация модуляционной схемы на более высокий уровень, что позволяет максимально использовать доступный ресурс канала и осуществлять более высокие скорости передачи. При снижении ОСШ происходит переключение на более низкий уровень QAM , скорость передачи становится медленнее, но за счёт этого отсутствуют потери данных.

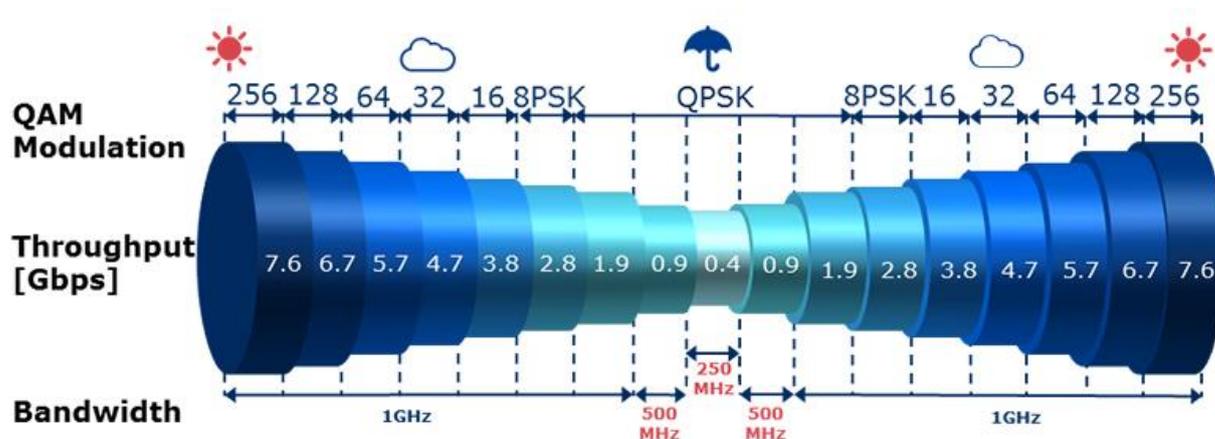


Рисунок 2.1 – Графическое представление работы адаптивной модуляции в зависимости от внешних условий [104]

Таким образом, адаптивная модуляция представляет собой автоматический механизм переключения уровней модуляции в зависимости от физического состояния радиоканала с целью оптимального использования доступного ресурса канала по критериям максимально возможной пропускной способности, с одной стороны, и устойчивости функционирования, с другой стороны.

¹¹ URL: <https://microwave-link.com/tag/5g/> (дата обращения: 28.12.2023)

Принцип работы РРЛ с адаптивной модуляцией приведён в спецификациях *ETSI*. Функционирование РРЛ с адаптивной модуляцией и автоматическим управлением мощностью передатчика рассмотрено в техническом отчёте *ETSI TR 103103 V1.1.1* [91]. Переключение между уровнями модуляции происходит в зависимости от уровня сигнала на приёме. При этом для текущего уровня модуляции порог переключения на более высокий уровень должен быть выше, чем порог переключения на более низкий уровень модуляции. Разные пороги переключения вверх и вниз обеспечивают повышение устойчивости работы РРЛ, так как существенно снижается вероятность скачков (англ. *ping-pong*) между уровнями модуляции. Например, переключение на более высокий уровень модуляции происходит в том случае, если при действующем уровне сигнала коэффициент битовых ошибок меньше требуемого значения $BER < BER_{\text{треб}}$, где $BER_{\text{треб}} = 10^{-12}$. При ухудшении уровня сигнала и возникновении большего числа битовых ошибок $BER > 10^{-6}$ происходит переключение модуляции на более низкий уровень. Этот процесс схематично представлен на рисунке 2.2. Следует отметить, что для управления переключением между уровнями модуляции, фактическое измерение битовых ошибок, которые возникают с вероятностью 10^{-9} или 10^{-6} , на практике не применяется, так как это приведёт к увеличению времени реакции системы. В связи с этим, на практике контролируется ОСШ и сравнивается с заданными порогами, которые соответствуют уровню модуляции и требуемым вероятностям битовой ошибки.

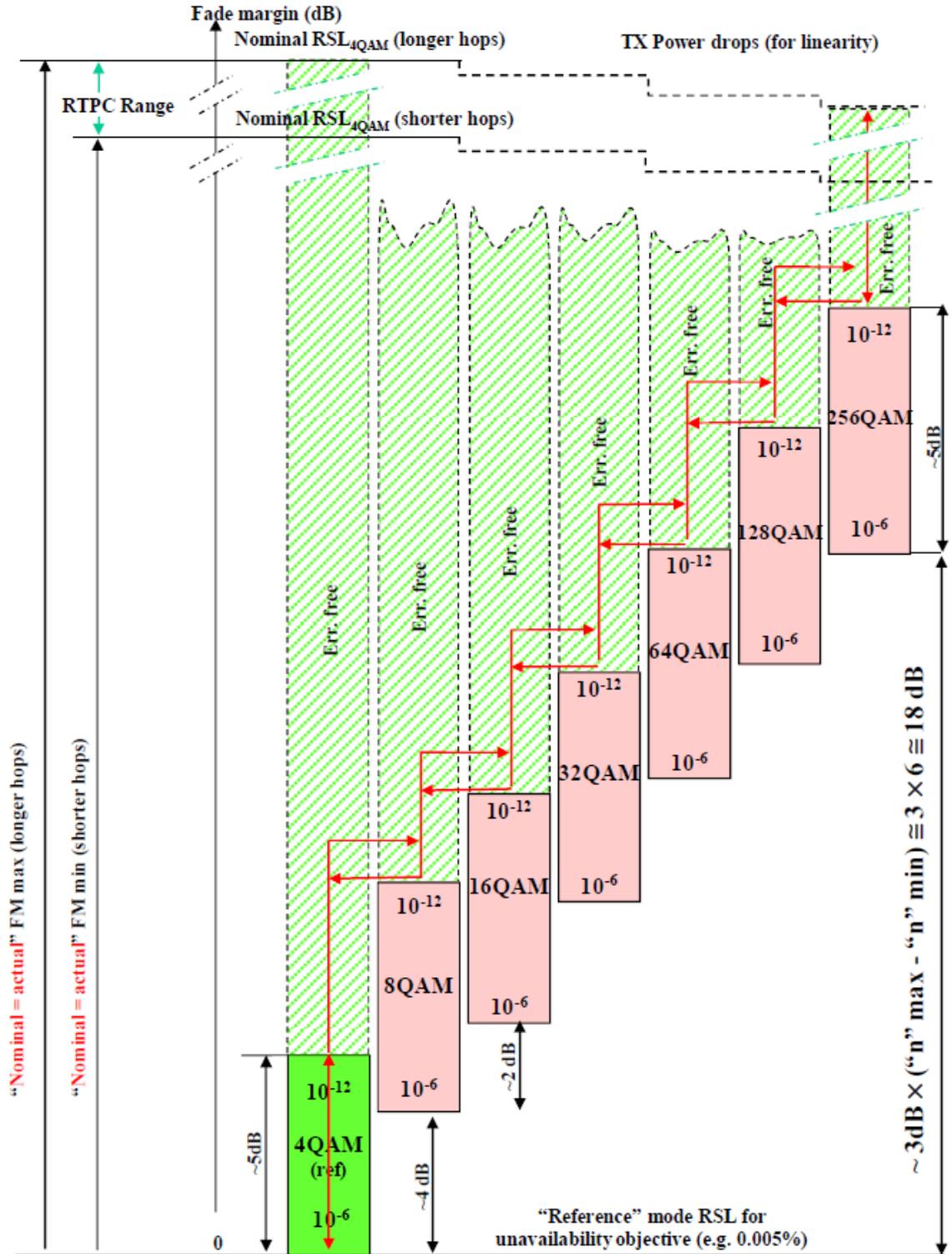


Рисунок 2.2 – Принцип переключения между уровнями модуляции, определённый организацией *ETSI*

Разработанная организацией *ETSI* в спецификации *TR 103103 V1.1.1* [91] логика переключения между уровнями модуляции при возникновении замираний представлена на рисунке 2.3. На верхнем графике показано переключение между

уровнями модуляции при изменении значения затухания сигнала. Изменение мощности передатчика в зависимости от состояния радиоканала представлено на среднем графике, а соответствующие уровни сигнала на приёме представлены на нижнем графике. Процесс переключения между уровнями модуляции имеет характер гистерезиса, который отражён на верхнем графике: при ухудшении состояния радиоканала происходит переключение на более низкий уровень модуляции, однако при улучшении состояния радиоканала переключение на более высокий уровень модуляции происходит не при равном движении вниз значения мощности сигнала, а при значении мощности сигнала, более высоком, чем при движении вниз. Более жёсткие условия перехода вверх обусловлены необходимостью выдержать требования по устойчивости работы РРЛ. Также необходимо учитывать, что чем выше уровень модуляции, тем шире спектр сигнала, поэтому для того, чтобы сохранить линейность сигнала при повышении уровня модуляции, необходимо снизить мощность передачи. Эта логика отражена на среднем графике рисунка 2.3. На нижнем графике рисунка 2.3 показан гистерезис зависимости используемой схемы модуляции от уровня сигнала на приёме.

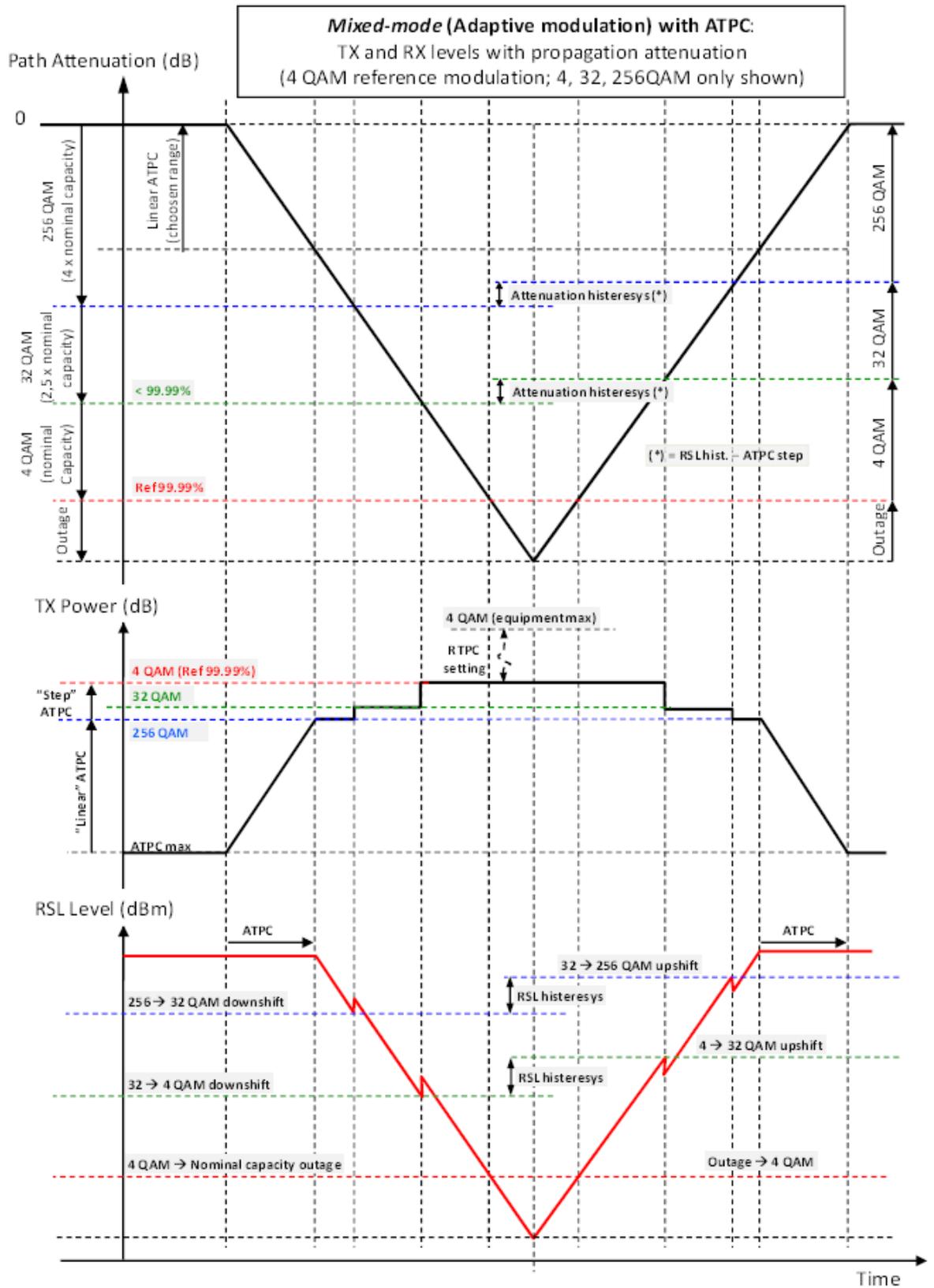


Рисунок 2.3 – Замирания и логика переключения модуляционной схемы (верхний график), мощности передатчика (средний график) и уровень сигнала на приёме (нижний график)

В качестве примера практической реализации разработанной организацией ETSI логики работы РРЛ с АМ можно привести радиомодуль «*iPASOLINK EX Advanced*» компании NEC [108]. В таблице 2.3 приведены значения ОСШ, принятые за пороги переключения между схемами модуляций в направлениях к более верхним и нижним схемам.

Таблица 2.1 – Пороги ОСШ для переключения схем модуляций в направлениях «вверх» и «вниз»

Модуляция	256-QAM	128-QAM	64-QAM	32-QAM	16-QAM	8-PSK	QPSK
Порог ОСШ «вниз», дБ	29,5	26,5	23,5	20,5	17,5	16	11
Порог ОСШ «вверх», дБ	–	31,5	28,5	25,5	22,5	21,5	20

Техническая реализация переключения между уровнями модуляции заключается в измерении ОСШ, сравнении его с заданными порогами и решении о переключении на другой уровень модуляции. Механизм измерения ОСШ и переключения модуляции радиомодуля «*iPASOLINK EX Advanced*» компании NEC схематически обозначен на рисунке 2.4. Так, измеренные значения ОСШ в демодуляторе (*DEM*) на станции А и зафиксированное в нём количество ошибок передаются в преамбуле радиокадра на станцию Б, где в модуляторе (*MOD*) принимается решение об изменении мощности передатчика или переключении уровня модуляции. Таким образом, реализация адаптивной модуляции в РРЛ представляет собой классическую схему системы передачи сообщений с обратной связью.

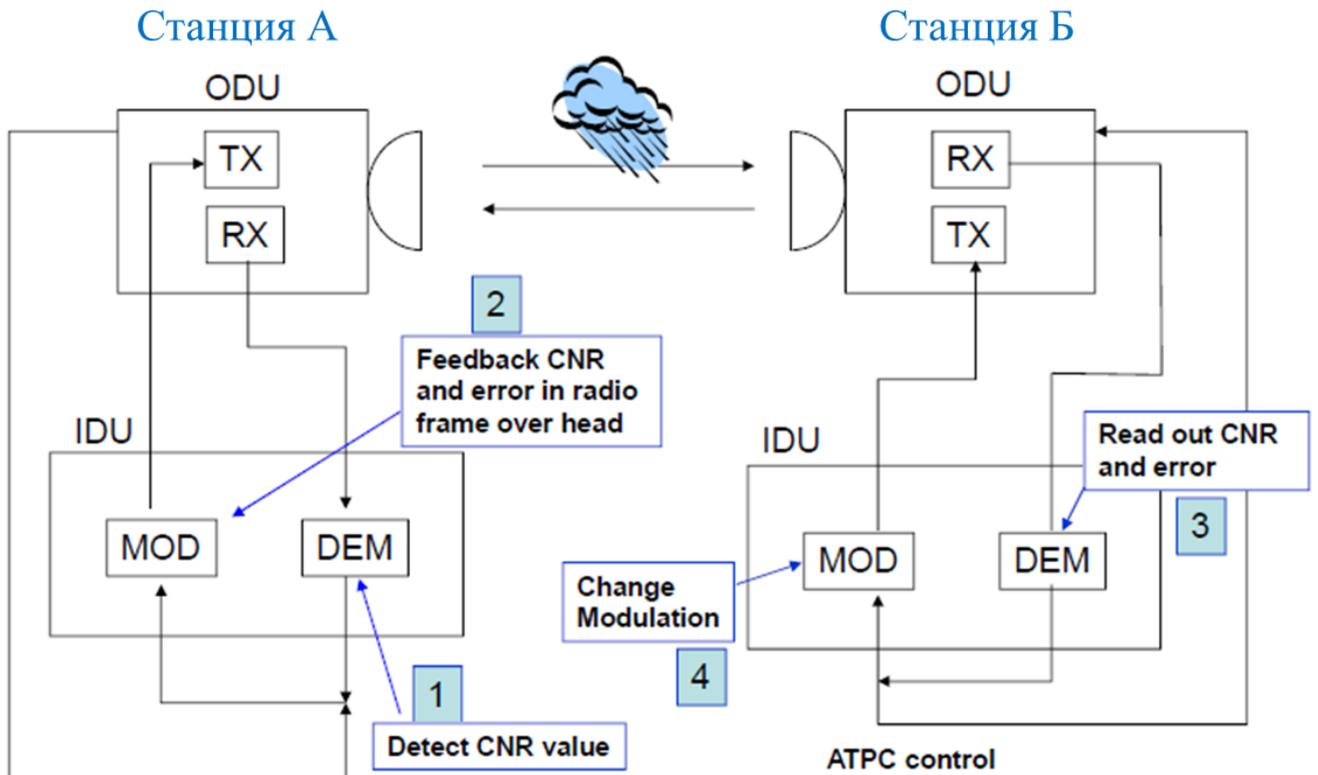


Рисунок 2.4 – Решающая схема переключения вида модуляции

Системы с обратной связью подобного рода для каналов радиосвязи не прямой видимости (коротковолновая радиосвязь, тропосферная связь и другие рода связи с неустойчивой средой распространения радиоволн) освещены в работах Каневского З.М. [25], Коржика В.И. [26], Постюшкова В.П. [17] и других учёных. Радиорелейная связь, как вид наземной радиосвязи с прямой видимостью, характеризуется достаточно высокой устойчивостью функционирования, что позволяет сделать ряд допущений, упрощающих модель РРЛ с АМ.

С учётом того, что измеренные значения ОСШ и количество зафиксированных ошибок передаётся в преамбуле радиокадра, то можно предположить, что время реакции РРЛ с АМ, как системы с обратной связью, будет равно сумме временных интервалов, выделенных на регистрацию параметров (один радиокадр), на передачу по каналу обратной связи (один радиокадр) и на выработку управляющего воздействия (один радиокадр). Всего время реакции составит длительность передачи 3-х радиокадров.

Например, в радиорелейных станциях серии *MINI-LINK 6600* и *MINI-LINK 6366* (компания *Ericsson AB*) максимальная длина *Ethernet* радиокадра составляет

9216 байт¹². Время передачи одного радиокадра в наиболее широко используемых в классическом диапазоне радиочастот с шириной полосы сигнала 28 МГц и модуляцией *4QAM* составляет 1,7 мс, а в полосе сигнала 56 МГц с использованием модуляции *4QAM* – 0,84 мс. В диапазоне *E-band* при полосе сигнала 250 МГц и модуляции *BPSK* продолжительность передачи одного радиокадра составит 0,4 мс, а при ширине сигнала 2000 МГц и модуляции *BPSK* – 0,05 мс. Следовательно, максимальное время реакции $\tau_{\text{реакц}}$ в классическом диапазоне радиочастот составит 5,1 мс, а в диапазоне *E-band* – 1,2 мс.

Как показали многочисленные экспериментальные исследования, выполненные в разных странах и климатических зонах под эгидой МСЭ [101], при глубине замираний 20 дБ медианное значение скорости уменьшения уровня сигнала составило 5 дБ/с, а при глубине замираний 30 дБ, медианная скорость уменьшения сигнала уже составила 20 дБ/с. На некоторых трассах в 0,1% случаев были зафиксированы медианные значения скорости падения сигнала 100 дБ/с (таблица 2.2).

Из приведённых данных следует, что при максимальной зафиксированной скорости падения уровня сигнала в 100 дБ/с для указанных выше максимальных значениях времени реакции $\tau_{\text{реакц}}$ в РРЛ с АМ, уровень сигнала на входе приёмника изменится на $0,51 \text{ дБ}/\tau_{\text{реакц}}$ в классическом диапазоне и всего на $0,12 \text{ дБ}/\tau_{\text{реакц}}$ в диапазоне *E-band*, что намного меньше минимальной разницы (3 дБ) между соседними порогами переключения модуляции.

¹² URL: <https://www.ericsson.com/en/portfolio/networks/ericsson-radio-system/mobile-transport/microwave/split-mount-shorthaul/mini-link-6600> (дата обращения: 28.12.2023)

Таблица 2.2 – Оценка времени, необходимого для смены вида модуляции при максимальной длине радиокадра, минимальной скорости и вида модуляции

Диапазон	Ширина полосы сигнала	Мин. вид модуляции	Время передачи радиокадра	Макс. время реакции, $\tau_{\text{реакц}}$	Макс. скорость изм. глубины зам.
40 ГГц	28 МГц / 56 МГц	4QAM	1,7 мс / 0,84 мс	5,1 мс	100 дБ/с= =0,51дБ/ $\tau_{\text{реакц}}$
70/80 ГГц (E-band)	250 МГц / 2000 МГц	BPSK	0,4 мс / 0,05 мс	1,2 мс	100 дБ/с= =0,12дБ/ $\tau_{\text{реакц}}$

Следовательно, временем реакции РРЛ с АМ, как в системе с обратной связью, и возникающими в ней переходными процессами можно пренебречь. Поэтому в формулах расчёта пропускной способности, представляющих модель РРЛ с АМ в подразделе 2.2, инерционность не учитывается и считается, что реакция системы переключения модуляции является мгновенной.

Модель РРЛ с АМ должна учитывать замирания, возникающие в среде распространения радиоволн, позволять рассчитывать вероятность битовой ошибки (BER) и пропускную способность в зависимости от ОСШ с учётом разных законов распределения замираний в канале связи. Эти требования были учтены при разработке модели РРЛ с АМ и описаны в следующем подразделе.

2.2 Обобщённая математическая модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией

В основу разработанной обобщённой модели радиорелейной линии с адаптивной модуляцией легли математическая модель функционирования сети радиорелейной связи с адаптивной модуляцией и пакетной передачи данных, предложенная в работах [69, 70], а также подходы к расчёту верхней границы пропускной способности в беспроводных каналах с замираниями, изложенные в работах [93, 94].

В отличие от существующих методик [13, 33, 120] 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 (состоящего одновременно из непрерывного и прерывистого типов трафика).

Под пропускной способностью РРИ без АМ с непрерывным типом трафика, работающим с постоянной скоростью передачи, понимается максимальная скорость [21, 61, 124, 133, 135, 136] $C_{max} \in \{C_i\}_n$, поддерживаемая радиорелейным оборудованием. При условии, что коэффициент неготовности $K_{нг}$ не превышает требуемого значения $K_{нг.тр}$, максимальную скорость можно представить выражением:

$$C_{max} = \max_{i=1,n} C_i | K_{нг.i} \leq K_{нг.тр} \quad (2.1)$$

где $K_{нг.i} = F(V_i)$ – вероятность того, что уровень сигнала падает ниже чувствительности, соответствующей допустимой глубине замирания V_i при скорости C_i .

В случае заданной постоянной скорости передачи $C_{тр}$ интервал РРЛ считается пригодным, если $K_{нг}(C_{тр}) \leq K_{нг.тр}$, что эквивалентно условию $C_{max} \geq C_{тр}$. Отсюда следует, что расчёт пропускной способности РРИ непосредственно связан с расчётом коэффициента неготовности и с оценкой пригодности интервала.

Однозначного определения пропускной способности интервала РРЛ, работающего с переменной скоростью передачи в режиме с адаптивной модуляцией, в настоящее время не существует для условий применения таких интервалов в мультисервисных транспортных сетях связи и сетях доступа, предназначенных для одновременной передачи разных типов трафика с разными требованиями к скорости передачи и коэффициенту неготовности. В работе [70] предлагается оценивать пропускную способность таких РРИ отдельно для двух

типов трафика: 1) требующего постоянную скорость передачи и 2) допускающего переменную скорость передачи.

В случае передачи первого типа трафика, требующего постоянную скорость, в качестве пропускной способности РРИ с АМ в [69] предлагается, как и в случае РРИ без АМ, рассматривать максимальную скорость C_{\max} , рассчитываемую по формуле (2.1).

В случае передачи второго типа трафика, допускающую переменную скорость, в качестве пропускной способности РРИ с АМ в [70] предлагается рассматривать среднюю скорость передачи $C_{\text{ср}}$, рассчитываемую по формуле:

$$C_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n C_i (F(V_{i+1}) - F(V_i)) = \sum_{i=1}^n C_i (P_{\text{н.}i+1} - P_{\text{н.}i}) \quad (2.2)$$

где V_i – допустимое ослабление сигнала (соответствующее глубине замирания, в результате чего уровень сигнала снижается до чувствительности приёмника $P_{\text{с.тр.}i}$), при котором на скорости передачи C_i , соответствующей i -му уровню модуляции, выполняются требования к вероятности ошибки (BER);

$F(V) = Pr(v < V)$ – функция распределения вероятности ослабления сигнала v ;

$F(V_i) = P_{\text{н.}i} = K_{\text{нг.}i}$ – вероятность ослабления сигнала v меньше допустимой величины V_i , соответствующая коэффициенту неготовности $K_{\text{нг.}i}$ при работе РРИ с АМ на скорости C_i ;

n – число доступных градаций скорости передачи (уровней модуляции) в РРИ, упорядоченных по возрастанию, т.е. $C_1 < C_2 < \dots < C_n$. При $i=n$ в формуле (2.2) следует подставлять значения $F(V_{i+1}) = P_{\text{н.}i+1} = 1$.

При передаче трафика с переменной скоростью со средней величиной $C_{\text{ср}}$, рассчитываемой по формуле (2.2), пригодность РРИ с АМ оценивается по критерию допустимости коэффициента неготовности на минимальной градации скорости $K_{\text{нг}}(C_1) \leq K_{\text{нг.тр}}$.

Обычно первый тип трафика (с постоянной скоростью передачи) является приоритетным, а второй (с переменной скоростью передачи) – неприоритетным. В

случае передачи обоих типов трафика одновременно именно по величине коэффициента неготовности РРИ с АМ при передаче первого типа трафика с заданной скоростью $C'_{\text{тр}}$ делается вывод о пригодности интервала, т. е. РРИ с АМ считается пригодным, если $P_{\text{н}}(C'_{\text{тр}}) < P_{\text{н.тр}}$. Если при этом оказывается, что $C_{j-1} \leq C'_{\text{тр}} < C_j$, где $1 < j \leq n$, то избыточные градации скорости $\{C_j, \dots, C_n\}$ можно использовать для передачи неприоритетного трафика с максимальной средней скоростью:

$$C''_{\text{ср}} = \sum_{i=j}^n (C_i - C'_{\text{тр}})(F(V_{i+1}) - F(V_i)) = \sum_{i=j}^n (C_i - C'_{\text{тр}})(P_{\text{н.}i+1} - P_{\text{н.}i}) \quad (2.3)$$

При $C'_{\text{тр}} = 0$ и $j=1$ (при отсутствии первого типа трафика) формула (2.3) совпадает с формулой (2.2).

Коэффициент неготовности РРИ с АМ при обслуживании неприоритетного трафика со средней скоростью $C''_{\text{ср}}$ (2.3) определяется вероятностью ослаблений, меньше допустимой величины V_j для градации скорости C_j , т. е. $P_{\text{н}}(C''_{\text{ср}}) = P_{\text{н.}j}$.

При этом коэффициент неготовности всей РРЛ зависит от коэффициента неготовности Кнг каждого отдельного интервала: $P_{\text{н.ррл}} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{\text{н.рри.}i})$, что можно аппроксимировать через $P_{\text{н.ррл}} \approx \sum_{i=1}^N P_{\text{н.рри.}i}$, а максимальная скорость в РРЛ определяется минимальной скоростью в РРИ: $C_{\text{max.ррл}} = \min_{i=1, \dots, N} C_{\text{max.рри.}i}$.

Приведенные выше формулы (2.1) - (2.3) являются основной отличительной особенностью разработанной модели РРЛ с АМ для расчёта пропускной способности и Кнг отдельных РРИ с учётом АМ, что было невозможно с использованием известных моделей расчёта РРЛ без АМ [13, 33, 120]. Пересчёт пропускных способностей и коэффициентов неготовности РРИ с АМ к аналогичным показателям РРЛ с АМ приведен в [70]. Для расчёта пропускной способности РРИ с АМ по формулам (2.1) - (2.3) необходимо знать функцию распределения вероятности ослабления сигнала (функцию распределения замираний) $F(V)$.

Описанные в разделе 1 факторы случайным образом влияют на состояние канала РРЛ и, как следствие, на величину замираний сигнала на приёме. Так как процесс изменения состояния канала радиорелейной связи носит случайный характер и такие его параметры, как коэффициент передачи канала, затухание (ослабление) и замирание сигнала, уровень сигнала на входе приёмника и отношение сигнал-шум являются случайными величинами (СВ), то для построения модели такого канала необходимо руководствоваться методами теории вероятностей, распространения радиоволн и передачи сигналов. Исследованию распространения радиоволн и вероятностных характеристик сигналов РРЛ посвящены ряд фундаментальных работ отечественных и зарубежных авторов [5, 16, 22, 30, 100].

В связи с тем, что для классического и вновь введённых диапазонов радиочастот обязательным условием обеспечения устойчивости функционирования РРЛ является наличие прямой радиовидимости, канал радиорелейной связи типа «точка-точка» (англ. *PTP – Point-To-Point*) характеризуется, как правило, наличием одной, ярко выраженной доминантной составляющей принимаемого сигнала. Многочисленные статистические данные показали, что математически такой канал с замираниями с достаточной для практики точностью описывается законом распределения Райса [36, 100, 101]. В последние годы появился ряд теоретических работ [97, 111], указывающих на то, что в системах радиорелейной связи типа «точка-многоточка» (англ. *PMP – Point-Multi-Point*), где имеется несколько доминирующих сигналов от разных терминалов, а также в системах «точка-точка», в которых применяется агрегация несущих, канал с замираниями хорошо описывается m -распределением Накагами (m -Накагами) [93]. Кроме того, существует двухлучевая модель с диффузным замиранием мощности сигнала (*TWDP, Two-Wave with Diffuse Power*), которая, как показано в [63], включает в себя не только классические релейские и райсовские замирания, но и охватывает класс двумодальных распределений, характерных для некоторых современных беспроводных каналов связи [63].

Одним из наиболее универсальных способов оценки канала является его

исследование на помехоустойчивость, с помощью показателя коэффициент битовой ошибки BER , так как он не зависит от источника или природы ухудшения канала [94]. Другим показателем для оценки канала выступает значение B пропускной способности канала, по которому делается вывод о том, удовлетворяет ли его значение заданным требованиям по пропускной способности. Отношение мощности сигнала к мощности шума, далее отношение сигнал-шум (ОСШ), на входе приёмника РРЛ непосредственно влияет на BER и пропускную способность B канала.

При измерении индикатор BER выражают отношением количества ошибочно принятых битов к общему числу переданных битов [95]:

$$BER = \frac{N_{error}}{N_{bit}} \quad (2.4)$$

Показатель BER может быть косвенно получен из значения вероятности битовой ошибки (BER , *Bit Error Probability*) [114]. В общем случае формула для нахождения средней вероятности битовой ошибки BER в беспроводном канале с замираниями представляет собой интеграл [93]:

$$BER = \int_0^{\infty} P_b(\gamma) f_{\gamma_b}(\gamma) d\gamma, \quad (2.5)$$

где $P_b(\gamma)$ – вероятность битовой ошибки в «стандартном» канале с аддитивным белым гауссовским шумом АБГШ;

γ – ОСШ (в раз);

Составляющую беспроводного канала с характерными ему замираниями описывает $f_{\gamma_b}(\gamma)$ – функция плотности вероятности распределения ОСШ в исследуемом беспроводном канале с замираниями;

Нахождение вероятности битовой ошибки $P_b(\gamma)$ в канале АБГШ описано в приложении А (стр. 165).

Согласно формуле (2.5) общие правила расчёта BER в беспроводном канале с замираниями таковы, что в качестве первого множителя под интегралом берётся вероятность битовой ошибки в канале АГБШ. При этом, так как в аппаратуре измеряется энергия модуляционного символа, а не бита, то необходимо найти именно функцию зависимости *битовой* вероятности ошибки $P_b(\gamma_s)$ от *символьного* ОСШ γ_s , который представляет собой отношение энергии *символа* на энергию шума [18, 47].

При постоянной битовой скорости сама скорость определяется режимом работы РРЛ и задаётся в качестве исходных данных для расчёта показателей качества. Однако, средняя скорость передачи за длительный период времени в данном режиме будет определяться устойчивостью (готовностью) функционирования РРЛ, которая определяется как вероятность того, что на протяжении длительного периода времени вероятность битовой ошибки $P_b(\gamma_s)$ не превысит некоторого допустимого предела $P_{b\text{доп}}$ [26]. Зная закон распределения случайной величины γ_s , средняя скорость передачи (бит/модуляционный символ) за длительный период определяется выражением [95, 143]:

$$B = L \cdot P(P_b(\gamma_s) \leq P_{b\text{доп}}) = L \cdot \int_{\gamma_{s\text{доп}}}^{\infty} f_{\gamma_b}(\gamma_s) d\gamma_s, \quad (2.6)$$

где $\gamma_{s\text{доп}}$ – символьное ОСШ, которое соответствует допустимой вероятности битовой ошибки $P_{b\text{доп}}$;

L – количество бит в одном модуляционном символе.

Общий подход к оценке канала с адаптивно изменяемой битовой скоростью передачи в условиях замираний путём нахождения вероятности битовой ошибки и пропускной способности существенно отличается от оценки канала с постоянной битовой скоростью. В ходе настоящей диссертационной работы был проведен анализ существующих методов по оценке канала с адаптивным переключением модуляции [3, 80, 92, 109, 110, 140, 141, 142, 143, 144]. Среди существующих на

сегодняшний день работ, своей фундаментальностью выделяется работа авторов *J. M. Torrance* и *L. Hanzo* [143], в которой предложен метод оценки вероятности битовой ошибки и пропускной способности для канала с адаптивной модуляцией в условиях релейских замираний.

Пропускная способность канала с адаптивной модуляционной схемой B_{adapt} оценивается с учётом всех уровней модуляции, действующих в канале с адаптацией, и рассчитывается по формуле [143]:

$$B_{adapt} = \sum_{i=1}^N B_{i-adapt} = \sum_{i=1}^N L_i \cdot \int_{SNR_i}^{SNR_{i+1}} f_{\gamma_{Fading}}(\gamma_s) d\gamma_s, \quad (2.7)$$

где i – перебор номеров уровней модуляции, используемых в системе с адаптивной модуляцией;

$L_i = \log_2 M_i$ – количество бит в модуляционном символе i -го уровня модуляции M_i -QAM;

$f_{\gamma_{Fading}}$ – плотность распределения вероятности случайной величины, характеризующая исследуемый канал;

SNR_i – порог переключения ОСШ на i -ю модуляционную схему;

Пропускная способность для каждой задействованной в системе модуляционной схемы в отдельности $B_{i-adapt} = L_i \cdot \int_{SNR_i}^{SNR_{i+1}} f_{\gamma_{Fading}}(\gamma_s) d\gamma_s$, где в качестве пределов интегрирования задаются пороги переключения ОСШ для заданной вероятности ошибки в канале АГБШ, представленные в таблице 2.3 (зелёным цветом отмечены модуляции квадратная формы, жёлтым – крестообразной).

Таблица 2.3 – Пороговые значения ОСШ для заданной вероятности ошибки

Модуляция	Пороговые значения ОСШ, дБ			
	$BER=3*10^{-3}$	$BER=10^{-3}$	$BER=10^{-6}$	$BER=10^{-9}$
<i>BPSK</i>	5,8	6,8	10,5	12,5
<i>QPSK</i>	8,8	9,8	13,5	15,5
<i>8-QAM</i>	12,3	13,3	13,7	19,2
<i>16-QAM</i>	15,4	16,5	20,4	22,4
<i>32-QAM</i>	18,5	19,5	23,5	25,6
<i>64-QAM</i>	21,4	22,5	26,5	28,6
<i>128-QAM</i>	24,4	25,5	29,5	31,7
<i>256-QAM</i>	27,2	28,4	32,6	34,7
<i>512-QAM</i>	30,1	31,3	35,5	37,7
<i>1024-QAM</i>	33,0	34,2	38,5	40,7
<i>2048-QAM</i>	35,9	37,2	41,5	43,7
<i>4096-QAM</i>	38,8	40,1	44,5	46,7

Необходимо дополнить, что согласно спецификациям *ETSI*, учёт эффективности кодирования рекомендуется проводить через оценку энергетического выигрыша [90]. В радиокadraх радиорелейной связи в соответствии со спецификациями *ETSI TR 103053* [90] применяется избыточное кодирование в виде кодов Рида-Соломона (200,190), (204,188), энергетический выигрыш для которых в среднем равен 3 дБ. В предложенной в диссертационной работе модели энергетический выигрыш от кодирования учитывается при определении пороговых значений ОСШ в системе с адаптивной модуляцией для различных уровней *QAM*. В таблице 2.4 представлены пороговые значения ОСШ при использовании кодов Рида-Соломона и требуемой битовой ошибки $BER=10^{-6}$.

Таблица 2.4 – Пороговые значения ОСШ для заданной вероятности ошибки $BER=10^{-6}$ и использовании кодов Рида-Соломона

Модуляция	Пороговые значения ОСШ, дБ		
	Без кода	RS 200,190	RS 204,188
BPSK	10,5	7,5	6,8
QPSK	13,5	10,5	9,8
8-QAM	13,7	15,5	13,3
16-QAM	20,4	17,2	16,5
32-QAM	23,5	20,4	19,7
64-QAM	26,5	23,4	22,7
128-QAM	29,5	26,3	25,6
256-QAM	32,6	29,3	28,6
512-QAM	35,5	32,1	31,4
1024-QAM	38,5	34,8	33,9

Зная пропускную способность B_{adapt} (2.7) и учитывая заданную (требуемую) вероятность битовой ошибки $BER_{задан}$, можно оценить общую вероятность ошибки канала с адаптивной модуляцией BER_{adapt} по формуле:

$$BER_{adapt} = B_{adapt}^{-1} \left(\sum_{i=1}^N L_i \cdot \int_{SNR_i}^{SNR_{i+1}} P_{b-AWGN_i}(\gamma_s) \cdot f_{\gamma_{Fading}}(\gamma_s) d\gamma_s \right), \quad (2.8)$$

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

Вероятность ошибки не всегда является адекватной характеристикой устойчивости радиорелейного канала с замираниями. На практике принято оценивать устойчивость РРЛ через показатель коэффициент неготовности, который представляет собой отношение длительности периода неготовности, вызванной отказом аппаратуры или неблагоприятным воздействием среды распространения радиосигнала, к общему времени наблюдения. При учёте только неблагоприятного воздействия среды распространения, коэффициент неготовности на интервале РРЛ без режима АМ (скорость передачи постоянная) представляет собой вероятность того, что ОСШ будет меньше заданного

порогового значения, которое определяется допустимой вероятностью битовой ошибки и запасом на замирания. В общем случае формула для расчёта коэффициента неготовности $K_{\text{НГ}}$ имеет вид:

$$K_{\text{НГ}} = \int_0^F f_{\gamma_{\text{Fading}}}(\gamma_s) d\gamma_s, \quad (2.9)$$

где F – запас на замирания в размах.

В интервалах РРЛ с АМ устойчивость на каждом i -м режиме будет разная, причём, чем более высокий уровень модуляции, тем устойчивость будет ниже. Формула для вычисления коэффициента неготовности интервала РРЛ с АМ, в котором поддерживается N режимов работы, имеет вид:

$$K_{\text{НГ}_{\text{adapt}}} = \begin{cases} \int_0^{F_{\text{SNR}_1}} f_{\gamma_{\text{Fading}}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{\text{SNR}_1} \\ \dots \\ \int_0^{F_{\text{SNR}_N}} f_{\gamma_{\text{Fading}}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{\text{SNR}_N} \end{cases}, \quad (2.10)$$

где F_{SNR_i} – пороговое значение запаса на замирания для i -го ($i = \overline{1, N}$) уровня работы интервала РРЛ с АМ;

F – текущий запас на замирания.

2.3 Математическая модель радиорелейного интервала с адаптивной модуляцией в условиях быстрых замираний

Зная BER для канала АГБШ, можно найти BER канала с характерными для него замираниями, используя в качестве функции $f_{\gamma_b}(\gamma)$ в формуле (2.5) функцию плотности вероятности случайной величины, соответствующую

присутствующим замираниям в канале. Для каналов мобильной связи, где необходим учёт многолучёвости, когда в большинстве случаев прямая видимость между базовой станцией (БС) и абонентским терминалом (АТ) отсутствует, в качестве функции плотности вероятности используется распределение Релея [94, 93]. Однако, это распределение не применимо для беспроводного канала РРЛ, в котором присутствует явный доминантный сигнал по причине наличия прямой видимости (*LOS, line-of-sight*) между РРС [100].

2.3.1 Модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в условиях райсовских замираний

В случае присутствия доминантной компоненты в канале РРЛ с прямой видимостью замирания сигнала достаточно хорошо описываются распределением Райса [37, 100, 101]. Огибающая сигнала в таком канале имеет вид:

$$z_{Rice}(t) = \sqrt{r_{I-Rice}^2(t) + r_{Q-Rice}^2(t)} \quad (2.11)$$

где случайные величины $r_{I-Rice}(t)$ и $r_{Q-Rice}(t)$ нецентрированы, т.е. не имеют нулевого математического ожидания.

Принято различать плотности вероятности распределения случайной величины в виде огибающей сигнала и в виде его мощности [47, 93].

Плотность вероятности распределения Райса $f_{z_{Rice}}$ случайной величины z_{Rice} в виде огибающей сигнала равна [47, 93, 47]:

$$f_{z_{Rice}}(z_{Rice}) = \frac{z_{Rice}}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{s^2 + z_{Rice}^2}{2\sigma^2}\right)} I_0\left(\frac{sz_{Rice}}{\sigma^2}\right) \quad (2.12)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;

z_{Rice}^2 – текущая мощность всего сигнала;

z_{Rice} – текущая амплитуда всего сигнала;

s^2 – средняя мощность компоненты прямой видимости;

s – средняя амплитуда компоненты прямой видимости;

$2\sigma^2$ – средняя мощность компонент, не относящихся к прямой видимости.

Применяя квадратичное преобразование [29] к огибающей сигнала, распределённой по закону Райса, можно получить плотность вероятности квадрата случайной величины в виде мощности сигнала z^2_{Rice} [47, 93, 18]:

$$f_{z^2_{Rice}}(z^2_{Rice}) = \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\left(\frac{s^2+z^2_{Rice}}{2\sigma^2}\right)} I_0\left(\frac{s z_{Rice}}{\sigma^2}\right) \quad (2.13)$$

Параметры в формулах (2.12) и (2.13) связаны друг с другом следующим образом. Сумма мощностей регулярной s^2 и случайной компонент сигнала $2\sigma^2$ является общей средней мощностью сигнала на приеме A (2.14). Отношение между мощностями этих компонент носит название коэффициента или фактора Райса k (2.15):

$$A = s^2 + 2\sigma^2 \quad (2.14)$$

$$k = \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (2.15)$$

Используя вышеприведённые соотношения, можно преобразовать плотности распределения вероятности мощности райсовского сигнала:

$$f_{z^2_{Rice}}(z^2_{Rice}) = \frac{1+k}{A} e^{-\left(k+\frac{(1+k)z^2_{Rice}}{A}\right)} I_0\left(2 \cdot z_{Rice} \sqrt{\frac{k(1+k)}{A}}\right) \quad (2.16)$$

Удобство преобразования (2.16) состоит в том, что от него можно перейти к выражению через символьное ОСШ:

$$f_{\gamma_{Rice}}(\gamma_s, \bar{\gamma}_s) = \frac{1+k}{\bar{\gamma}_s} e^{-\left(k + \frac{(1+k)\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}\right)} I_0 \left(2 \cdot \sqrt{\gamma_s} \sqrt{\frac{k(1+k)}{\bar{\gamma}_s}} \right) \quad (2.17)$$

где $\bar{\gamma}_s$ – среднее символьное ОСШ;

γ_s – текущее символьное ОСШ.

Используя плотность распределения вероятности Райса (2.17), можно найти вероятность замираний в канале РРЛ, которая представляет собой вероятность того, что символьное ОСШ γ_s будет меньше величины глубины замираний F :

$$P\left(\gamma_s < 10^{\frac{-F}{10}}\right) = \int_0^{10^{\frac{-F}{10}}} \frac{1+k}{\bar{\gamma}_s} e^{-\left(k + \frac{(1+k)\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}\right)} I_0 \left(2 \cdot \sqrt{\gamma_s} \sqrt{\frac{k(1+k)}{\bar{\gamma}_s}} \right) d\gamma_s \quad (2.18)$$

где F – глубина замираний (дБ);

k – фактор Райса.

Представленный в справочнике *ITU-R R-HDB-24* [100] график (рисунок 1.6) также приводит зависимость вероятности замираний в райсовском канале, но в отличие от (2.18) показывает зависимость не от фактора Райса k , а от коэффициента возникновения замираний r (равного 1; 0,1; 0,01; 0,001). Используя выражение (2.18) и значения r из графика 1.6, были подобраны значения фактора Райса k так, чтобы получить идентичный с рисунком 1.6 график (рисунок 2.5), с помощью чего можно найти соответствие между параметрами k и r :

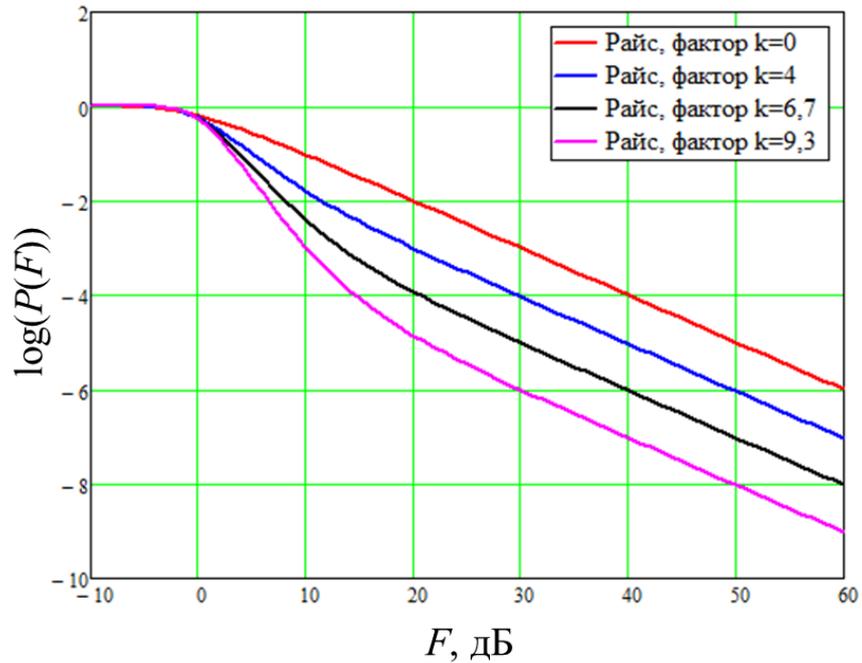


Рисунок 2.5 – Распределение вероятности запаса на замирания F в райсовском канале РРЛ при различных значениях фактора k

Таким образом, значения $r=1$; $r=0,1$; $r=0,01$; $r=0,001$ (рисунок 1.6) аналогичны значениям фактора $k=0$; $k=4$; $k=6,7$; $k=9,3$ соответственно (рисунок 2.5). При этом следует заметить, что при $k=0$ выражение (2.17) трансформируется в плотность распределение вероятностей квадрата рэлеевской случайной величины.

Сопоставив значения параметров r и k , можно вывести формулу зависимости между ними (рисунок 2.6):

$$k = -3,2 \log(r) \quad (2.19)$$

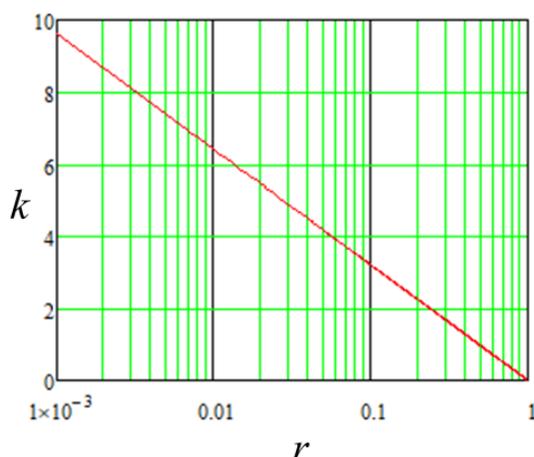


Рисунок 2.6 – Графическое представление зависимости между r и k

В дальнейших расчётах использован фактор k распределения Райса в полученных порядках: 0-20.

Плотность распределения вероятности ОСШ в канале РРЛ (2.17) теперь можно использовать для нахождения вероятности битовой ошибки [68], подставив его в (2.5):

$$\begin{aligned}
 BER_{Rice} &= \int_0^{\infty} P_b(\gamma_s) f_{\gamma_{Rice}}(\gamma_s, \bar{\gamma}_s) d\gamma_s = \\
 &= \int_0^{\infty} P_b(\gamma_s) \cdot \frac{1+k}{\bar{\gamma}_s} e^{-\left(k + \frac{(1+k)\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}\right)} I_0\left(2 \cdot \sqrt{\frac{k(1+k)\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}}\right) d\gamma_s
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Результаты соответствующих (2.20) расчётов вероятности битовой ошибки в условиях замираний, характерных для беспроводного РРЛ канала, приведены на рисунках 2.7 – 2.9 для различных значений k -фактора: 5; 10; 15 соответственно. Для анализа отличий на рисунках отображены вероятности битовой ошибки в канале АБГШ (*AWGN, Additive White Gaussian Noise*) и в райсовском канале (*Rice*). При значении $k=0$ распределение Райса вырождается в распределение Рэлея, что говорит об отсутствии доминантного сигнала в обоих случаях. При росте значения k кривые стремятся к соответствующим кривым канала АБГШ, это соответствует увеличению доминантной составляющей сигнала прямой видимости и тем самым улучшению помехоустойчивости канала.

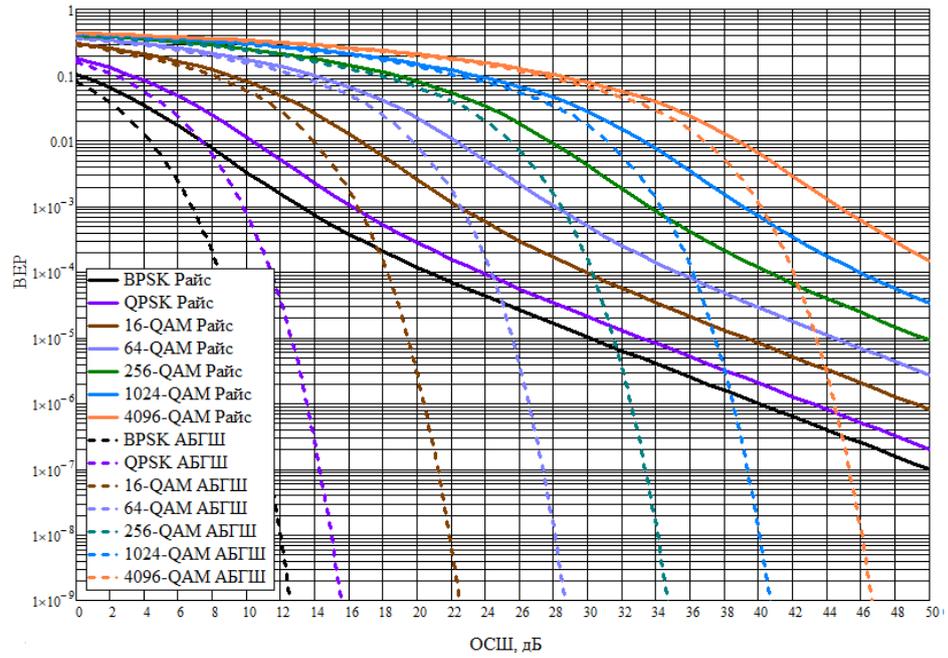


Рисунок 2.7 – Вероятности битовой ошибки в райсовском канале при значении $k=5$ и канале АБГШ

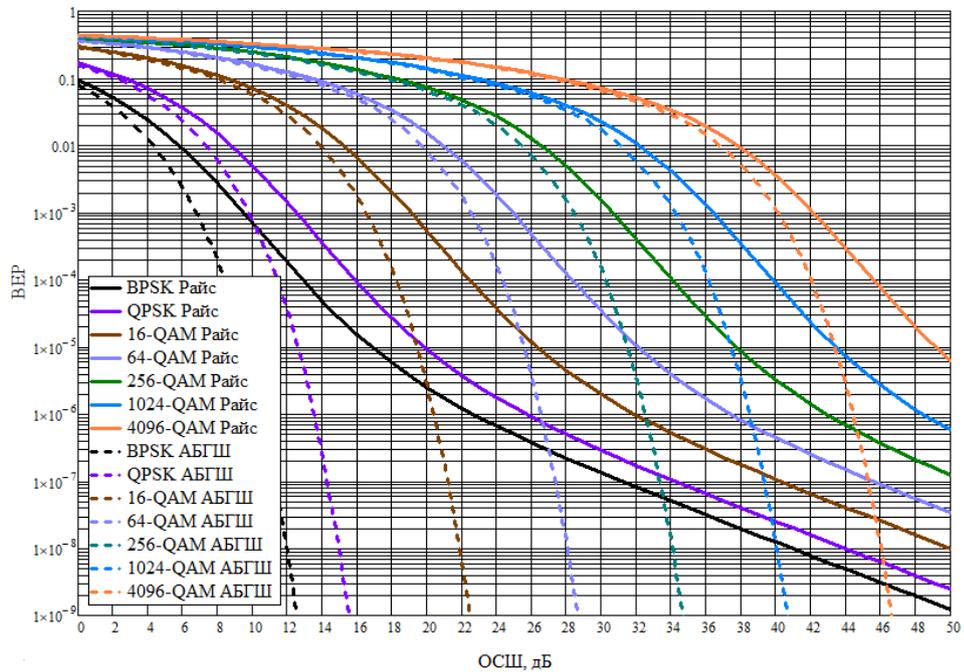


Рисунок 2.8 – Вероятности битовой ошибки в райсовском канале при значении $k=10$ и канале АБГШ

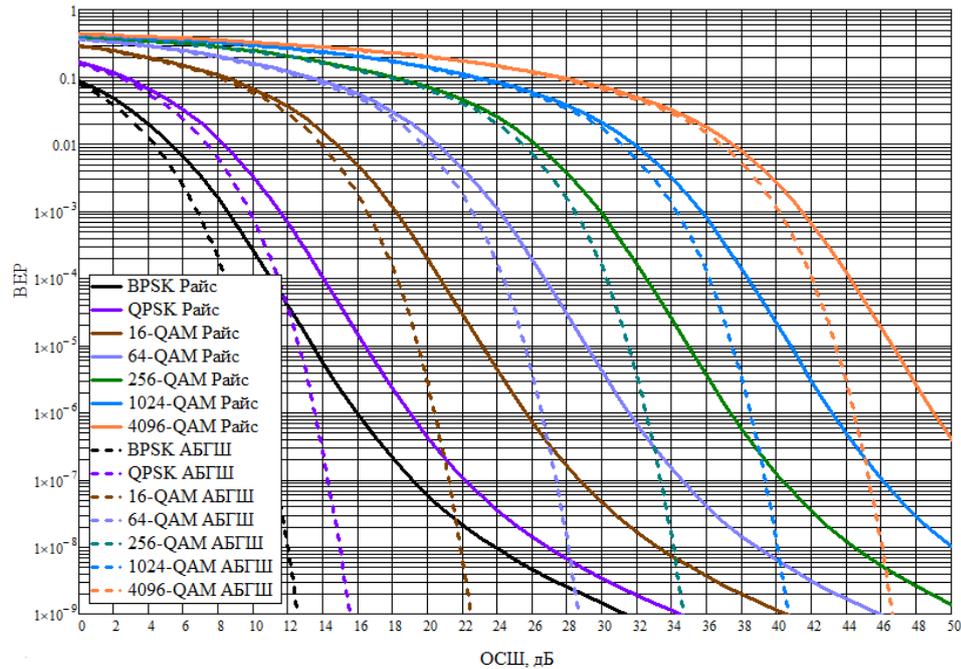


Рисунок 2.9 – Вероятности битовой ошибки в райсовском канале при значении $k=15$ и канале АБГШ

Результаты расчёта в виде графиков зависимости средней скорости передачи (бит/символ) от ОСШ для видов модуляции *BPSK*, *QPSK*, *16-QAM*, *64-QAM*, *256-QAM*, *1024-QAM* и *4096-QAM* и допустимой вероятности ошибки не более 10^{-6} в канале с замираниями Райса при разных значениях k -фактора представлены на рисунке 2.10. В случае, когда $k=0$ (канал с замираниями Рэлея) и ОСШ равно 30 дБ и более, средняя скорость будет равна технической, т.е. заданной в качестве исходных данных, только для модуляций *BPSK* и *QPSK*. На остальных видах модуляции заданная скорость не будет достигнута по причине недостаточной устойчивости даже при ОСШ равно 30 дБ. В канале с замираниями Райса, когда значение k -фактора равно 5, 10 и 15, заданная скорость будет достигнута на всех видах модуляции при значениях ОСШ равным, соответственно, 56, 52 и 50 дБ. Следовательно, для достижения заданной скорости передачи для уровня модуляции *4096-QAM* и допустимой вероятности ошибки не более 10^{-6} на интервалах с фиксированными режимами работы ОСШ должно быть не менее 56 дБ.

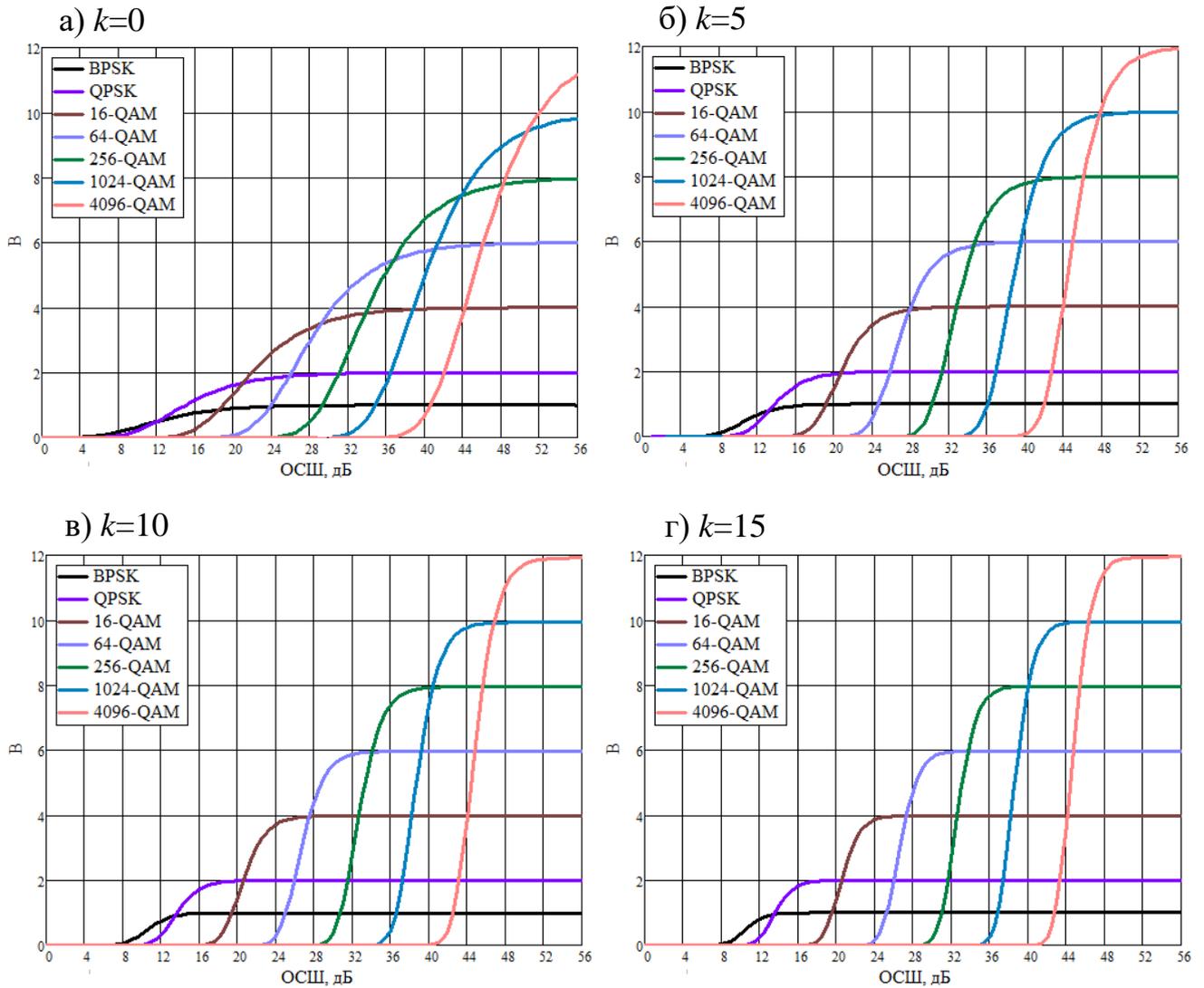


Рисунок 2.10 – Средняя скорость передачи (бит/символ) в канале с замираниями Райса при разных значениях k -фактора для $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

Расчёт пропускной способности интервала РРЛ с АМ в битах/символ для условий быстрых замираний по распределению Райса имеет вид:

$$B_{\text{adapt}} = \sum_{i=1}^N L_i \cdot \int_{SNR_i}^{SNR_{i+1}} \frac{1+k}{\bar{\gamma}_s} e^{-\left(k + \frac{(1+k)\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}\right)} I_0 \left(2 \cdot \sqrt{\frac{k(1+k)\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}} \right) d\gamma_s \quad (2.21)$$

Вероятность битовой ошибки в режиме адаптивной модуляции в канале с замираниями Райса рассчитывается по формуле:

$$BER_{adapt} = B_{adapt}^{-1} \left(\sum_{i=1}^N L_i \cdot \int_{SNR_i}^{SNR_{i+1}} P_{b-AWGN_i}(\gamma_s) \cdot f_{\gamma_{Rice}}(\gamma_s, \bar{\gamma}_s) d\gamma_s \right) \quad (2.22)$$

где

$$f_{\gamma_{Rice}}(\gamma_s, \bar{\gamma}_s) = \frac{1+k}{\bar{\gamma}_s} e^{-\left(k + \frac{(1+k)\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}\right)} I_0 \left(2 \cdot \sqrt{\frac{k(1+k)\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}} \right) \quad (2.23)$$

Результаты расчёта пропускной способности B_{adapt} и битовой вероятности ошибки BER_{adapt} для интервала РРЛ с АМ и интервалов с фиксированными режимами модуляции представлены на рисунках 2.11 – 2.13.

Красная жирная кривая отражает результат расчёта вероятности ошибок BER_{adapt} для РРЛ с АМ (BER_{AM}), в данном случае РРЛ с АМ работает на модуляциях от $BPSK$ до $4096-QAM$ (их отдельные вероятности ошибок обозначены тонкими цветными линиями). Значения вероятностей ошибок отмечены на вертикальной левой оси ординат, по горизонтальной оси абсцисс отложены значения ОСШ. Линия BER_{adapt} , рассчитанная по формуле (2.22), имеет волнообразную форму: при росте ОСШ и уменьшении вероятности ошибки канал становится лучше и наблюдается локальный минимум кривой, который означает, что система с АМ может переключиться на более высокий уровень модуляции.

Бирюзовая жирная кривая отражает результат расчёта пропускной способности B_{adapt} для РРЛ с АМ, значения которой отмечены на вертикальной правой оси ординат в зависимости от ОСШ. Линия B_{adapt} , рассчитанная по формуле (2.21), имеет ступенчатую форму: по мере увеличения ОСШ возрастает пропускная способность, вблизи каждого уровня модуляции канал стабилизируется, а изменения пропускной способности замедляется – графически этот эффект наблюдается в форме «полочки».

Таким образом, с помощью предложенного расчёта можно определить, при каких условиях в канале можно достичь определённой вероятности ошибок, пропускной способности и при каких значениях ОСШ можно переключить уровень модуляции в канале РРЛ с АМ для случая «точка-точка».

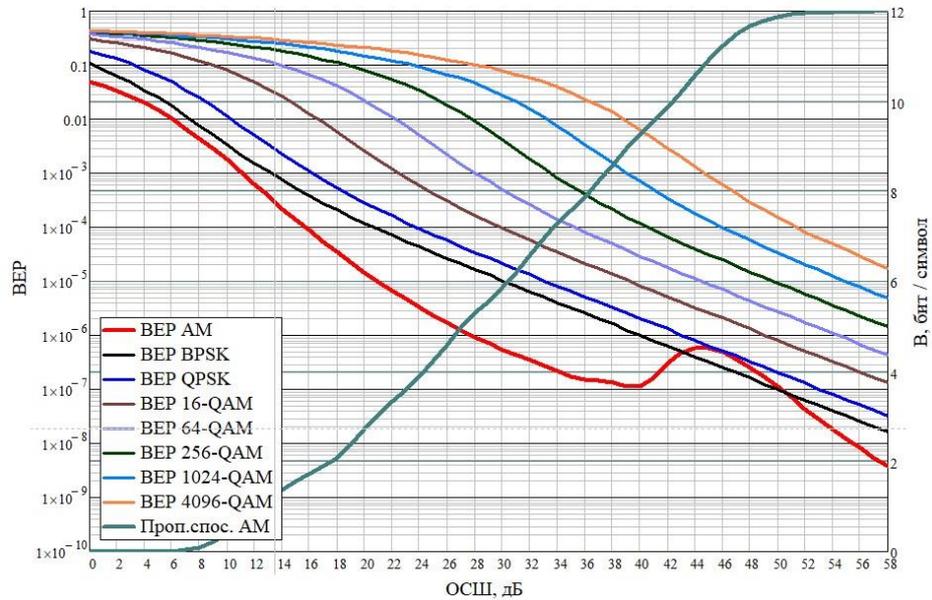


Рисунок 2.11 – Вероятность битовой ошибки и средняя скорость передачи (бит/символ) в канале РРЛ с АМ и замираниями Райса при значении $k=5$ для $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

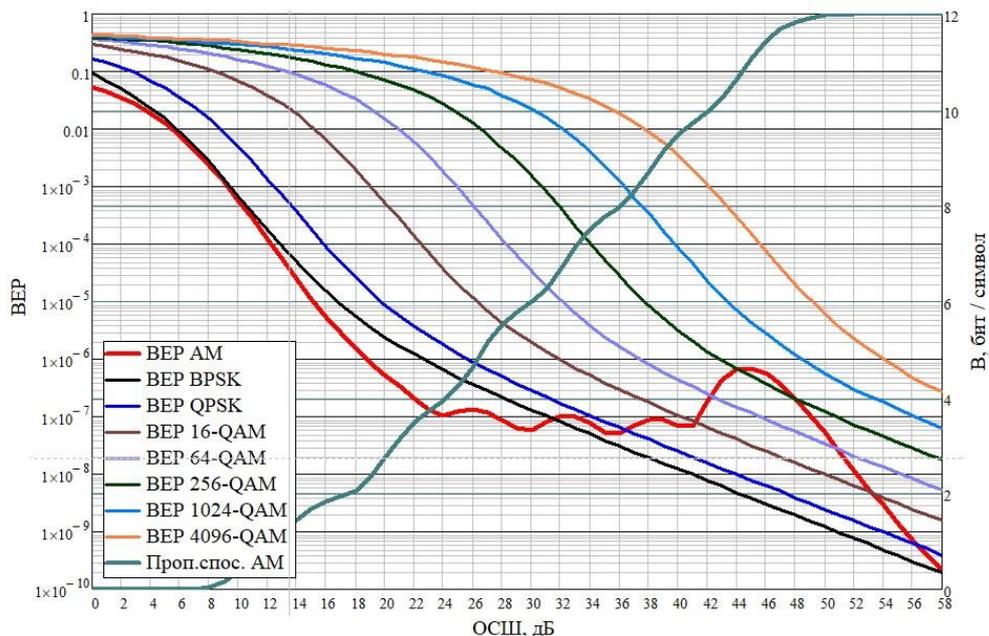


Рисунок 2.12 – Вероятность битовой ошибки и средняя скорость передачи (бит/символ) в канале РРЛ с АМ и замираниями Райса при значении $k=10$ для $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

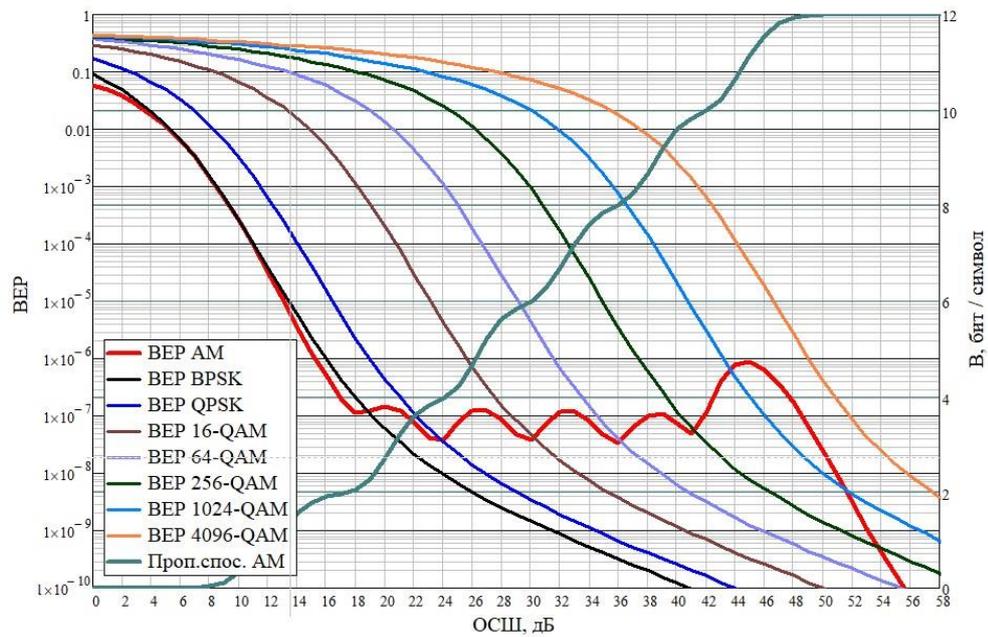


Рисунок 2.13 – Вероятность битовой ошибки и средняя скорость передачи (бит/символ) в канале РРЛ с АМ и замираниями Райса при значении $k=15$ для $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

Устойчивость РРЛ с АМ в условиях замираний Райса предлагается рассчитывать по формуле:

$$\text{Кнг}_{\text{adapt_Rice}} = \begin{cases} \int_0^{F_{SNR_1}} f_{\gamma_{\text{Rice}}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{SNR_1} \\ \dots \\ \int_0^{F_{SNR_{i+1}}} f_{\gamma_{\text{Rice}}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{SNR_{i+1}} \end{cases} \quad (2.24)$$

Результаты расчёта устойчивости (Кнг) интервала РРЛ с АМ и интервалов с фиксированными режимами модуляции при разных значениях k -фактора распределения Райса представлены на рисунках 2.14 – 2.15. Требуемое значение $\text{Кнг}_{\text{треб}}=0,0005$ отмечено красной пунктирной линией. График рассчитанного для интервала РРЛ с АМ Кнг показан жирной зелёной кривой, которая имеет пилообразную форму. График позволяет определить, какого запаса на замирания необходимо придерживаться для каждого уровня модуляции, чтобы не выйти за

пределы разрешённого $K_{нг_треб}$.

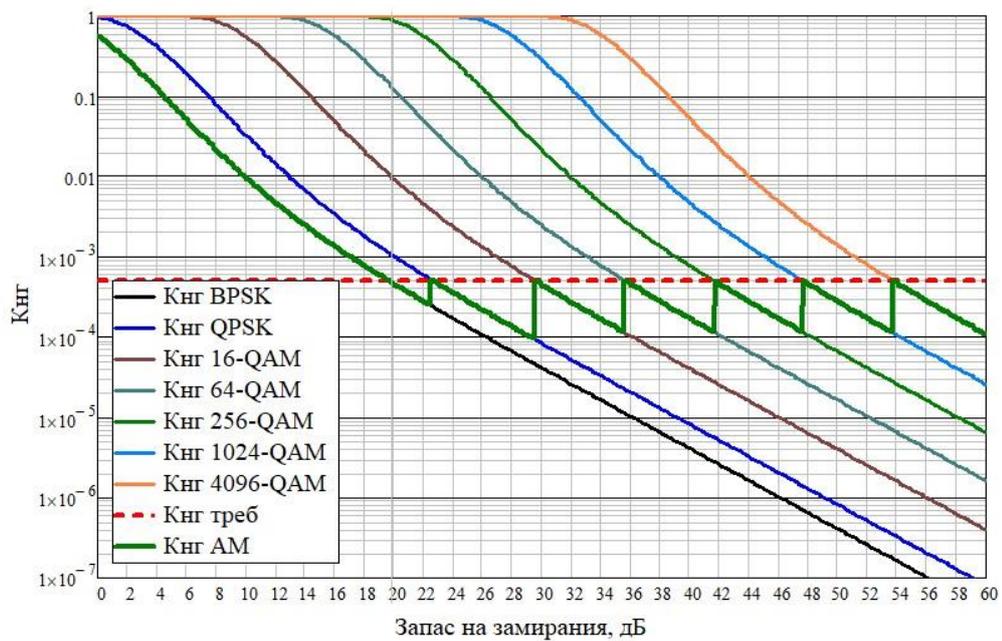


Рисунок 2.14 – Неготовность интервала РРЛ с АМ и замираниями Райса при значении $k=5$ для $BER_{треб} = 10^{-6}$

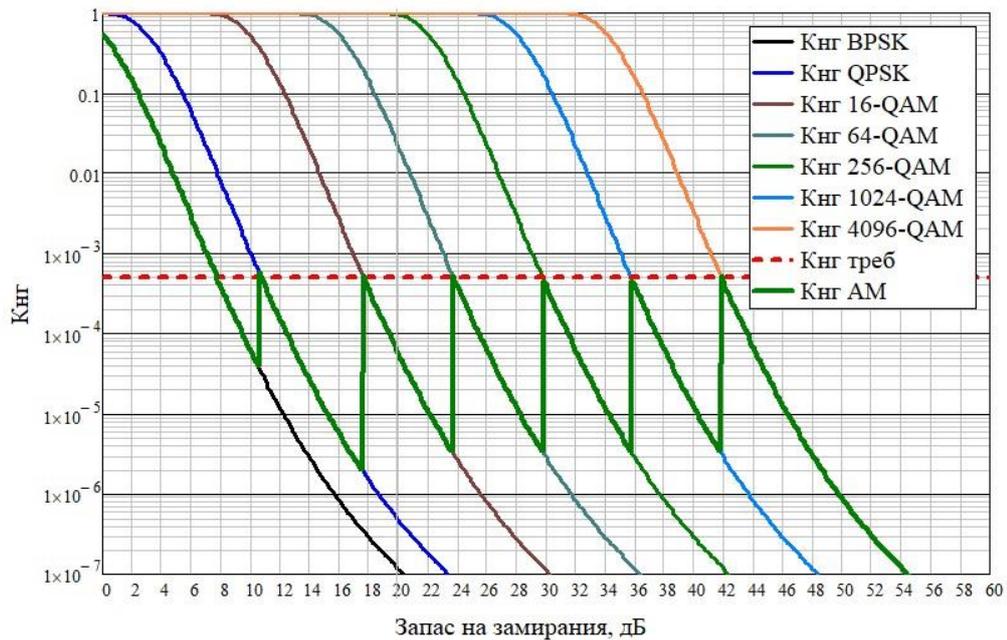


Рисунок 2.15 – Неготовность интервала РРЛ с АМ и замираниями Райса при значении $k=15$ для $BER_{треб} = 10^{-6}$

Таким образом, предложенная модель радиорелейного интервала с переменной битовой скоростью передачи в условиях быстрых замираний, аппроксимируемых законом распределением вероятности Райса, характерна для беспроводного канала РРЛ типа «точка-точка» и позволяет оценить его

помехоустойчивость по показателю вероятности битовой ошибки, пропускную способность (бит/модуляционный символ) и коэффициент неготовности для высоких уровней адаптивной модуляции *A-QAM*.

2.3.2 Модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в условиях замираний Накагами

Как отмечалось ранее, распределение *m*-Накагами достаточно хорошо описывает замирания сигналов в системах радиорелейной связи типа «точка-многоточка» (РМР), когда присутствует несколько доминирующих сигналов. В общем виде, плотность вероятности распределения *m*-Накагами $f_{z_{Nkg}}$ огибающей сигнала z_{Nkg} равна [26, 47, 93, 113]:

$$f_{z_{Nkg}}(z_{Nkg}) = 2 \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \frac{z_{Nkg}^{2m-1}}{\Gamma(m)} e^{-\left(m \frac{z_{Nkg}^2}{\Omega}\right)} \quad (2.25)$$

где $\Omega = E(z_{Nkg}^2)$ – средняя мощность сигнала на входе приёмника;

m – параметр замираний Накагами, которые может принимать значения

$$m \geq \frac{1}{2};$$

$\Gamma(m)$ – гамма функция.

Применяя квадратичное преобразование [29] к огибающей сигнала, распределённой по закону *m*-Накагами, можно получить плотность вероятности $f_{\gamma_{Nkg}}$ квадрата случайной величины в виде мощности сигнала z_{Nkg}^2 , которую можно обозначить как ОСШ γ_s [80, 92, 97]:

$$f_{\gamma_{Nkg}}(\gamma_s, \bar{\gamma}_s) = \left(\frac{m}{\bar{\gamma}_s}\right)^m \frac{\gamma_s^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-m \frac{\gamma_s}{\bar{\gamma}_s}} \quad (2.26)$$

где γ_s – текущее ОСШ;

$\bar{\gamma}_s$ – среднее ОСШ.

Расчёт пропускной способности интервала РРЛ с АМ в битах/символ для условий быстрых замираний m-Накагами имеет вид:

$$B_{adapt} = \sum_{i=1}^N L_i \cdot \int_{SNR_i}^{SNR_{i+1}} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}_s}\right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-m\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_s}} d\gamma_s \quad (2.27)$$

Вероятность битовой ошибки в режиме адаптивной модуляции в канале с замираниями Накагами рассчитывается по формуле:

$$BER_{adapt} = B_{adapt}^{-1} \left(\sum_{i=1}^N L_i \cdot \int_{SNR_i}^{SNR_{i+1}} P_{b-AWGN_i}(\gamma_s) \cdot f_{\gamma_{Nkg}}(\gamma_s, \bar{\gamma}_s) d\gamma_s \right) \quad (2.28)$$

Результаты расчёта пропускной способности B_{adapt} и битовой вероятности ошибок BER_{adapt} для интервала РРЛ с АМ и интервалов с фиксированными режимами модуляции представлены на рисунках 2.16 – 2.18.

Красная жирная кривая отражает результат расчёта вероятности ошибок BER_{adapt} для РРЛ с АМ (BER_{AM}), в данном случае РРЛ с АМ работает на модуляциях от $BPSK$ до $4096-QAM$ (их отдельные вероятности ошибок обозначены тонкими цветными линиями). Значения вероятностей ошибок отмечены на вертикальной левой оси, по горизонтальной оси отложены значения ОСШ. Линия BER_{adapt} , рассчитанная по формуле (2.28), имеет волнообразную форму: при росте ОСШ и уменьшении вероятности ошибки канал становится лучше и наблюдается локальный минимум кривой, который означает, что система с АМ может переключиться на более высокую модуляцию.

Бирюзовая жирная кривая отражает результат расчёта пропускной способности B_{adapt} для РРЛ с АМ, значения которой отмечены на вертикальной правой оси в зависимости от ОСШ. Линия B_{adapt} , рассчитанная по формуле (2.27), имеет ступенчатую форму: по мере увеличения ОСШ возрастает пропускная способность, вблизи каждого уровня модуляции канал стабилизируется, а

изменения пропускной способности замедляется – графически этот эффект наблюдается в форме полочки.

Таким образом, с помощью предложенного расчёта можно определить, при каких условиях в канале можно достичь определённой вероятности ошибок, пропускной способности и при каких значениях ОСШ можно переключить уровень модуляции в канале РРЛ с АМ для случая «точка-многоточка».

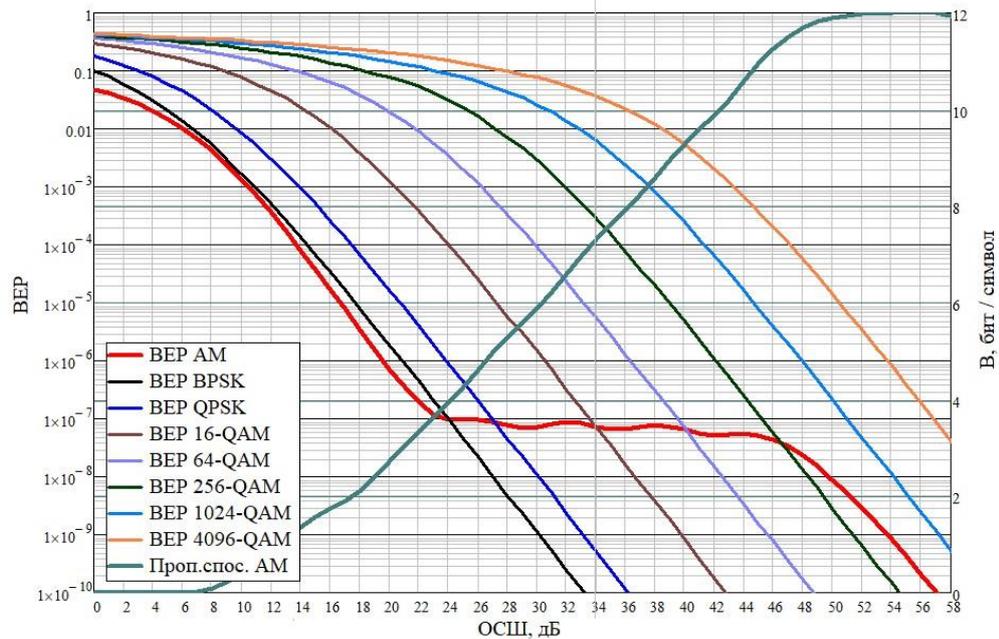


Рисунок 2.16 – Вероятность битовой ошибки и средняя скорость передачи (бит/символ) в канале РРЛ с АМ и замираниями m -Накагами при значении $m=3,273$

$$\text{для } BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$$

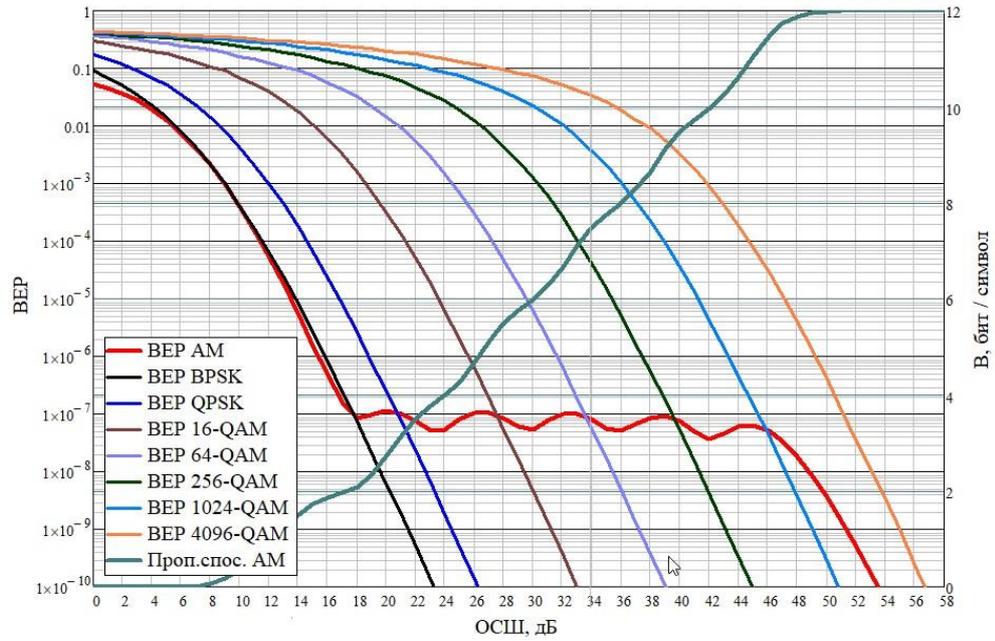


Рисунок 2.17 – Вероятность битовой ошибки и средняя скорость передачи (бит/символ) в канале РРЛ с АМ и замираниями m -Накагами при значении $m=5,763$ для $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

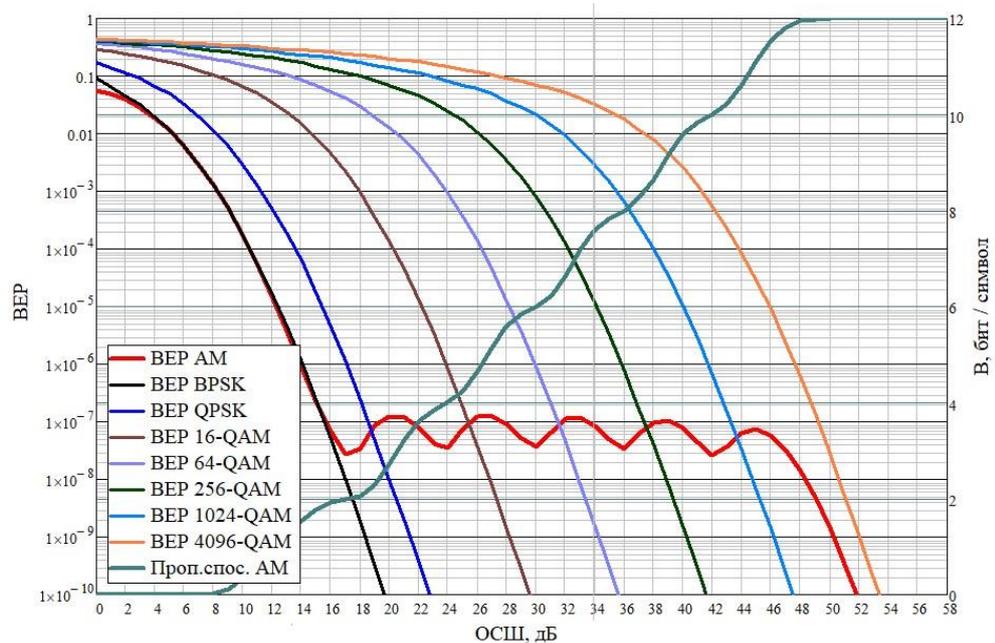


Рисунок 2.18 – Вероятность битовой ошибки и средняя скорость передачи (бит/символ) в канале РРЛ с АМ и замираниями m -Накагами при значении $m=8,258$ для $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

Устойчивость РРЛ с АМ в условиях замираний Накагами предлагается рассчитывать по формуле:

$$K_{\text{нг}}^{\text{adapt_Nkg}} = \begin{cases} \int_0^{F_{\text{SNR}_1}} f_{\gamma_{\text{Nkg}}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{\text{SNR}_1} \\ \dots \\ \int_0^{F_{\text{SNR}_{i+1}}} f_{\gamma_{\text{Nkg}}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{\text{SNR}_{i+1}} \end{cases} \quad (2.29)$$

Результаты расчёта устойчивости ($K_{\text{нг}}$) интервала РРЛ с АМ и интервалов с фиксированными режимами модуляции при разных значениях параметра m распределения Накагами представлены на рисунках 2.19 – 2.20. Требуемое значение $K_{\text{нг_треб}}$ отмечено красной пунктирной линией. График рассчитанного для интервала РРЛ с АМ $K_{\text{нг}}$ показан жирной зелёной кривой, которая имеет пилообразную форму. График позволяет определить, какого запаса на замирания необходимо придерживаться для каждого уровня модуляции, чтобы не выйти за пределы разрешённого $K_{\text{нг_треб}}$.

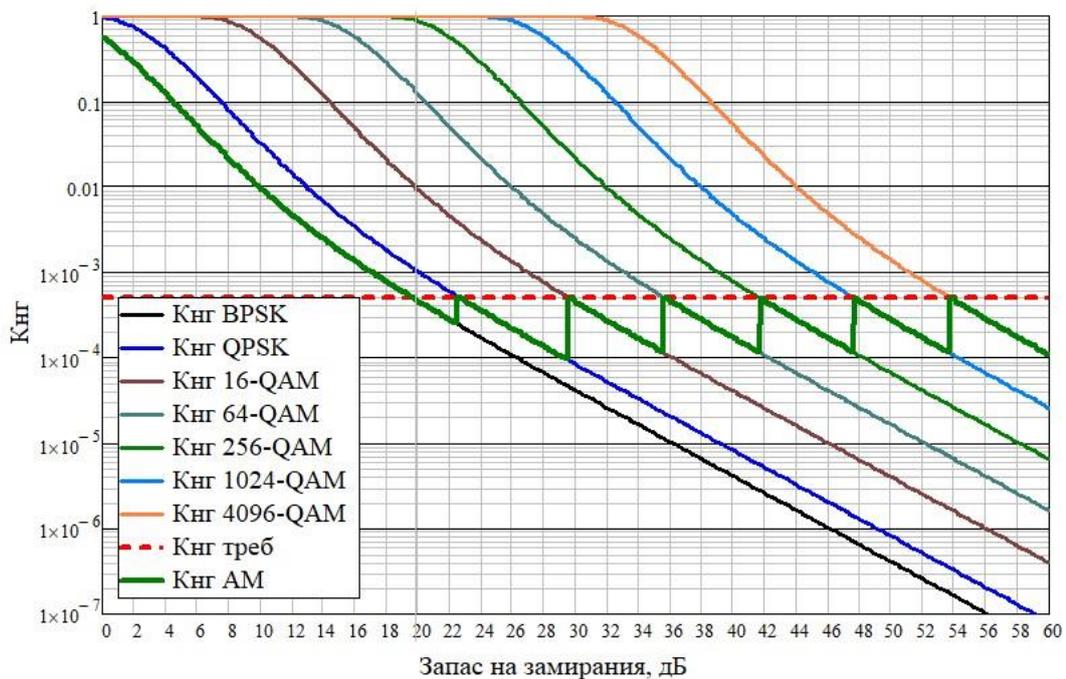


Рисунок 2.19 – Неготовность интервала РРЛ с АМ и замираниями m -Накагами при значении $m=3,273$ для $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

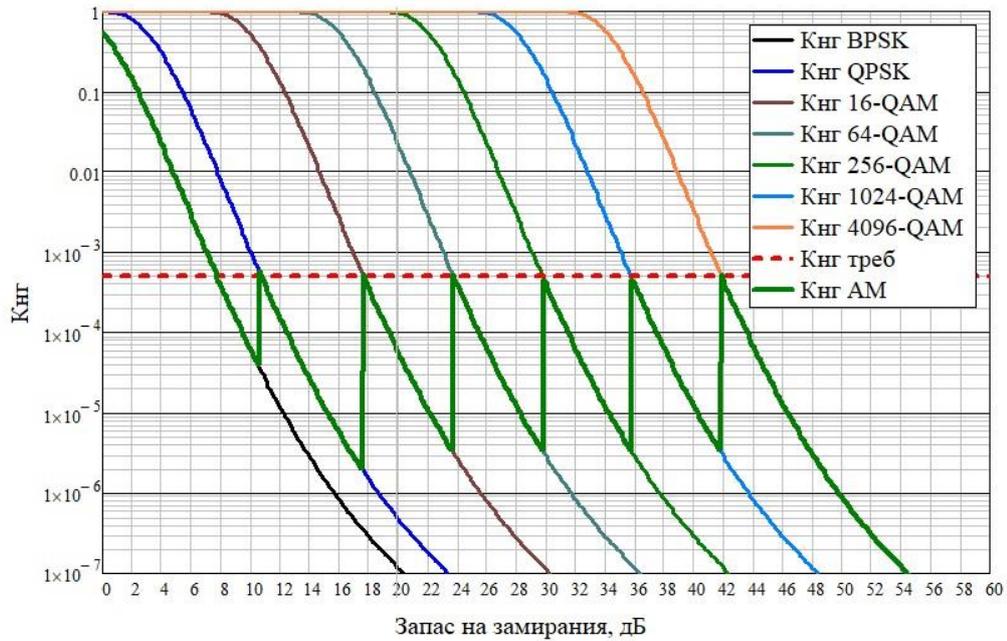


Рисунок 2.20 – Неготовность интервала РРЛ с АМ и замираниями m -Накагами при значении $m=5,763$ для $BER_{\text{треб}} = 10^{-6}$

Таким образом, предложенная модель интервала РРЛ с АМ в условиях замираний, аппроксимируемых распределением вероятностей Накагами, что характерно для беспроводного канала РРЛ типа «точка-многоточка», позволяет оценить помехоустойчивость по показателю вероятности битовой ошибки и пропускную способность по показателю средней скорости передачи (бит/модуляционный символ), а также неготовность интервала РРЛ в условиях быстрых замираний для высоких уровней адаптивной модуляции A -QAM.

2.4 Математическая модель радиорелейного интервала с адаптивной модуляцией в условиях медленных замираний

Наряду с быстрыми замираниями сигнал подвержен воздействию метеорологических условий, вызывающих медленные замирания. Существуют экспериментальные данные, показывающие, что медленные замирания подчиняются логарифмически нормальному закону распределения [16]. Плотность распределения вероятности по лог-нормальному закону $f_{\gamma_{\log\text{-norm}}}$, где в роли случайной величины $\gamma_{\log\text{-norm}}$ выступает текущее ОСШ γ , равна [47, 93, 113]:

$$f_{\gamma_{log-norm}} = \frac{10}{\ln(10)\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot \gamma} \cdot e^{-\left(\frac{(10 \log(\gamma) - \gamma_0)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2.30)$$

где γ – текущее ОСШ в размах;

γ_0 – среднее ОСШ в дБ;

σ – СКО от ОСШ в дБ.

Следует отметить, что текущее ОСШ γ в плотности вероятности лог-нормального распределения (2.30) также присутствует и в плотностях вероятности, характеризующих быстрые замирания в РРЛ $f_{\gamma_{Rice}}(\gamma_s, \bar{\gamma}_s)$ (2.17) и $f_{\gamma_{Nkg}}(\gamma_s, \bar{\gamma}_s)$ (2.26), но в своём усреднённом виде $\bar{\gamma}_s$.

Устойчивость РРЛ с АМ в условиях медленных замираний предлагается рассчитывать по формуле:

$$КНГ_{adapt_log-norm} = \begin{cases} \int_0^{F_{SNR_1}} f_{\gamma_{log-norm}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{SNR_1} \\ \dots \\ \int_0^{F_{SNR_{i+1}}} f_{\gamma_{log-norm}}(\gamma_s) d\gamma_s, & \text{если } F < F_{SNR_{i+1}} \end{cases} \quad (2.31)$$

Результаты расчёта устойчивости (Кнг) интервала РРЛ с АМ и интервалов с фиксированными режимами модуляции в условиях медленных замираний при разных значениях распределения σ представлены на рисунках 2.21 – 2.22.

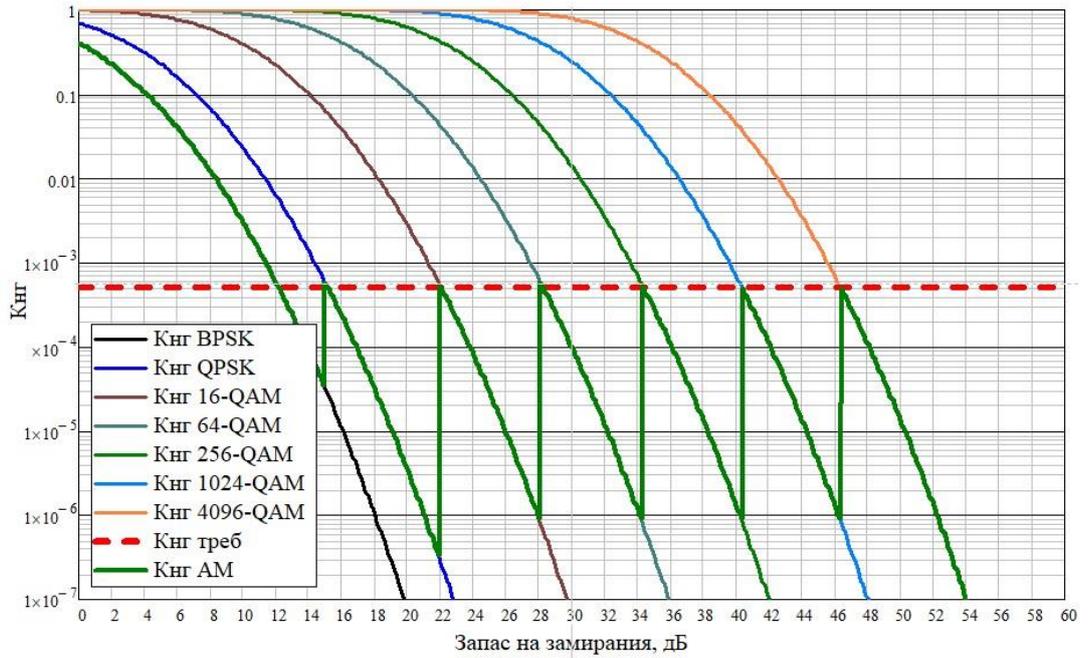


Рисунок 2.21 – Неготовность интервала РРЛ с АМ с медленными замираниями при значении $\sigma=4$ для $BER_{треб} = 10^{-6}$

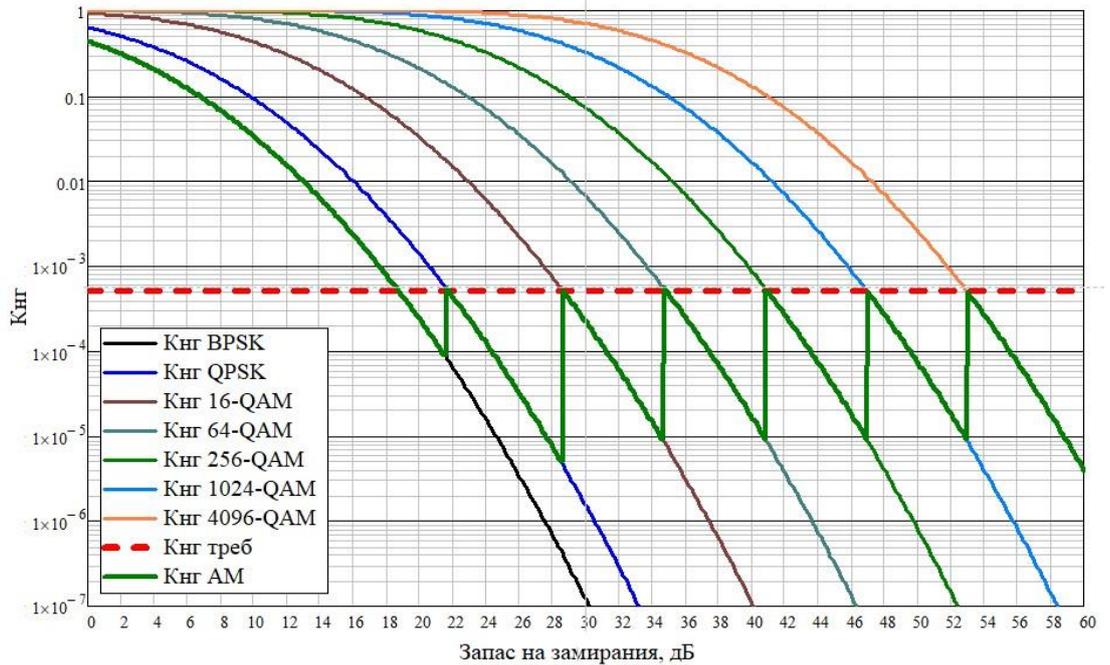


Рисунок 2.22 – Неготовность интервала РРЛ с АМ с медленными замираниями при значении $\sigma=6$

Требуемое значение $K_{нг_треб}$ отмечено красной пунктирной линией. График рассчитанного для интервала РРЛ с АМ $K_{нг}$ показан жирной зелёной кривой, которая имеет пилообразную форму. График позволяет определить, какого запаса

на замирания необходимо придерживаться для каждой модуляции, чтобы не выйти за пределы разрешённого $K_{нг_треб}$ в случае медленных замираний.

Таким образом, предложенная модель интервала РРЛ с АМ в условиях медленных замираний, аппроксимируемых распределением вероятностей по лог-нормальному закону.

2.5 Выводы по второму разделу

1. Показано, что временем реакции на переключение модуляции в РРЛ с АМ можно пренебречь, так как в условиях замираний с максимальной (встречающейся на практике) скоростью изменения их глубины 100 дБ/с величина изменения мощности сигнала на входе приёмника составляет не более 0,51 дБ за максимальное время реакции 5,1 мс для диапазона *Common-band* и не более 0,12 дБ за максимальное время реакции 1,2 мс для диапазона *E-band*, что намного меньше минимальной разницы (3 дБ) между соседними порогами переключения модуляции.

2. Разработанная модель включает зависимости пропускной способности от функции распределения вероятности 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, который совмещает в себе передачу непрерывного и прерывистого типов трафика в РРЛ с АМ.

3. При выполнении экспериментальных вычислений устойчивости и пропускной способности РРЛ с АМ в условиях замираний с предполагаемым распределением Райса были определены типовые значения k -фактора для типовых каналов радиорелейной связи, характеризуемых в рекомендациях МСЭ вероятностями замираний r . В частности, выяснилось, что типовым значениям k -фактора, равным $k=4$; $k=6,7$; $k=9,3$, соответствуют вероятности замираний $r=0,1$; $r=0,01$; $r=0,001$.

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

5. Разработанная модель включает зависимости 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 адаптивной модуляцией, включающей *BPSK-QPSK-MQAM*, в условиях быстрых замираний. Результирующее значение *BER* с адаптивной модуляцией не выходит за пороги требуемого значения ОСШ, что подтверждает корректность разработанной математической модели.

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

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

3. МЕТОД РАСЧЁТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ ЛИНИИ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ С УЧЁТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

В соответствии с общей постановкой задачи, сформулированной в подразделе 1.4, в настоящем разделе описывается разработанный метод расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне, основанный на математической модели радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, которая была рассмотрена в предыдущем разделе 2.

В подразделе 3.1 рассмотрены особенности распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне. В подразделе 3.2 приведён анализ статистических данных о влиянии метеоусловий на замирания сигналов на интервалах РРЛ с АМ в диапазоне *E-band* в общем случае (пункт 3.2.1) и в условиях влияния метеоусловий (пункт 3.2.2). Сравнение результатов измерений с результатами расчёта устойчивости и пропускной способности известными методами представлено в подразделе 3.3. Обоснование предлагаемого метода расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне приведено в подразделе 3.4.

Материал настоящего раздела нашёл отражение в публикациях [69, 71].

3.1 Особенности распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне

Существует несколько факторов, влияющих на условия распространения миллиметровых волн. Наиболее значительное затухание сигнала миллиметрового диапазона вызывают гидрометеоры в виде дождя, града, снега, тумана, облаков и т.д. [16, 22]. Также миллиметровые волны претерпевают сильное воздействие от затуханий в газах [16, 22].

Для того, чтобы наглядно исследовать физические свойства нововведённых в 5G миллиметровых диапазонов, в ходе работы были проведены расчёты их затуханий в атмосферных газах и дождях различной интенсивности. На языке программирования *MATLAB* была написана программа расчёта, соответствующая методам Рекомендаций *ITU-R* [121, 122]. Результаты расчётов для затуханий в атмосферных газах при температуре 15°C и влажности $7,3 \text{ г/м}^3$ показаны на рисунке 3.1. Результаты расчётов для затуханий в дождях изображены на рисунке 3.2.

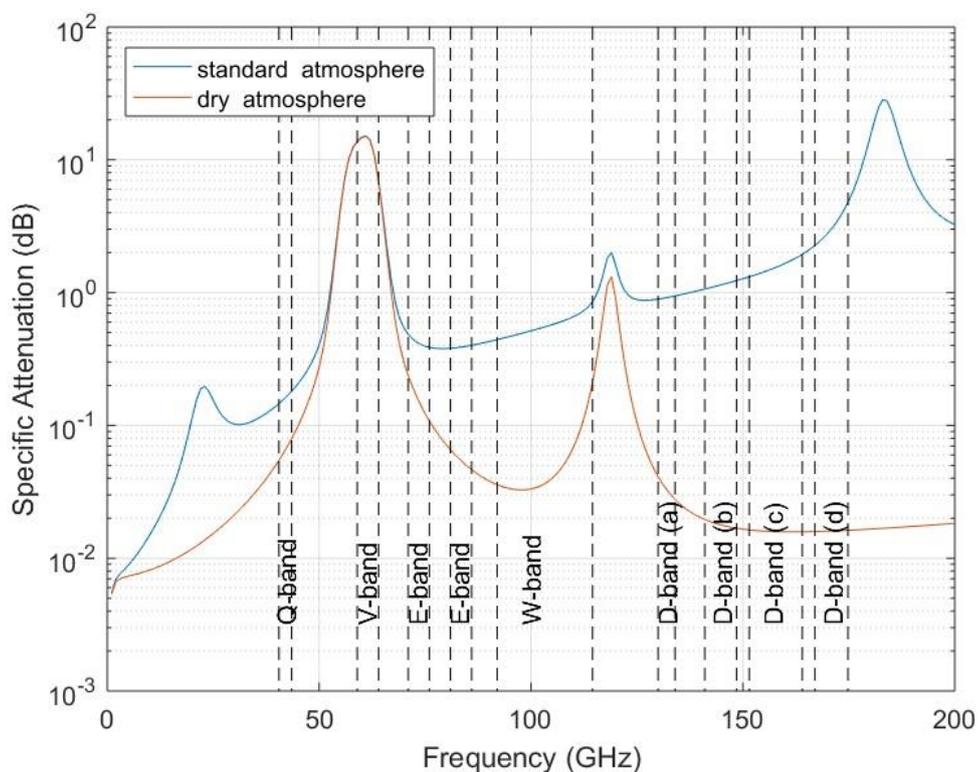


Рисунок 3.1 – Атмосферные затухания в характерных для 5G диапазонах

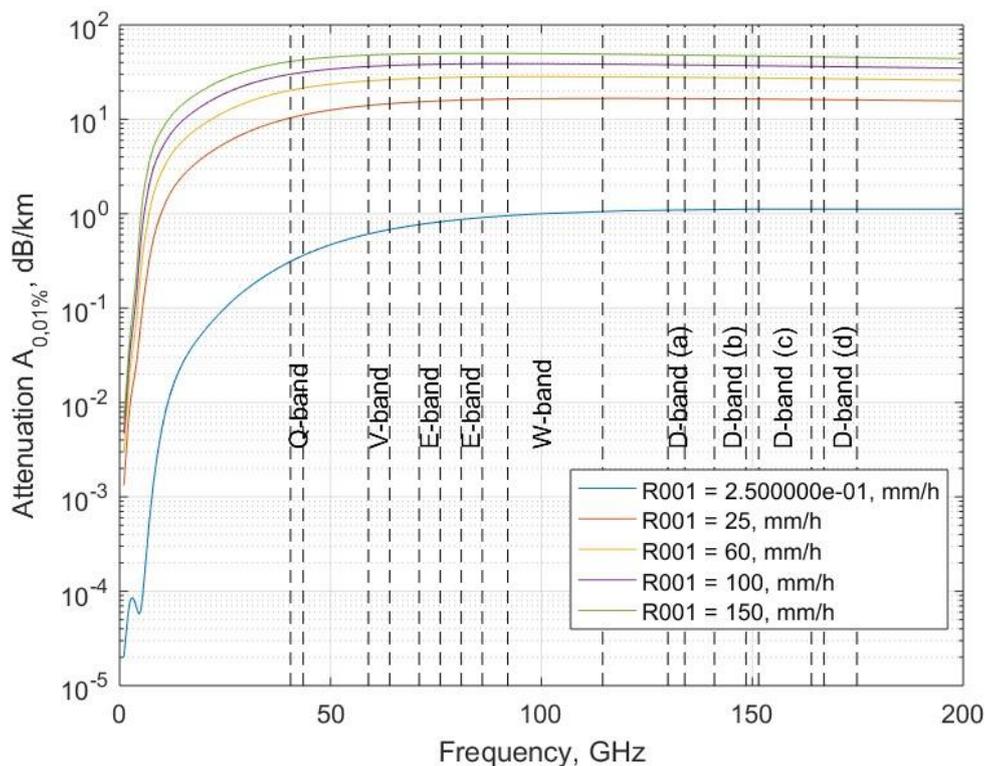


Рисунок 3.2 – Характерные для 5G диапазоны затухания в дождях различной интенсивности

Штриховыми линиями на рисунках отмечены нововведённые диапазоны 5G, диапазоны *E-band* и *D-band* попадают между резонансными частотами и поэтому являются наиболее перспективными для использования в радиорелейных линиях. При этом необходимо отметить, что затухание в гидрометеорах миллиметровых волн с горизонтальной поляризацией больше, чем с вертикальной. Согласно Рекомендации *ITU-R* [122] были проведены расчёты погонного затухания в дождях различной интенсивности (мм/ч) для горизонтальной и вертикальной поляризации с помощью языка программирования *MATLAB*, результат расчёта представлен на рисунке 3.3. Разница затухания между горизонтальной и вертикальной поляризацией составляет от 2 до 5 дБ на частотах от 30 до 90 ГГц, при росте частоты разница уменьшается.

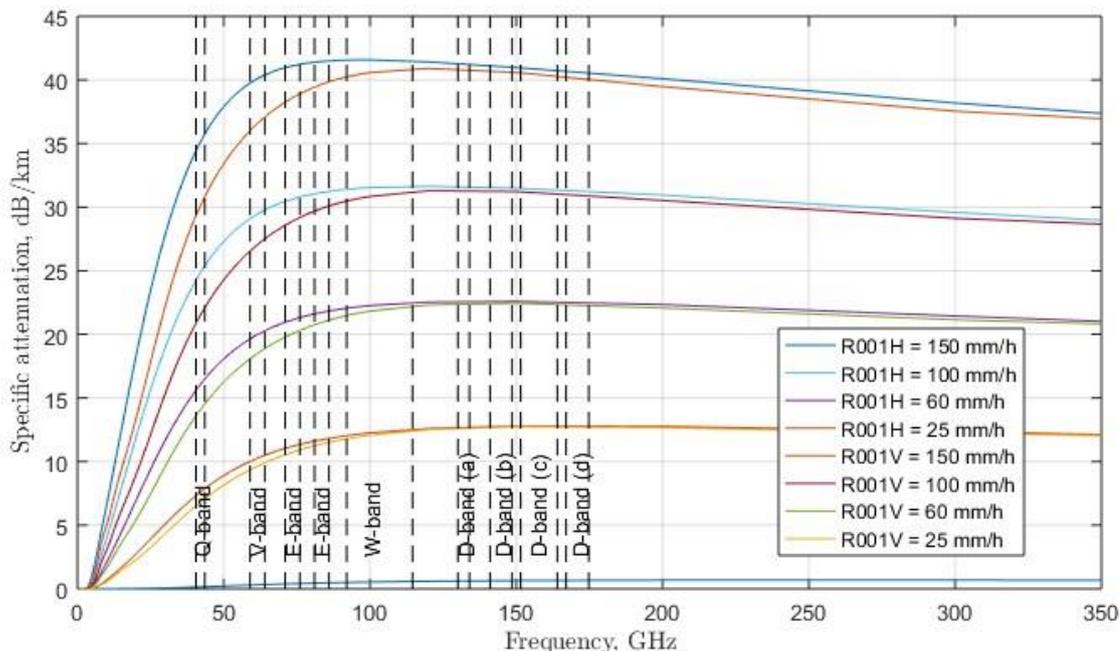


Рисунок 3.3 – Погонное затухание в дождях различной интенсивности для горизонтальной (H) и вертикальной (V) поляризации миллиметровых волн

Отличительными особенностями РРЛ, работающих в миллиметровом диапазоне волн, являются небольшие длины интервалов (до 5-6 км), применение узконаправленных антенн на РРС с шириной главного лепестка порядка $0,5^\circ$. Это обуславливает отсутствие интерференции, следовательно, отсутствует влияние на показатель $SESR$, а устойчивость РПИ можно оценить посредством коэффициента неготовности $Кнг$.

Для учёта особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне в предлагаемом методе в ходе данной работы был проведён анализ измерений и статистических данных, результаты которого представлены в следующем подразделе 3.2.

3.2 Анализ статистических данных о влиянии метеоусловий на замирания сигналов на интервалах радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в диапазоне *E-band*

Разработанный метод расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией учитывает особенности распространения

радиоволн в миллиметровом диапазоне в виде предлагаемого распределения вероятностей глубины замираний, полученного на основе обработанных результатов измерений.

В следующих пунктах данного подраздела приведены результаты анализа статистических данных о замираниях сигналов и влиянии на них метеоусловий на интервалах радиорелейной линии с адаптивной модуляцией.

3.2.1 Анализ статистических данных о замираниях сигналов на интервалах радиорелейной линии с адаптивной модуляцией

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 адаптивной модуляции. 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 $0,5^\circ$; коэффициент усиления антенны 50 дБ; доступные уровни модуляции *4QAM*, *16QAM*, *32QAM*, *64QAM*, *128QAM*, которым соответствовали значения чувствительности приёмников и скорости передачи, приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические параметры измеряемых РРС

Уровень модуляции	Чувствительность приёмника $P_{с.тр.i}$ при $BER=10^{-6}$, дБм	Скорость передачи C_i , Мбит/с
4 <i>QAM</i>	-60	2731
16 <i>QAM</i>	-54	5462
32 <i>QAM</i>	-51	6828
64 <i>QAM</i>	-48	8193
128 <i>QAM</i>	-44	9559

В результате обработки статистических данных было выяснено, что средние значения мощности сигнала на входе приёмников РРС составляли от -41,4 до -31,2 дБм, среднеквадратическое отклонение (СКО) варьировалось от 1,7 до 4,5 дБм, максимальная глубина замираний достигала от 13,6 до 40,8 дБ.

На всех РРИ использовался режим адаптивной модуляции. Усреднённые статистические функции плотности вероятности (ФПВ) и функции распределения вероятностей (ФРВ) уровней сигналов при разных адаптивно переключаемых уровнях модуляции представлены на рисунках 3.4 и 3.5 соответственно. Как видно из рисунка 3.4, пики ФПВ для различных уровней модуляции приходятся на области значений мощности сигнала, превышающих значения соответствующих данным уровням чувствительностей (таблица 3.1), что в целом соответствует математической модели функционирования РРИ с АМ [70], использованной в формулах (2.2) и (2.3).

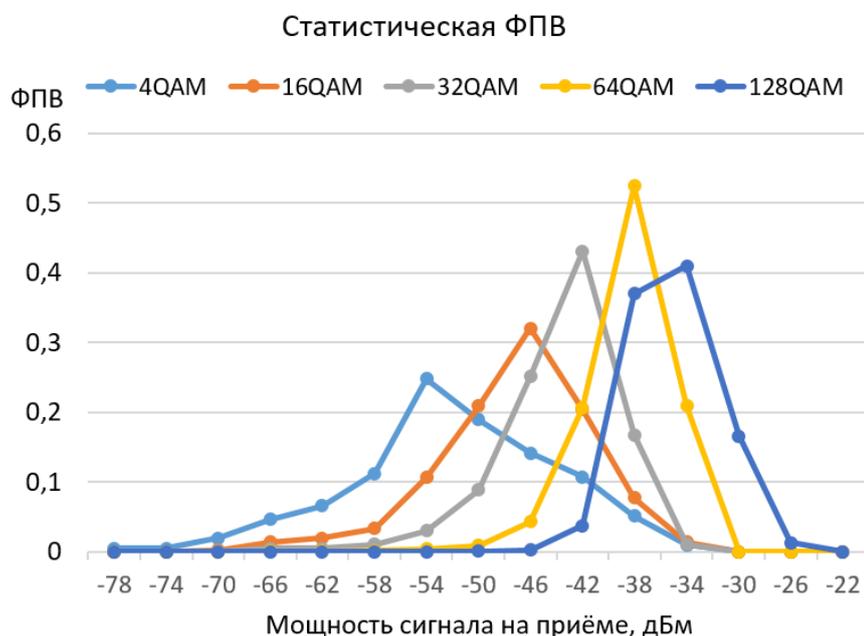


Рисунок 3.4 – Статистические функции плотности вероятности мощности сигнала на входе приёмников РРС с АМ

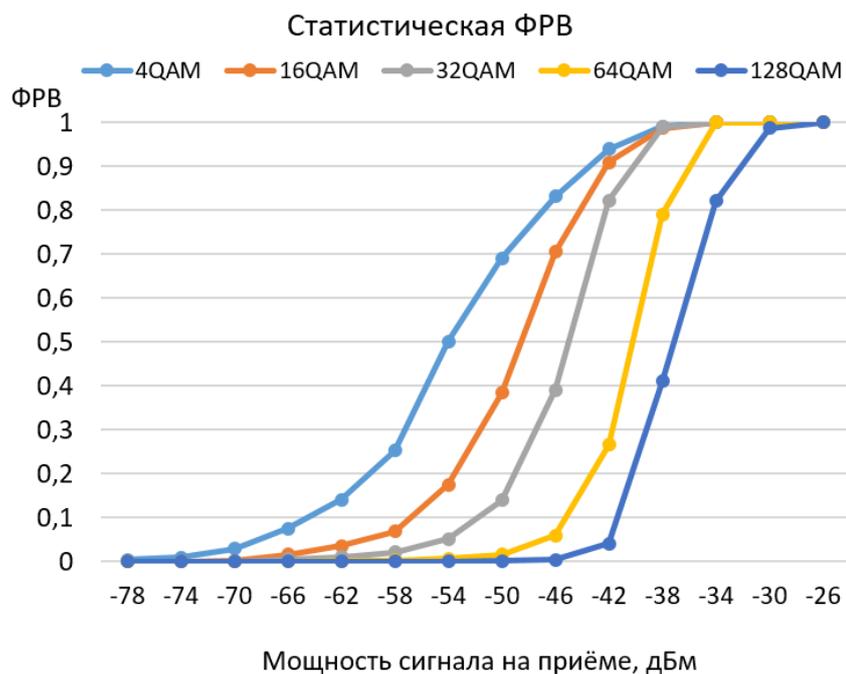


Рисунок 3.5 – Статистические функции распределения вероятности мощности сигнала на входе приёмников РРС с АМ

Так, для модуляции $4QAM$ среднее значение мощности сигнала (RSL , *Received Signal Level*) оказалось равным $-53,3$ дБм, $СКО=7,8$ дБм, для модуляции $16QAM$ $RSL=-48,6$ дБм, $СКО=5,9$ дБм, для модуляции $32QAM$ $RSL=-45,3$ дБм, $СКО=4,7$ дБм, для модуляции $64QAM$ $RSL=-40$ дБм, $СКО=3,4$ дБм, для модуляции $128QAM$ $RSL=-36,5$ дБм, $СКО=3,4$ дБм (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Статистические значения RSL и $СКО$ для различных модуляций

Модуляции	RSL	$СКО$
$4QAM$	$-53,3$	$7,8$
$16QAM$	$-48,6$	$5,9$
$32QAM$	$-45,3$	$4,7$
$64QAM$	-40	$3,4$
$128QAM$	$-36,5$	$3,4$

На основе статистических данных были получены гистограммы ФРВ мощности сигнала на входе приемников РРС независимо от текущего уровня модуляции. Для примера на рисунке 3.6 показаны гистограммы уровней сигналов, выбранных 4-х интервалов из 23-х анализируемых РРИ.

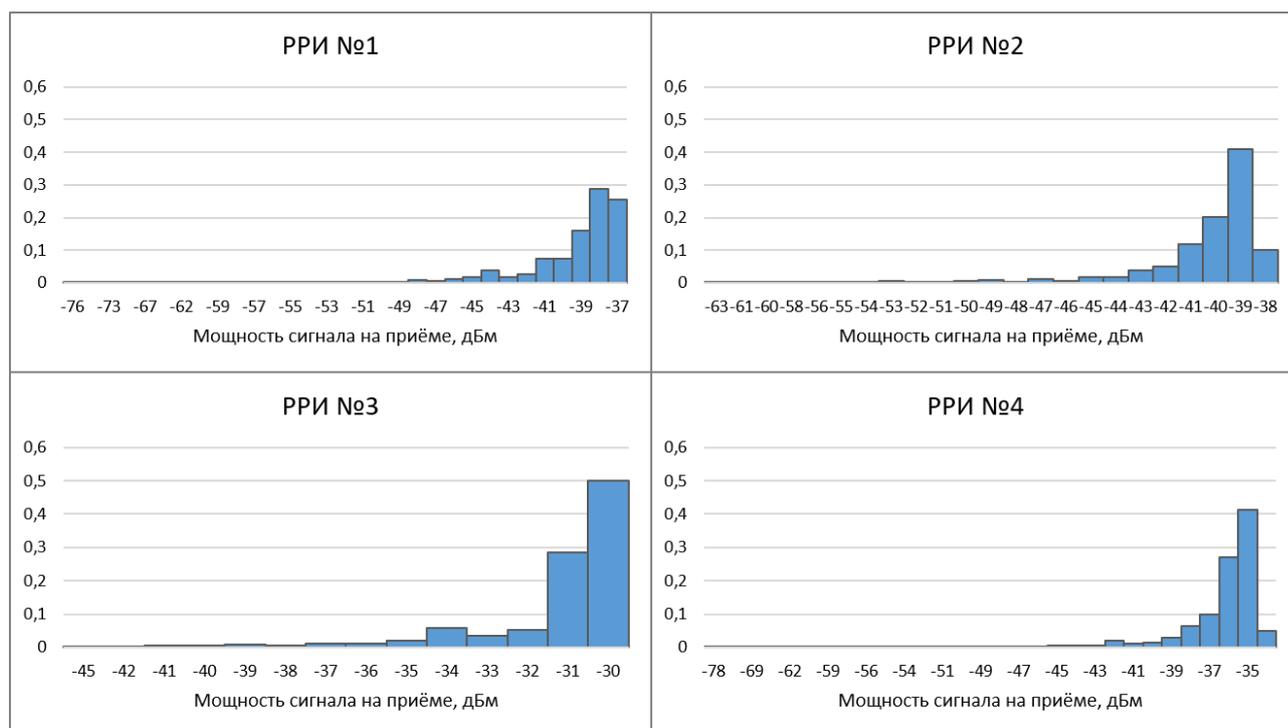


Рисунок 3.6 – Гистограммы уровней сигналов выбранных интервалов

Полученные значения приведённых гистограмм использованы далее в подразделе 3.3 для сравнения точности результатов расчёта РРЛ в миллиметровом диапазоне волн по существующим [13, 33, 120] и предложенному [69] методам.

3.2.2 Анализ влияния метеоусловий на замирания сигналов на интервалах радиорелейной линии с адаптивной модуляцией

Для выявления влияния различных погодных условий на замирания радиорелейного сигнала статистика РРИ была совмещена с метеорологической статистикой. Для этого использовались метеосводки близлежащих к РРИ метеостанций. На языке программирования *Python* была написана программа для считывания метеоданных и их обработки. Совмещение данных обеих статистик произведено с периодом в пятнадцать минут.

Совмещение данных позволило выявить степень зависимости уровня сигнала на приёме РРИ от следующих погодных параметров:

- температуры,
- температуры точки росы,

- давления,
- ветра,
- дождей,
- влажности.

Более подробный перечень погодных параметров [62] и единиц измерения, зафиксированных с периодом 15 минут: средняя температура ($^{\circ}\text{C}$), максимальная температура ($^{\circ}\text{C}$), минимальная температура ($^{\circ}\text{C}$), температура на высоте 15 см от поверхности земли ($^{\circ}\text{C}$), температура точки росы ($^{\circ}\text{C}$) (температура воздуха, при которой содержащийся в нём пар достигает состояния насыщения и начинает конденсироваться в росу), давление (гПа), направление ветра ($^{\circ}$), порывы ветра (м/с), скорость ветра (м/с), интенсивность дождя (мм), относительная влажность (%).

В качестве примера на рисунках 3.7-3.10 представлены совмещённые графики двух групп статистик, снятых с периодом 15 минут на 4-х выбранных из 23-х РРИ: уровни мощности сигнала на входе приёмника радиорелейных станций и погодных явлений вблизи этих станций. По горизонтальной оси отложены дата и время. По вертикальным осям отложены две шкалы: левая – совокупная для нескольких показателей, правая – для интенсивности дождей [мм/15мин]. Для примера были выбраны данные за январь и февраль, что соответствует для рассматриваемого региона наихудшим с точки зрения осадков месяцам. Представленные графики позволяют наглядно оценить причины возникновения замираний из-за погодных условий.

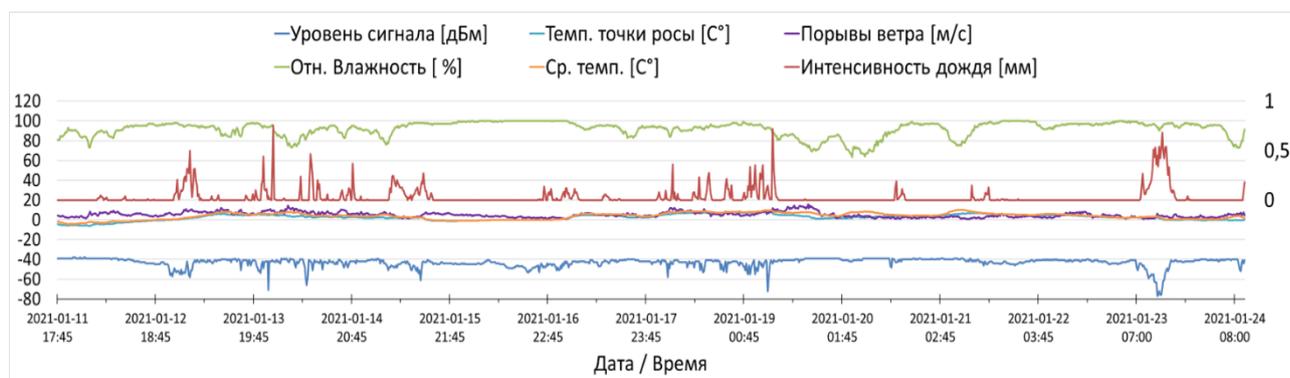


Рисунок 3.7 – Пример совмещённой статистики для РРИ №1

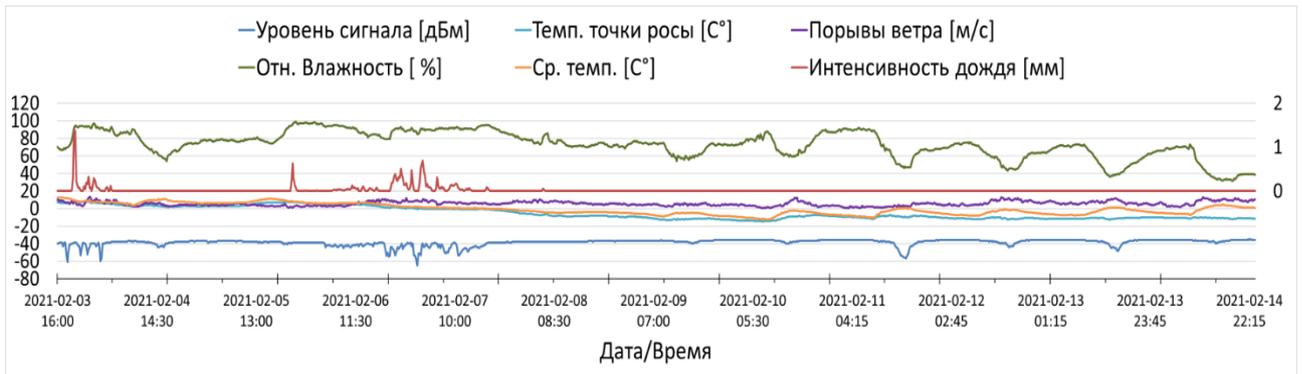


Рисунок 3.8 – Пример совмещённой статистики для РРИ №2

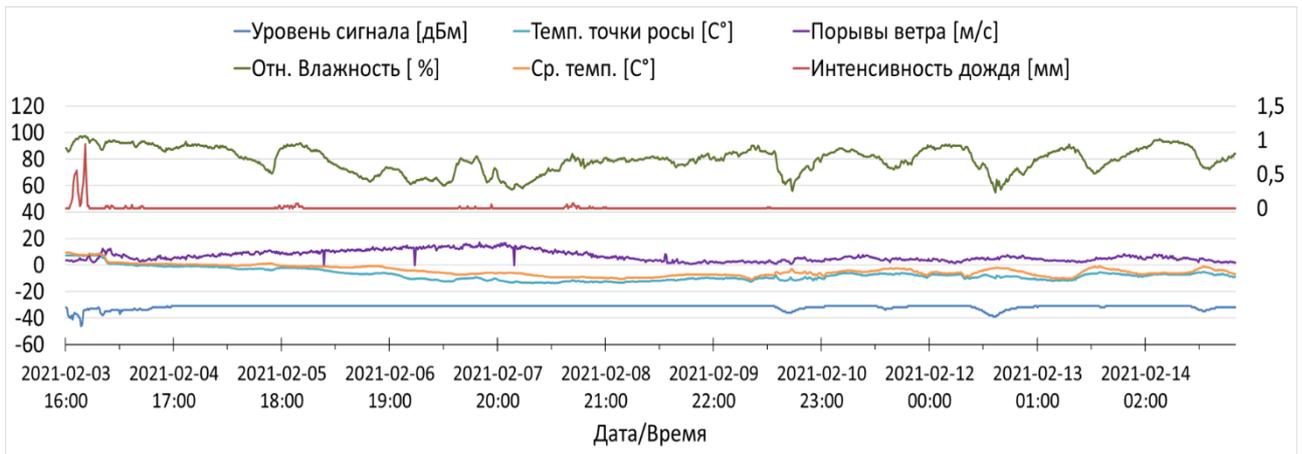


Рисунок 3.9 – Пример совмещённой статистики для РРИ №3

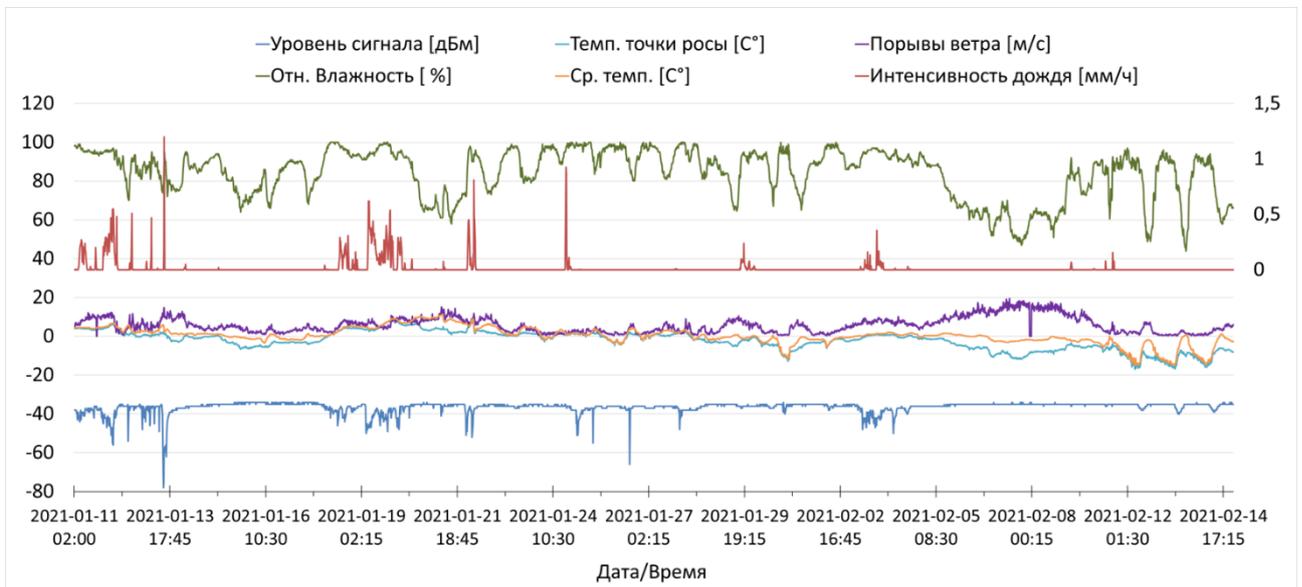


Рисунок 3.10 – Пример совмещённой статистики для РРИ №4

Визуальный анализ графиков подтверждает понижение уровня сигнала во время возникновения дождей. Однако, это не единственная зависимость замираний от погодных условий. Также заметны явные провалы уровня сигнала при одновременном резком снижении относительной влажности и пиках средней

температуры и температуры точки росы. При этом необходимо отметить, что в эти промежутки времени кривая интенсивности дождя указывает на отсутствие осадков, то есть влияние дождей на выявленные замирания в эти временные интервалы исключено.

Для того, чтобы численно исследовать влияние всех перечисленных метеорологических явлений на мощность сигнала на приеме, была проведена оценка влияния отдельных погодных явлений путем вычисления корреляции Пирсона [1].

Расчёты коэффициентов корреляции показали, что наибольшее влияние на мощность сигнала имеют следующие погодные параметры в порядке возрастания степени влияния: относительная влажность, температура точки росы, давление, интенсивность дождя. Значения коэффициентов корреляции представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчёта коэффициента корреляции между наиболее значимыми погодными параметрами и замираниями сигнала

Статистический параметр	Погодные параметры			
	относительная влажность	температура точки росы	давление	интенсивность дождя
Коэффициент корреляции между мощностью сигнала на приеме и погодными явлениями	-0,36442	-0,39255	0,39712	-0,40621

Чтобы проверить представленную взаимосвязь между перечисленными погодными параметрами и мощностью сигнала на предмет искажений вследствие взаимных влияний каких-либо погодных явлений друг на друга, был применён способ расчёта коэффициента частной корреляции, который исключает влияние третьего параметра:

$$r_{xy(z)} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (3.1)$$

где $r_{xy(z)}$ – коэффициент частной корреляции между мощностью сигнала (x) и исследуемым погодным параметром (y) без влияния другого погодного параметра (z);

r_{yz} – коэффициент взаимной корреляция между двумя погодными параметрами.

Так как самое большое значение коэффициента корреляции на мощность сигнала приходится на интенсивность дождя, важно исключить искажения этого показателя за счёт влияния других корреляционно-значимых эффектов погоды. Сделав сравнительный анализ первой и второй строк таблиц 3.5-3.7 и принимая во внимание разницу значений между простой r_{xy} и частной $r_{xy(z)}$ корреляциями, можно подчеркнуть следующее.

Во-первых, в корреляции между сигналом и интенсивностью дождя взаимосвязь между давлением и интенсивностью дождя не играет существенной роли.

Во-вторых, наибольшая разница между корреляциями r_{xy} и $r_{xy(z)}$ присутствует в случае воздействия давления и температуры точки росы на сигнал. Это говорит о том, что корреляция между сигналом и давлением подвергается влиянию от температуры, и наоборот. Что, впрочем, не противоречит закону Шарля о взаимосвязи давления и температуры [7].

В-третьих, относительная влажность не вносит в корреляцию сигнала с интенсивностью дождя значительного влияния.

В-четвертых, температура точки росы вносит в корреляцию сигнала с относительной влажностью определенное влияние, так как наблюдается заметная разница между коэффициентами корреляциями r_{xy} и $r_{xy(z)}$ в случае воздействия относительной влажности на сигнал при учете температуры точки росы.

Таблица 3.4 – Результаты расчёта частной и общей корреляции между сигналом и интенсивностью дождя

Статистический параметр	Корреляция сигнала и погодных параметров		
	Сигнал (x) - интенсивность дождя (y) без влияния давления (z)	Сигнал (x) - интенсивность дождя (y) без влияния относительной влажности (z)	Сигнал (x) - интенсивность дождя (y) без влияния температуры точки росы (z)
$r_{xy(z)}$ без влияния z	-0,37	-0,36541	-0,37956
r_{xy}	-0,41	-0,41	-0,41
r_{yz}	-0,19	0,1997	0,156443

Таблица 3.5 – Результаты расчёта частной и общей корреляции между сигналом и давлением

Статистический параметр	Корреляция сигнала и погодных параметров		
	Сигнал (x) – давление (y) без влияния интенсивности дождя (z)	Сигнал (x) – давление (y) без влияния относительной влажности (z)	Сигнал (x) – давление (y) без влияния температуры точки росы (z)
$r_{xy(z)}$ без влияния z	0,358	0,365	0,264
r_{xy}	0,397	0,397	0,397
r_{yz}	-0,19	-0,17	-0,4632

Таблица 3.6 – Результаты расчёта частной и общей корреляции между сигналом и температурой точки росы

Статистический параметр	Корреляция сигнала и погодных параметров		
	Сигнал (x) – температура точки росы (y) без влияния давления (z)	Сигнал (x) – температура точки росы (y) без влияния относительной влажности (z)	Сигнал (x) – температура точки росы (y) без интенсивности дождя (z)
$r_{xy(z)}$ без влияния z	-0,2565	-0,31758	-0,36454
r_{xy}	-0,39255	-0,39255	-0,39255
r_{yz}	-0,4632	0,304	0,16

Таблица 3.7 – Результаты расчёта частной и общей корреляции между сигналом и относительной влажностью

Статистический параметр	Корреляция сигнала и погодных параметров		
	Сигнал (x) – относительная влажность (y) без влияния давления (z)	Сигнал (x) – относительная влажность (y) без влияния температуры точки росы (z)	Сигнал (x) – относительная влажность (y) без влияния интенсивности дождя (z)
$r_{xy(z)}$ без влияния z	-0,328	-0,2797	-0,316
r_{xy}	-0,365	-0,365	-0,365
r_{yz}	-0,17	0,304	0,20

Из представленных таблиц 3.4–3.7 следует, что среди погодных явлений можно выделить основной фактор – интенсивность дождя как непосредственно влияющий на уровень сигнала в диапазоне *E-band* и независимый от других погодных явлений. Следует также выделить следующие погодные факторы, которые вносят в своей совокупности весомое воздействие на замирание сигнала: относительная влажность в совокупности с температурой точки росы, температура точки росы в совокупности с давлением.

3.3 Сравнение результатов измерений с результатами расчёта устойчивости и пропускной способности известными методами

3.3.1 Сравнение результатов измерений с результатами расчёта устойчивости известными методами

По значениям приведённых в пункте 3.2.1 гистограмм были получены статистические ФРВ уровней сигнала, с которыми были сопоставлены аналитические функции распределения замираний, полученные на основании известных методов и методик расчёта РРЛ: *ITU-R P.530* [120], НИИР [33], ГОСТ [13] и обобщённой методики *ONEPLAN* [46].

Аналитические функции распределения замираний, полученные на основании формул в Рекомендации *ITU-R P.530* [120], где описана процедура

оценки долгосрочной статистики затухания (ослабления с обратным знаком в дБ) сигналов из-за влияния осадков (дождя), которая после некоторых преобразований, позволяет получить аналитическую функцию распределения замираний для дождя заданной интенсивности.

В указанной рекомендации приводится выражение для оценки затухания $A_{0,01}$ (дБ) от дождя на трассе, превышаемое в течение 0,01 % времени:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_r, \quad (3.2)$$

где γ_R – удельное затухание (дБ/км), которое рассчитывается согласно Рекомендации ITU-R P.838 [122] для заданной частоты, поляризации и интенсивности дождя $R_{0,01}$, превышаемой в течение 0,01 % времени;

d_r – длина РРИ с учетом коэффициента дальности r , которая была задана в расчётах в соответствии с местоположением РРС, участвующих в сборе статистических данных.

Затухание A_p , превышаемое в течении других процентов времени p , отличных от 0,01 %, рассчитывается с помощью выражения:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = c_1 p^{-(c_2 + c_3 \log_{10} p)}, \quad (3.3)$$

где C_1 , C_2 , и C_3 – определяемые по рекомендации [120] параметры.

В ходе работы было решено уравнение (3.3) относительно p , и вследствие было получено аналитическое выражение для ФРВ замираний $F(V)$ глубиной более $A_p = -V$ при заданной интенсивности дождя $R_{0,01}$:

$$F(V) = \begin{cases} p(V), & p(V) \leq 1 \\ 1, & p(V) > 1 \end{cases}, \quad (3.4)$$

где

$$p(V) = 10^{\frac{-C_2 + \sqrt{C_2^2 - 4C_3(\lg(-V) - \lg(A_{0,01}) - \lg(C_1))}}{2C_3}}. \quad (3.5)$$

Здесь и далее для примера расчётов был выбран РРИ №4. На рисунке 3.11 приведены результаты расчёта ФРВ мощности сигнала с учётом распределения вероятности замираний, рассчитанной по формулам (3.4) и (3.5) для РРИ №4, имеющего длину 5,5 км, при различных значениях интенсивности дождя, которым соответствуют разные цветные линии. На этом же рисунке чёрным цветом изображена измеренная статистическая ФРВ мощности сигнала для РРИ №4. Из представленных графиков следует, что аналитическая функция распределения, посчитанная по *ITU-R P.530*, значительно отличается от статистической ФРВ при $R_{0,01} = 30$ мм/ч, соответствующей среднестатистическим данным о метеоусловиях в районе РРИ №4. В пределах значений уровня приёмного сигнала, наиболее характерных для радиорелейной связи, от -60 дБм до приблизительно -35 дБм, средняя ошибка между статистическими данными и рассчитанными значениями вероятности замираний составляет 4,7 % при СКО = 15,2 %. В целом рассчитанные значения вероятностей оказались меньше статистических данных в указанном диапазоне уровней приёмного сигнала от 3-х до 12-ти раз.

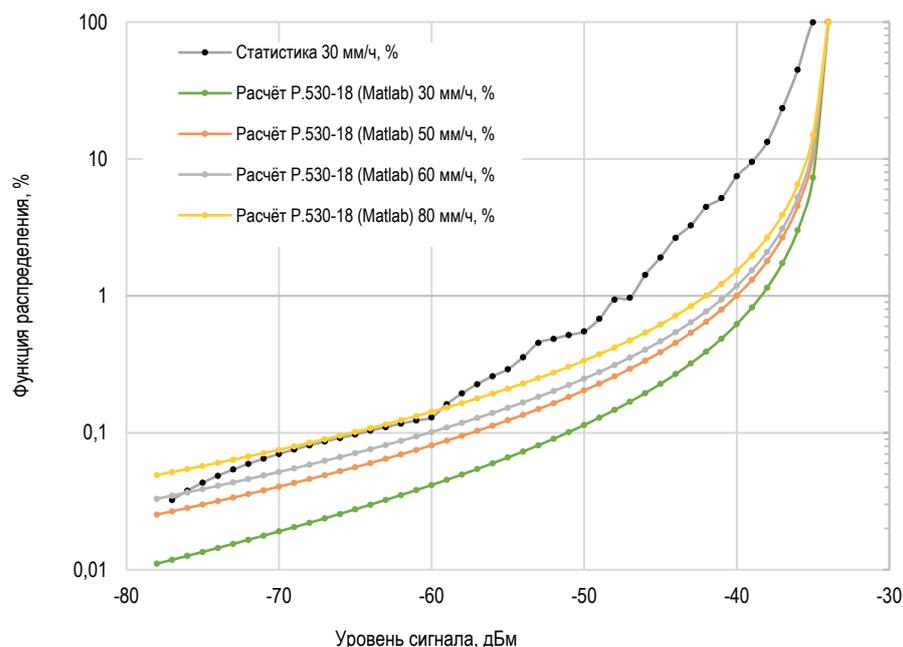


Рисунок 3.11 – Статистическая ФРВ уровня сигнала на РРИ №4 и функции распределения, рассчитанные по *ITU-R P.530-18* при различных интенсивностях дождя

$$R_{0,01}$$

Попытки уменьшения погрешности с помощью поправочного коэффициента к интенсивности дождя и её увеличения с градациями 50, 60 и 80 мм/ч не привели к желаемому результату. Как видно из рисунка 3.11, при увеличении интенсивности дождя возникает неоднородная погрешность, то есть графики аналитической функции распределения и статистики показывают хорошее совпадение для низких значений уровня сигнала (менее -60 дБм), а для более высоких значений погрешность остаётся большой. С учётом поправки до 80 мм/ч средняя ошибка уменьшилась, но лишь до 4,2 %, а СКО составило 13,9 %.

Из рисунка 3.11 следует, что результаты расчёта функции распределения замираний в соответствии с Рекомендацией *ITU-R P.530* для диапазона частот *E-band* получаются слишком оптимистичными, а введение поправочного коэффициента к интенсивности дождя не позволяет уменьшить погрешность. На практике такой оптимистичный результат прогноза влияния замираний на качество связи на РРИ с АМ может привести к завышенным ожиданиям устойчивости и пропускной способности, недостижимым в реальных условиях. Это может

привести к неадекватному принятию решения на этапе планирования РРЛ и полному отсутствию связи на РРЛ на этапе её последующей эксплуатации.

Также с помощью программного обеспечения *ONEPLAN RPLS-DB Link* были проведены расчёты функции распределения замираний в соответствии с методиками НИИР [33], ГОСТ [13] и обобщённой методики *ONEPLAN* [46]. Результаты этих расчётов для различной интенсивности дождя изображены на рисунке 3.12. Чёрным цветом изображена измеренная статистическая ФРВ мощности сигнала для РРИ №4, остальные цветные кривые показывают соответствующие техническим характеристикам РРИ №4 результаты расчёта по известным методикам.

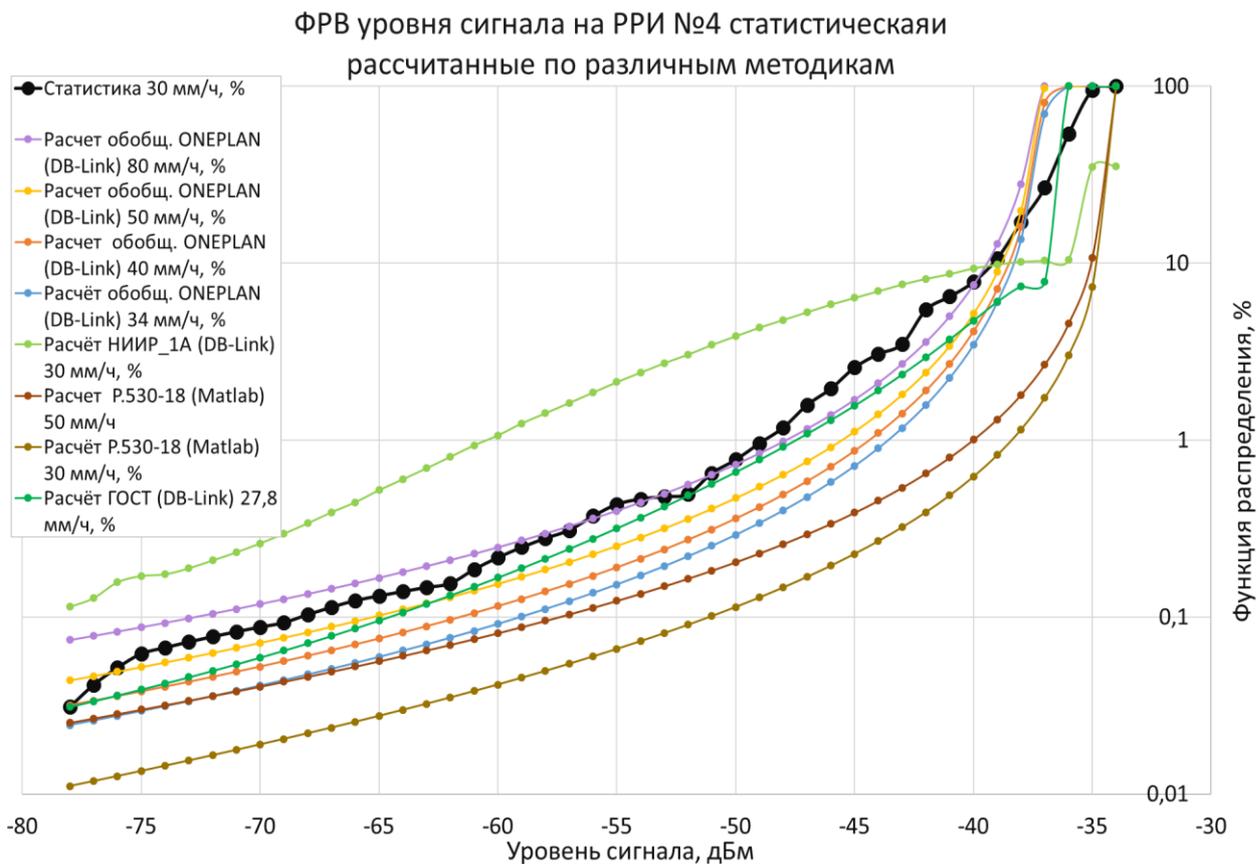


Рисунок 3.12 – Статистическая ФРВ уровня сигнала на РРИ №4 и функции распределения, рассчитанные по *ITU-R P.530-18*, НИИР, ГОСТ и обобщённой методике *ONEPLAN* при различных интенсивностях дождя

Сравнивая полученные рассчитанные значения со статистической кривой, можно сделать вывод, что ни одна из существующих методик не даёт результатов,

соответствующих действительным значениям ФРВ уровня сигнала РРЛ, работающей в диапазоне *E-band*.

Для обоснования более подходящего аналитического выражения для расчёта функции распределения замираний были проведены исследования влияния различных параметров метеоусловий на распространение радиоволн в диапазоне частот *E-band*, результаты которых представлены далее.

3.3.2 Сравнение результатов измерений с результатами расчёта пропускной способности известными методами

Используя приведенные в предыдущем пункте 3.3.1 функции распределения вероятности уровня сигнала, полученные путём измерений и на основе известных методов расчёта РРЛ, а также формулу расчёта пропускной способности РРЛ с АМ (2.2), можно провести сравнение пропускной способности РРЛ с АМ в диапазоне *E-band*, полученной на основе данных функций распределения.

Результаты расчёта представлены на рисунке 3.13. Чёрная кривая отображает пропускную способность, полученную на основе измеренной функции распределения вероятности для радиорелейного интервала №4 с учётом соответствующих ему технических характеристик РРС с АМ, а остальные цветные кривые показывают результаты расчёта пропускной способности на основе функций распределения, полученных на основе известных методов расчёта: *ITU-R P.530-18*, *ГОСТ Р 53363-2009* и обобщённом методе, реализованном в программном комплексе *ONEPLAN*.

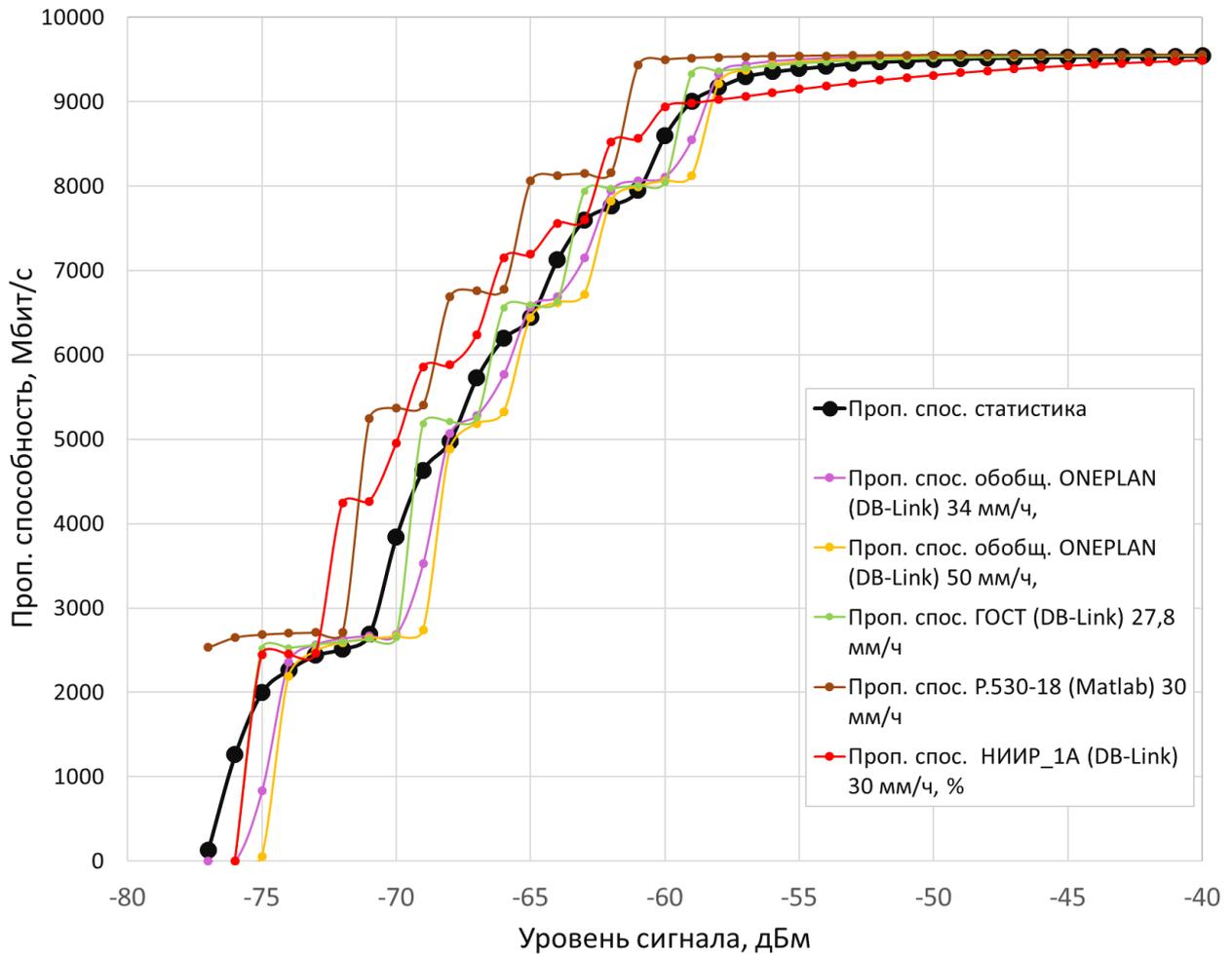


Рисунок 3.13 – Статистическая пропускная способность на РРЛ №4 и пропускная способность, рассчитанная по *ITU-R P.530-18*, ГОСТ и обобщённой методике *ONEPLAN*

Как и в случае сравнения функций распределения вероятности уровня сигнала, известные методы не дают точных результатов расчёта пропускной способности РРЛ, работающей в диапазоне *E-band*.

Поэтому необходимо разработать новый метод расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, учитывая особенности распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне. Далее будет рассмотрено обоснование предлагаемого метода.

3.4 Обоснование предлагаемого метода расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне

Предлагаемый в данной работе способ нахождения теоретической функции распределения вероятности замираний основан на методе моментов, или методе выравнивания имеющегося статистического ряда с помощью некоторых параметров, характерных для заданного статистического материала [8, 9]. Подобные методы уже использовались ранее, но их применение ограничивалось максимальным значением частот 35 ГГц [28]. Суть метода состоит в том, что для нахождения аналитического выражения расчёта вероятности замираний сигнала на РРИ в условиях дождей необходимо для имеющихся статистических данных определить моменты, а на основе моментов найти параметры, характеризующие искомую функцию распределения. Предлагается использовать следующее экспоненциальное выражение для интегральной функции распределения вероятности [28]:

$$F(A, \alpha, \beta, \delta) = \begin{cases} \alpha(\delta^2 e^{\beta\delta^2 A} + \delta e^{\beta\delta A} + e^{\beta A}), & A < 0, \\ 1, & A \geq 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

где A – ослабление радиоволн в дожде, дБ.

Определить параметры α , β и δ можно, основываясь на характерные для заданной статистики значения: P_d – вероятность наличия дождя, в долях;

A_{sr} – статистическое среднее ослабление во время дождя, дБ;

D_A – статистическая дисперсия ослабления во время дождя, дБ².

Параметры P_d , A_{sr} , D_A могут быть получены на основе d_r – длины РРИ с учётом коэффициента дальности r , γ_R – удельного затухания (дБ/км), которое рассчитывается согласно Рекомендации ITU-R P.838 [122] для заданной частоты, поляризации и средней интенсивности дождя, полученной из статистических данных о метеоусловиях в районе РРИ.

Для определения параметров α , β и δ при заданных значениях P_d , A_{sr} , D_A необходимо решить следующую систему уравнений [28] относительно данных параметров:

$$\begin{cases} P_d = \alpha(\delta^2 + \delta + 1) \\ A_{sr} = \frac{-3}{\beta(\delta^2 + \delta + 1)} \\ D_A = \frac{2}{\beta^2 \delta^2} - A_{sr}^2 \end{cases} \quad (3.7)$$

где P_d – вероятность возникновения ослабления в результате дождя.

Деление третьего уравнения на квадрат второго даёт соотношение $\varphi(\delta)$:

$$\varphi(\delta) = \frac{D_A}{A_{sr}^2} = \frac{2(\delta^2 + \delta + 1)^2}{9\delta^2} - 1, \quad (3.8)$$

из которого была выведена формула:

$$\delta = \frac{\sqrt{18 \frac{D_A}{A_{sr}^2} - 12 \sqrt{\frac{D_A}{A_{sr}^2} + 2} + 6 + 3\sqrt{2} \sqrt{\frac{D_A}{A_{sr}^2} + 1} - 2}}{4} \quad (3.9)$$

Остальные параметры определяются по формулам:

$$\alpha = \frac{P_d}{\delta^2 + \delta + 1} \quad (3.10)$$

$$\beta = \frac{-3P_d}{A_{sr}(\delta^2 + \delta + 1)} \quad (3.11)$$

Для 4-х из 23-х РРИ, выбранных ранее для примера, был выполнен расчёт замираний в условиях дождя с интенсивностью 15 и 30 мм/ч, превышаемой в течение 0,01% времени, что характерно для климатических регионов, в которых находятся интервалы. Графики функции распределения вероятности ослабления

сигнала в дождях для РРИ, функционирующих в диапазоне *E-band*, полученные на основе статистики и рассчитанные с помощью предложенного метода, представлены на рисунке 3.14, соответственно, синим и красным цветами.

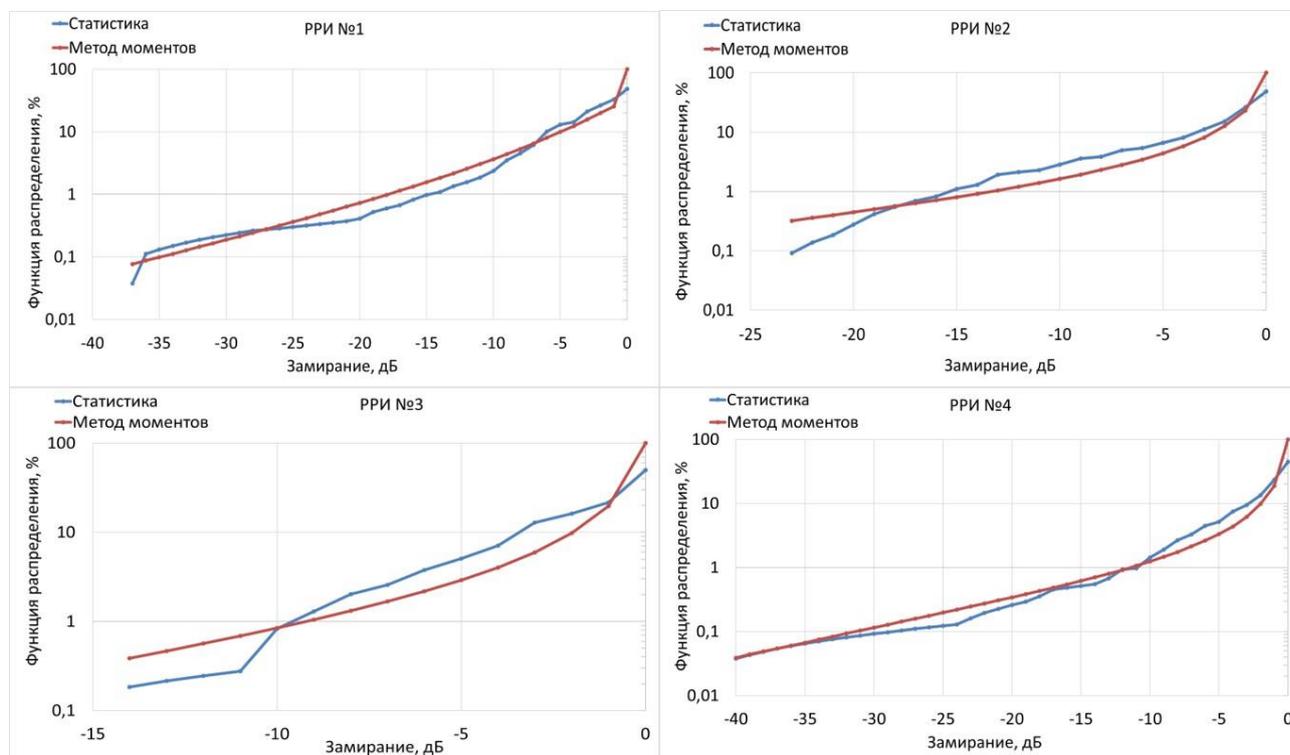


Рисунок 3.14 – Сравнение статистических ФРВ замираний и предлагаемой аналитической ФРВ

Результаты расчёта по предложенной аналитической функции распределения вероятности замираний, основанной на методе моментов, показали хорошее совпадение со статистическими данными для 4-х радиорелейных интервалов. Для РРИ №1 средняя ошибка между статистическими данными и рассчитанными значениями вероятности замираний сигнала глубиной до -37 дБ составляет 0,4 %, СКО равно 2 %, для РРИ №2 при глубине замираний до -23 дБ средняя ошибка равна 1 %, СКО равно 1,1 %, для РРИ №3 при глубине замираний до -14 дБ средняя ошибка равна 1,6 %, СКО равно 2,3 %, а для РРИ №4 при глубине замираний до -40 дБ средняя ошибка равна 0,5 %, СКО равно 1,2 %. Обобщённый результат точности расчёта вероятности замираний для предложенного метода по всем четырём РРИ составляет среднюю ошибку 0,9 % и СКО 1,6 %.

Результаты расчёта средних значений уровня мощности сигнала P_{SR} по предложенной методике и статистические данные $P_{SR_стат}$ представлены в таблице 3.8. Символами $P_{SR_стат1}$ и $P_{SR_стат2}$ обозначены значения среднего уровня мощности сигнала, соответственно, на станции 1 и станции 2 радиорелейного интервала. Разница между статистическими данными $P_{SR_стат}$ и рассчитанными значениями P_{SR} для четырёх рассматриваемых интервалов находится в диапазоне значений от -3,9 до 3,8 дБм, средняя ошибка составляет -0,26 дБм и СКО 2,94 дБм.

Таблица 3.8 – Средние значения уровня мощности сигнала в дождях, рассчитанные предложенным методом и полученные на основе статистики

Интенсивность дождя Id=15 мм/ч				Интенсивность дождя Id=30 мм/ч			
РРИ №1, R=9 км		РРИ №2, R=8 км		РРИ №3, R=7 км		РРИ №4, R=6 км	
Расч. P_{SR} , дБм	Стат. $P_{SR_стат1}$; $P_{SR_стат2}$, дБм	Расч. P_{SR} , дБм	Стат. $P_{SR_стат1}$; $P_{SR_стат2}$, дБм	Расч. P_{SR} , дБм	Стат. $P_{SR_стат1}$; $P_{SR_стат2}$, дБм	Расч. P_{SR} , дБм	Стат. $P_{SR_стат1}$; $P_{SR_стат2}$, дБм
-43,7	-43,4 -41,9	-39,1	-42,8 -43,2	-49,7	-45,5 -46,3	-37,3	-39,6 -38,99

Таким образом, предложенная функция распределения (3.6) замираний сигнала в условиях дождей позволяет рассчитать коэффициент неготовности для всех уровней модуляции, а затем, используя выражение (2.2) при передаче неприоритетного потока или (2.3) при передаче приоритетного потока, найти среднюю скорость передачи данных на РРИ с адаптивной модуляцией.

Для возможности сравнения аналитических результатов со статистическими данными, расчёт пропускной способности и устойчивости работы РРИ в диапазоне *E-band* выполнен для РРИ №4. На данном интервале применяется оборудование, которое поддерживает режим адаптивной модуляции с техническими параметрами, представленными в таблице 3.2.

Результаты расчёта распределения вероятности уровня мощности сигнала на входе приёмника РРИ №4 в диапазоне *E-band*, полученные на основе аналитических функций и статистических данных, представлены на рисунке 10. Расчёты и статистические данные соответствуют условиям дождя со средней интенсивностью 30 мм/ч, превышаемой в течение 0,01% времени. Для

Рекомендации *ITU-R P.530* и предлагаемого метода расчёт распределения вероятности уровня сигнала на входе приёмника выполнен с использованием аналитических функций распределения замираний сигнала, соответственно, (6) и (9).

Представленные на рисунке 3.15 графики позволяют выполнить сравнительную оценку аналитических методов расчёта устойчивости РРИ со статистическими данными. Например, требуется рассчитать устойчивость работы РРИ №4 в сети доступа на уровне модуляции *4QAM* для обеспечения скорости передачи данных 2731 Мбит/с. Устойчивость работы оценивается коэффициентом неготовности $K_{нг.i}$ на i -й скорости передачи (i -м уровне модуляции). Для сети доступа требуемое значение коэффициента неготовности $K_{нг.треб}=0,05$ % [33], что соответствует красной горизонтальной линии на рисунке 3.15. Вертикальная линия красного цвета показывает чувствительность приёмника для модуляции *4QAM* при $BER=10^{-6}$. Точка пересечения указанных линий является критерием устойчивой работы РРИ. Интервал соответствует требованиям по устойчивости, если выполняется условие $K_{нг.i} \leq K_{нг.треб}$. Из графика следует, что согласно расчётам по Рекомендации *ITU-R P.530* интервал соответствует требованиям по устойчивости работы, а согласно расчётам по предложенному методу и статистическим данным – интервал не соответствует требованиям по устойчивости для работы в сети доступа. Следовательно, опасность применения чрезмерно оптимистичного прогноза, который даёт Рекомендация *ITU-R P.530*, 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 завышенных ожиданий от устойчивости работы РРИ и связанных с этим риском.

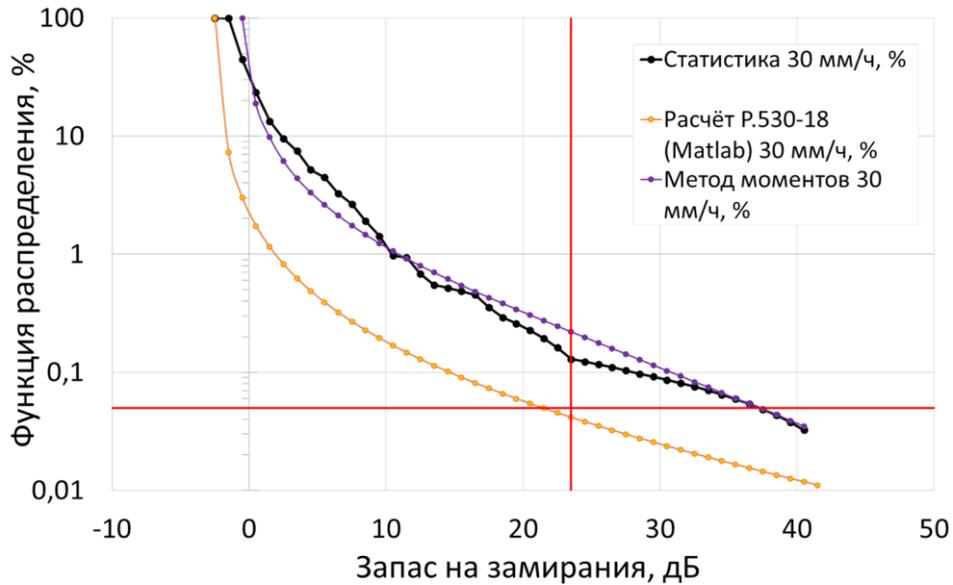


Рисунок 3.15 – Функции распределения вероятности уровня мощности сигнала на входе приёмника, рассчитанная для РРИ №4 по предложенной и *ITU-R* методикам, и их сравнение со статистическими данными

Результаты расчёта пропускной способности РРИ №4 представлены на рисунке 3.16. Для расчёта использовалась предложенная математическая модель РРЛ с АМ в виде формулы (2.2), где в качестве функции распределения вероятности ослабления сигнала F взяты значения, полученные разработанным методом моментов (3.6). Результаты расчёта пропускной способности предложенным методом моментов показаны синей кривой, значения отложены по правой оси ординат в Мбит/с. Чёрной кривой на рисунке показана пропускная способность, полученная на основе статистических данных. Также на графике указаны значения F в качестве Кнг на левой оси ординат в %.

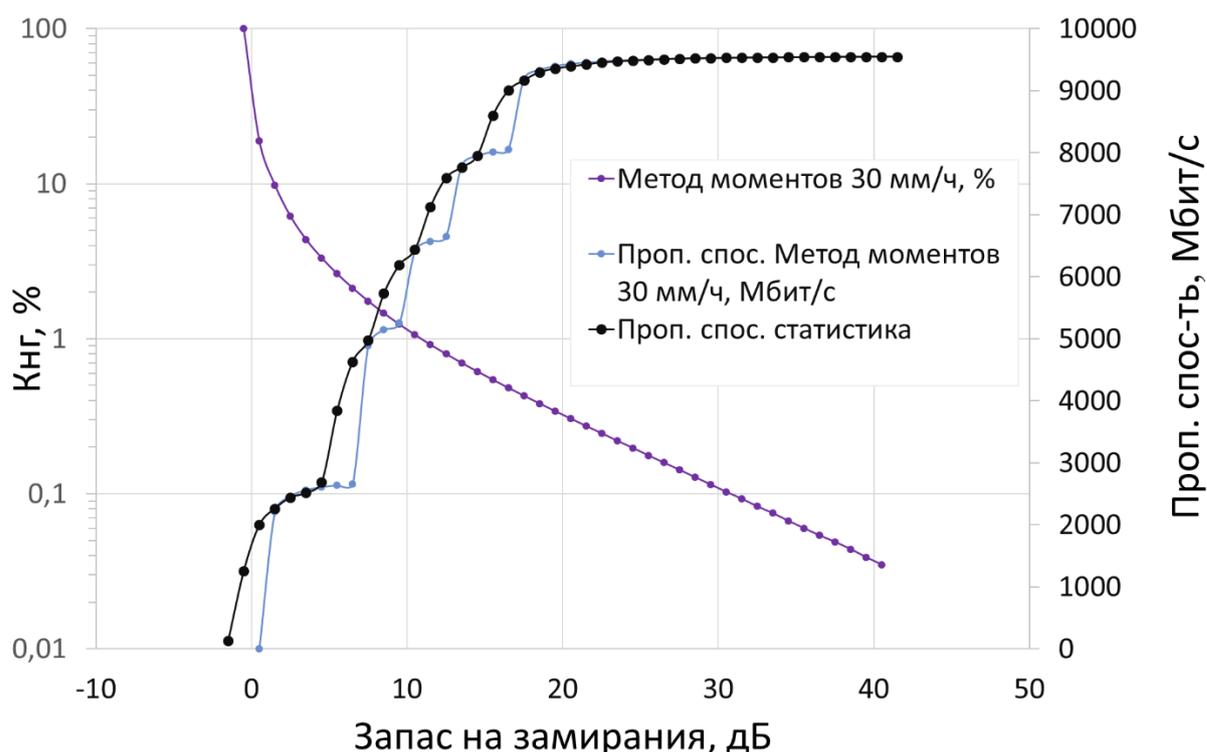


Рисунок 3.16 – Результаты расчёта пропускной способности и Кнг РРИ №4, полученные разработанным методом и на основе статистики.

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 % [14, 16]. Пороговая величина параметра $\lambda_{\text{порог}}$ критерия согласия Колмогорова для заданного уровня значимости составляет 1,35, а вычисленное значение $\lambda_{\text{Мет.моментов_расч}}$ для статистического и предложенного теоретического рядов – 1,31, что меньше порогового значения $\lambda_{\text{порог}}$ (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Численное сравнение результатов моделирования, полученных по разработанному методу, с эмпирическими значениями по критерию Колмогорова

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

Данное обоснование позволяет считать допустимой гипотезу о соответствии значений предложенного аналитического распределения и пропускной способности статистическим значениям.

3.5 Выводы по третьему разделу

1. Существующие методы расчёта устойчивости радиорелейных линий базируются на математических моделях, справедливых для ограниченного частотного диапазона. Однако, современные РРС функционируют на частотах 80 ГГц и выше, что продиктовано требованиями к росту пропускной способности. Анализ статистических данных и выполненные расчёты в рамках данной работы выявили несоответствия расчётов по существующим методам и методикам со статистическими данными, измеренными на РРИ с адаптивной модуляцией.

2. Разработан метод расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн, который является наиболее точным по сравнению с существующими.

3. Показана взаимосвязь пропускной способности с коэффициентами неготовности интервалов РРЛ с разными градациями скорости передачи при известной функции распределения замираний.

4. 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 функции распределения замираний.

5. Проведён сравнительный анализ результатов расчёта коэффициентов неготовности и пропускной способности интервалов РРЛ в диапазоне *E-band* на основе предлагаемой функции распределения и на основе функций распределения, используемых в существующих методах. Показано, что результаты расчётов с использованием разработанного метода в большей степени соответствуют

результатам измерений, чем результаты расчётов на основе существующих методов.

4. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ ЛИНИИ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ И ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ

В соответствии с общей постановкой задачи в данном разделе описывается разработанная методика расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией при планировании и оптимизации РРЛ в различных условиях применения, основанная на математической модели РРЛ с АМ, которая была рассмотрена в разделе 2, и методе расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне, рассмотренном в предыдущем разделе 3.

В подразделе 4.1 представлена общая структура методики расчёта РРЛ с АМ для всех диапазонов волн. В подразделе 4.2 описана программная реализация методики в составе программного комплекса *ONEPLAN RPLS-DB Link*. Подраздел 4.3 освещает предложения по программной реализации разработанного метода расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне. Предложения по повышению пропускной способности за счёт использования РРЛ с АМ в транспортном сегменте сетей подвижной связи представлены в подразделе 4.4.

Материал настоящего раздела нашёл отражение в публикациях [69, 72, 76, 75, 77].

4.1 Структура методики расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией

Целью разработки методики является прогноз и оценка пропускной способности, показателей качества РРЛ с адаптивной модуляцией, 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 методиках [13, 33, 120]. 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*).

В качестве начальных условий рассчитываемой РРЛ задаются требуемая пропускная способность, требуемые показатели качества по ошибкам и неготовности для их дальнейшего сравнения с рассчитанными значениями. Одним из исходных параметров может выступать тип сети (сеть доступа, местная сеть, магистральная сеть), который определяет нормы к требуемым показателям. В качестве остальных исходных данных заданы координаты начальной точки, промежуточных ретрансляционных пунктов и конечной точки, климатический регион, диапазоны и тип РРЛ оборудования с его техническими характеристиками, используемый набор уровней адаптивной модуляции.

Зная исходные параметры, на основе методики можно рассчитать пропускную способность РРЛ, показатели качества по ошибкам и неготовности. Если результат расчётов показал, что рассчитанные значения показателей устойчивости ниже требуемых, то для удовлетворения требований следует оптимизировать высоты подвеса и диаметры антенн, добавить пространственное разнесение. Если по предварительным расчётам требуемая пропускная способность не обеспечена, необходимо обосновать расчётным путём выбор подходящего способа повышения пропускной способности, например, ХРПС, агрегации несущих и другие.

Вместе с тем существуют некоторые задачи расчёта РРЛ, которые следует отметить отдельно.

В исходных данных могут отсутствовать параметры диапазона и типа

оборудования, а задача проектирования состоит в том, чтобы по результатам расчёта РРЛ обосновать те диапазоны и тип оборудования, использование которых способствует выполнению требований для заданного качества.

Следующей задачей, которую следует выделить отдельно в проектировании РРЛ, является случай, когда в качестве исходных данных фигурируют только начальные и конечные точки РРЛ, а места развёртывания ретрансляционных пунктов РРИ и их количество требуется определить в зависимости от наличия инфраструктуры. Задача такого типа является наиболее сложной и её возможно решить только с применением специализированного ПО, которое обладает функциональными возможностями для поиска мест ретрансляционного пункта на основе анализа рельефа и характеристик местных предметов, а также анализа наличия необходимой инфраструктуры (электропитание, готовые антенно-мачтовые сооружения, наличие точки доступа к ВОЛС, подъездные пути для монтажа и обслуживания, охрана и др.).

Предлагаемая методика расчёта РРЛ с АМ предусматривает вышеупомянутые варианты постановки задачи и является дополнением к уже существующим методикам расчёта РРИ. Обобщённая схема предлагаемого алгоритма представлена на рисунке 4.1 бирюзовыми блоками и предполагает следующую последовательность действий.

1. Задание исходных данных для режима АМ с n уровнями: точки размещения оконечных РРИ, требуемые пропускная способность и коэффициент устойчивости. Если предусмотрены, задаются промежуточные точки ретрансляционных РРИ, используемая частота, доступная ширина полосы, тип антенны, параметры фидерного тракта, режимы работы отдельных РРС с АМ, каждый из которых включает в себя мощность передатчика, тип модуляции, скорость передачи, чувствительность приёмника, а также используемые на интервалах меры по обеспечению требуемой пропускной способности: *XPIС*, агрегация несущих, *SDB* и др.

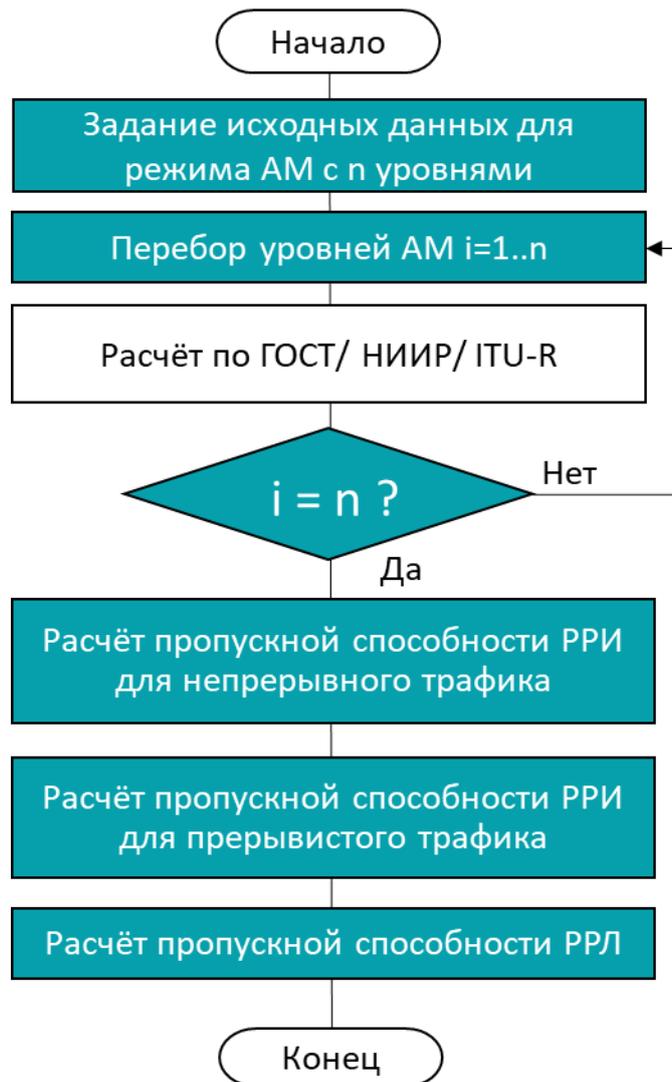


Рисунок 4.1 – Алгоритм предлагаемой методики расчёта РРЛ с АМ

2. Перебор уровней АМ $i=1..n$: производится расчёт показателей качества по ошибкам и по неготовности, а также расчёт скорости для каждого режима работы АМ. При этом для классического *Common Band* производится расчёт в соответствии с общепринятыми методиками (ГОСТ, НИИР, рекомендации *ITU-R 530*), а для расчёта влияния осадков в диапазоне *E-band* используется предложенный метод моментов, описанный в 3-м разделе.

3. По достижении максимального уровня используемой модуляционной схемы АМ формируется таблица результатов расчёта для каждого режима.

4. Расчёт пропускной способности РРИ для непрерывного приоритетного трафика происходит по модели, предложенной в разделе 2:

$$C_{\text{max приор}} = \max_{i=1, n} C_i | P_{н.i} \leq P_{н.тр} \quad (4.1)$$

5. Расчёт пропускной способности РРИ для прерывистого неприоритетного трафика происходит также по модели, предложенной в разделе 2:

$$C_{\text{ср. неприор}} = \sum_{i=1}^n C_i (F(V_{i+1}) - F(V_i)) = \sum_{i=1}^n C_i (P_{н.i+1} - P_{н.i}) \quad (4.2)$$

6. Расчёт пропускной способности РРЛ происходит также по модели, предложенной в разделе 2:

$$C_{\text{max, ррл}} = \min_{i=1, N} C_{\text{max, рри.i}} \quad (4.3)$$

При этом, коэффициент неготовности РРЛ составляет:

$$P_{н.ррл} \approx \sum_{i=1}^N P_{н.рри.i} \quad (4.4)$$

Если в РРЛ используются РРИ с двумя типами трафика одновременно, то согласно модели, предложенной в разделе 2, пропускная способность агрегированного трафика рассчитывается как:

$$C''_{\text{ср агрегр}} = \sum_{i=j}^n (C_i - C'_{\text{тр}}) (F(V_{i+1}) - F(V_i)) = \sum_{i=j}^n (C_i - C'_{\text{тр}}) (P_{н.i+1} - P_{н.i}) \quad (4.5)$$

Результаты расчёта представляются в виде отчёта, который включает набор исходных данных, требуемые и рассчитанные значения пропускной способности и показателей качества, вывод о пригодности РРИ/РРЛ, профиль интервала, промежуточные результаты расчёта. Ввиду сложности расчёта, как правило, применяется специализированное ПО, которое позволяет моделировать РРИ/РРЛ в заданном географическом регионе, выполнять расчёт и формировать отчёты с результатами в требуемом виде.

4.2 Программная реализации разработанной методики в составе программного комплекса *ONEPLAN RPLS-DB Link*

Стремительное развитие технологий передачи данных в транспортном сегменте СПС на основе РРЛ, с одной стороны, позволяет обеспечить высокую пропускную способность сетей связи, с другой стороны, комбинирование различных технологий увеличения пропускной способности на радиорелейной станции требует соответствующего непрерывного совершенствования автоматизированных программных комплексов планирования и оптимизации РРЛ, которые способны обеспечить поддержку принятия своевременного и обоснованного решения на этапе проектирования РРЛ.

Для увеличения точности расчёта современных РРЛ требуется учитывать режим работы РРС с адаптивной модуляцией, а также иметь возможность оценить доступную пропускную способность РРЛ при заданных условиях её функционирования. В связи с этим была выполнена программная реализация предложенной в данной работе методики расчёта пропускной способности РРЛ с адаптивной модуляцией. Предложенная методика нашла отражение в зарегистрированной программе «Расчет радиорелейных интервалов с адаптивной модуляцией» [75] и реализована в программной комплексе *ONEPLAN RPLS-DB*. Целевое назначение *ONEPLAN RPLS-DB* – поддержка принятия своевременных и обоснованных решений по долгосрочному и оперативному планированию связи, созданию условий для безотказной работы радиосвязи, обеспечению требуемой зоны радиопокрытия, заданной устойчивости линий беспроводного радиодоступа и радиорелейных линий, а также пропускной способности транспортных сетей связи на основе автоматизации выполнения расчётных задач [20].

Применение программного комплекса *ONEPLAN RPLS-DB* [20] для автоматизированного проектирования сетей подвижной и фиксированной радиосвязи является наиболее популярным в Российской Федерации (РФ): четвёрка всех крупных операторов РФ планирует РРЛ с помощью данного

программного комплекса. Федеральными операторами успешно построено в совокупности около 610 000 РПИ, рассчитанных с помощью программного комплекса *ONEPLAN RPLS-DB*.

Программный комплекс *ONEPLAN RPLS-DB* [20] может устанавливаться на ноутбук или планшет для обеспечения отдельного автоматизированного рабочего места или оснащать сервера приложений и баз данных для удалённой работы множества пользователей [20]. Программный комплекс *ONEPLAN RPLS-DB* позволяет выполнять ряд необходимых задач планирования развёртывания сетей подвижной и фиксированной радиосвязи:

- определение мест развёртывания элементов сетей подвижной радиосвязи и беспроводного широкополосного доступа выбранных технологий для обеспечения зоны радиопокрытия заданной площади, формы и конфигурации с учётом вида и интенсивности трафика, особенностей рельефа, застройки, растительности и климатических параметров региона;

- построение профилей радиорелейных интервалов с учётом географических и радиоклиматических особенностей района и оценка пригодности интервалов для обеспечения связи требуемого качества и устойчивости;

- поиск оптимальных основных и резервных маршрутов на транспортных сетях с учётом загрузки участков сети и поиск альтернативных маршрутов при перегрузке линий.

Для выполнения указанных задач в состав ПК *ONEPLAN RPLS-DB* входят модульные структуры, что позволяет удобно формировать конфигурации ПО под решение конкретных задач:

- *ONEPLAN RPLS-DB*: сбор, загрузка, редактирование, обновление, хранение исходных данных, взаимодействие с БД и информационными системами, интеллектуальные конвертеры данных, подготовка цифровых моделей местности [20];

- *ONEPLAN RPLS-DB RFP*: радиочастотное планирование аналоговых и цифровых систем радиосвязи и беспроводного широкополосного доступа в диапазоне частот от 30 МГц до 60 ГГц, модели топологии сети радиодоступа,

оборудования БС и трафика, анализ радиопокрытия сети и интерференции, расчёт частотно-территориального плана, анализ измерений радиосигналов, автоматическая оптимизация пространственно-технических параметров сети;

- *ONEPLAN RPLS-DB Link*: планирование и оптимизация радиорелейной связи типа «точка-точка» и «точка-многоточка» в диапазоне частот от 100 МГц до 350 ГГц, модели сети радиорелейной связи, оборудования РРС и условий распространения радиоволн, расчёт РПИ и РПЛ по всем имеющимся методикам, расчёт частотно-территориального плана и внутрисистемной ЭМС, оптимизация параметров РРС, автоматический подбор оборудования, отчёты;

- *ONEPLAN RPLS-DB TE (Traffic Engineering)*: модели транспортной сети, конечных и транзитных элементов, логическая структура *TDM/IP/MPLS / Ethernet* на уровне потоков данных, поиск основных и резервных маршрутов на сети, расчёт ёмкости и пропускной способности [20].

Следует отметить, что в модуле *ONEPLAN RPLS-DB Link* уже предусмотрены инструменты учёта характеристик РРС с различными уровнями адаптивной модуляции, а в модуле *ONEPLAN RPLS-DB TE* имеются инструменты учёта распределения ресурсов пропускной способности сетевых элементов между различными направлениями связи, поэтому данные модули несложно доработать для реализации предлагаемой методики расчёта пропускной способности радиорелейных линий с адаптивной модуляцией.

Кроме этого, выбор модуля *ONEPLAN RPLS-DB Link* для реализации разработанной методики обусловлен тем, что он уже обладает обширными функциональными возможностями, основными из которых являются [19]:

- Диапазон применения от 100 МГц до 350 ГГц, что соответствует тенденциям развития радиорелейной связи;

- Реализовано 5 методов расчёта [72]: 1) фирменная обобщённая методика *ITU-R*, 16 ЦНИИИ (100 МГц – 350 ГГц), 2) Методика НИИР-1998 (2 – 20 ГГц), 3) ГОСТ Р 53363-2009 (3,4 – 40,5 ГГц), 4) *E*-диапазон (60 – 94 ГГц, на основе рек. *ITU*), 5) УКВ (100 МГц – 4 ГГц, методика 16 ЦНИИИ), чем обеспечивается соответствие практически всем нормативным документам, используемым в отрасли, высокая

достоверность результатов, обоснованность принимаемых решений, т.е. минимизация технических и финансовых рисков;

- Полнофункциональная поддержка планирования систем радиодоступа «точка-точка» и «точка-многоточка»;
- Всесторонняя поддержка известных систем координат ГСК-2011/СК-95/СК-42/WGS-84, без переназначения системы координат в программном комплексе;
- Автовыбор и нормировка показателей качества цифровых радиорелейных линий (ЦРРЛ) в соответствии с руководящими документами отрасли;
- Автооценка пригодности ЦРРЛ по совокупности показателей качества реализует принцип «нажал кнопку Расчёт – получил ответ Пригоден/Не пригоден»;
- Расчёт показателей качества многопролётных ЦРРЛ обеспечивает оценку пригодности трактов «из конца в конец» в соответствии с требованиями руководящих документов отрасли;
- Автозагрузка радиоклиматических параметров местности и автопроверка параметров оборудования обеспечивают защиту от ошибок при подготовке исходных данных (ИД) для расчета;
- Автопоиск площадок для размещения РРС: встречный поиск, поиск по карте *Line-Of-Sight (LOS)*, поиск по матрице связности;
- Поддержка любого оборудования РРС, режима работы и конфигурации, включая: разнесение, адаптивная модуляция *AMR*, функции настройки типа модуляции [72].

Работа по расчёту радиорелейных линий в модуле *ONEPLAN RPLS-DB Link* начинается с создания модели РРИ. Для этого на карте выбирается точка расположения РРИ и с помощью обширных справочников задаются технические параметры РРС.

В рамках данной реализации интерфейс был доработан для учёта адаптивной модуляции и состоит из вкладок ввода исходных данных, результатов расчёта и визуализации рассчитанного интервала. После заполнения полей вкладки исходных данных техническими параметрами используемой аппаратуры, задания требуемых значений для коэффициентов пригодности интервала и запуска расчёта

пользователь получает прогнозируемые значения на вкладке результатов расчёта, а также визуализацию результата расчёта на профиле интервала (рисунок 4.2) и в табличном виде (рисунок 4.3).



Рисунок 4.2 – Визуализация результата расчёта на профиле интервала

Результаты расчета													
Уровни модуляции	Скорость передачи [Mbit/s]	Пригодность	Уровень сигнала [dBm]	KNG треб [%]	KNG [%]	KNG мин в год	SESR треб [%]	SESR [%]	Запас на замирания [dB]	К простоя	Т нег.ч. i	Т раб.ч. i	Т раб.ч.i
4	113	✓	-25.4	0.01250	0.00001	0	0.00600	0.00015	58.11	0.00016414	0.01438	0.00458	0.00005
16	227	✓	-28.4	0.01250	0.00001	0	0.00600	0.00021	48.61	0.00021638	0.01895	0.00779	0.00009
32	284	✓	-29.4	0.01250	0.00001	0	0.00600	0.00030	44.61	0.00030534	0.02675	0.01289	0.00015
64	341	✓	-29.4	0.01250	0.00001	0	0.00600	0.00044	41.61	0.00045243	0.03963	0.02571	0.00029
128	398	✓	-29.4	0.01250	0.00001	0	0.00600	0.00074	38.61	0.00074592	0.06534	0.07793	0.00089
256	456	✓	-30.4	0.01250	0.00001	0	0.00600	0.00163	37.11	0.00163549	0.14327	0.27995	0.00320
512	510	✓	-32.4	0.01250	0.00001	0	0.00600	0.00482	29.61	0.00483122	0.42321	0.88527	0.01011
1024	559	□	-33.4	0.01250	0.00001	0	0.00600	0.01493	24.61	0.01493701	1.30848	1.95741	0.02234
2048	620	□	-33.4	0.01250	0.00001	0	0.00600	0.03727	20.61	0.03728190	3.26589	8 756.73411	99.96272

Скорость приоритетного потока, V _{пр} , Mbit/s	456	Расчет скорости
Средняя скорость неприоритетного потока, V _{ср} , Mbit/s	164.0	
Полоса частот для режима AMR, B, MHz	56	Сохранить
Конфигурация оборудования	1+0	

Рисунок 4.3 – Учёт адаптивной модуляции в интерфейсе на основе предложенной методики

В дополнение интерфейса вошли параметры, представленные на рисунке 4.3: К простоя – коэффициент простоя в процентах, Т нег.ч. i – время неготовности i -й модуляционной схемы в течение года в часах, Т раб.ч. i – время работы i -й

модуляционной схемы в течение года в часах, T раб.% i – время работы i -й модуляционной схемы в процентах.

Коэффициент простоя предлагается рассчитывать по формуле:

$$K_{\text{прост}_i} = K_{\text{нг}_i} + SESR_i - 0,01(K_{\text{нг}_i} \cdot SESR_i) \quad (4.6)$$

где $K_{\text{нг}_i}$ – коэффициент неготовности i -й модуляционной схемы, использующейся при адаптивной модуляции;

$SESR_i$ - коэффициент сильнопоражённых секунд при использовании i -й модуляционной схемы.

Зная коэффициент простоя $K_{\text{прост}_i}$ для каждой модуляционной схемы, предлагается найти время простоя, измеряемое в часах:

$$T_{\text{нег.ч}_i} = \frac{K_{\text{прост}_i} \cdot N_{\text{год}}}{100} \quad (4.7)$$

где $N_{\text{год}}$ – количество часов в году.

Время работы i -й модуляционной схемы в течение года в часах может быть найдено по формуле:

$$T_{\text{раб.ч}_i} = \frac{T_{\text{раб.}\%i} \cdot N_{\text{год}}}{100} \quad (4.8)$$

где $T_{\text{раб.}\%i} = K_{\text{прост}_{i+1}} - K_{\text{прост}_i}$ для всех схем модуляции кроме высшей в используемой адаптивной модуляции, для высшей схем модуляции $T_{\text{раб.}\%i} = 100 - K_{\text{прост}_{i-1}}$.

Также в результате программной реализации была добавлена функция определения скоростей приоритетного и неприоритетного потока согласно математической модели РРЛ с АМ, описанной во 2-м разделе (рисунок 4.4).

Скорость приоритетного потока, $V_{пр}$, Mbit/s	456	Расчет скорости
Средняя скорость неперитетного потока, $V_{ср}$, Mbit/s	164.0	
Полоса частот для режима AMR, B , MHz	56	Сохранить
Конфигурация оборудования	1+0	

Рисунок 4.4 – Реализация функции определения скоростей приоритетного и неперитетного потока

Скорость приоритетного потока $C_{пр}$ задаётся согласно требованиям к приоритетному потоку РРЛ, а средняя скорость неперитетного потока $C_{ср}$ находится по формуле [75, 76]:

$$C_{ср} = \sum_{i=i_{пр}}^N C_i \cdot \max(K_{прост_{i+1}} - K_{прост_i}, 0) - C_{пр} \quad (4.9)$$

где $i_{пр}$ – индекс (номер) скорости приоритетного потока $C_{пр}$.

Таким образом, благодаря использованию модуля *ONEPLAN RPLS-DB Link* или всего комплекса *ONEPLAN* можно получить численные значения характеристик РРЛ с адаптивной модуляцией. За счёт встроенных функций автоматического расчёта предоставляется возможность оптимизировать режимы работы РРС, что в свою очередь позволяет повысить устойчивость функционирования РРЛ с адаптивной модуляцией.

В следующем подразделе 4.3 приводятся предложения по программной реализации разработанного метода расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне.

4.3 Предложения по программной реализации разработанного метода расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне

Основным фактором, влияющим на затухание волн миллиметрового диапазона, является наличие дождей. Метод расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом интенсивности дождей был предложен в разделе 3, где по критерию Колмогорова была доказана точность расчёта РРЛ по сравнению с существующими методиками. В связи с этим предлагается включить параметры учёта дождя в программную реализацию для осуществления автоматического расчёта РРЛ с адаптивной модуляцией.

Исходными данными для расчёта являются параметры: Интенсивность дождя; Вероятность наличия дождя; Ослабление сигнала в дожде; Статистическая дисперсия ослабления в дожде. Эти данные являются статистическими и в представленном на рисунке 4.5 расчётном примере были получены для конкретного региона, где была установлена РРС. Для проведения расчёта в других регионах следует использовать соответствующие климатические параметры для наихудшего месяца по дождям и тематические карты, которые предлагается построить на основе данных Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды¹³.

На рисунке 4.5 представлен интерфейс программы *ONEPLAN RPLS-DB Link* с использованием в расчёте параметров, учитывающих наличие дождей в диапазоне *E-Band*. Рассчитанными параметрами являются значения *alpha*, *beta* и *delta*, которые были получены предложенным в разделе 3 методом моментов.

¹³URL: <http://meteo.ru/egfd> / (дата обращения: 28.12.2023)

☐ 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 ²	3.099
9.Рассчитанное значение alpha	0.043
10.Рассчитанное значение beta	0.175
11.Рассчитанное значение delta	2.781
ВВЕР норм [%]	0

Рисунок 4.5 – Предложения по программной реализации учёта затухания в дожде в миллиметровом диапазоне волн *E-Band*

Конечным результатом расчёта РПИ, работающего в диапазоне миллиметровых волн *E-Band* с адаптивной модуляцией, являются коэффициент готовности (%) и определение его пригодности согласно заданному требованию по коэффициенту ошибок *BER* и доступному запасу на замирания (дБ). Результат расчёта примера РПИ, представленного на рисунке 4.5, показан на рисунке 4.6.

E-диапазон	
<input checked="" type="checkbox"/> Учёт пассивных элементов	
BER треб	10^{-6}
Запас на замирания [dB]	34.47
K готовности %	99.99967
Пригодность	пригоден

Рисунок 4.6 – Результат расчёта с учётом наличия дождя в радиорелейном интервале с адаптивной модуляцией

Используя предлагаемый метод учёта осадков в миллиметровом диапазоне волн в программном комплексе *ONEPLAN RPLS-DB Link* при расчёте РПИ, можно предпринять обоснованные меры по повышению пропускной способности (например, применение оборудования с более высокими уровнями модуляции, переход на другие диапазоны частот, использование более широкополосных сигналов, обоснование применения технологий *XPIC*, *SDB* и агрегации несущих, изменение высоты подвеса антенны). Соответствующие предложения по повышению пропускной способности описаны в следующем подразделе 4.4.

4.4 Предложения по повышению пропускной способности за счёт использования радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в транспортном сегменте сетей подвижной связи

На основе результатов расчёта по разработанной методике предлагается на этапе планирования РРЛ количественно оценивать возможность применения способов повышения пропускной способности. Как отмечалось в подразделе 1.2, для повышения пропускной способности РРЛ используются такие способы, как *XPIC*, *SDB*, спаренные интервалы, агрегация несущих. Учёт особенностей этих способов в расчёте позволит достичь максимально возможной пропускной способности, 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. Такой подход позволит повысить общую пропускную способность РРЛ с АМ в заданных условиях функционирования.

Расчёт пропускной способности и коэффициента неготовности с учётом поляризационного разнесения с компенсацией взаимных помех *XPIC* следует проводить отдельно для каждой поляризации. Коэффициент неготовности рассчитывается соответствии с формулой (4.4). Полученные результаты расчёта пропускной способности для вертикальной C_v и горизонтальной C_r поляризации складываются, что определяет максимально возможную скорость РРЛ с АМ при использовании технологии *XPIC* C_{XPIC} :

$$C_{XPIC} = C_v + C_r \quad (4.10)$$

Подобным образом учитывается применение спаренных интервалов и агрегация несущих.

При спаренных интервалах поток данных на РРЛ распределяется между двумя различными диапазонами. Расчёт пропускной способности и коэффициента неготовности с учётом разнесения на спаренных интервалах следует проводить для каждого диапазона отдельно. Коэффициент неготовности рассчитывается соответствии с формулой (4.4). Полученные результаты расчёта пропускной способности для первого $C_{\text{диап}_1}$ и второго $C_{\text{диап}_2}$ диапазона складываются, что определяет максимально возможную скорость РРЛ с АМ при использовании спаренных интервалов $C_{\text{спар_диап}}$:

$$C_{\text{спар_диап}} = C_{\text{диап}_1} + C_{\text{диап}_2} \quad (4.11)$$

При агрегации несущих поток данных на РРЛ передаётся одновременно различными несущими. Расчёт пропускной способности и коэффициента неготовности с учётом агрегации несущих следует проводить для каждой несущей отдельно. Коэффициент неготовности рассчитывается в соответствии с формулой (4.4). Полученные результаты расчёта пропускной способности для каждой несущей $C_{\text{нес}_1}$ и $C_{\text{нес}_2}$ складываются, что определяет максимально возможную скорость РРЛ с АМ $C_{\text{агрег}}$:

$$C_{\text{агрег}} = C_{\text{нес}_1} + C_{\text{нес}_2} \quad (4.12)$$

Также для повышения пропускной способности РРЛ используется технология *SDB (Super Dual Band)*, которая заключается в объединении частотных стволов РРЛ миллиметрового диапазона *E-Band* и классического диапазона, который в технической литературе получил название *Common-Band*. Схема работы технологии объединения частотных стволов *SDB* показана на рисунке 4.7. Для расширения пропускной способности поток данных на передаче между двумя РРС разделяется блоками *ODU (Outdoor Unit)* на две части: приоритетный поток

передаётся в классическом диапазоне волн (*Common-Band*), а неприоритетный поток – в миллиметровом диапазоне (*E-band*). В элементе *IDU* (*Indoor Unit*) оба потока объединяются в один и передаются в дальнейшую сеть как единый поток. В качестве приоритетного потока определены сигналы управления, передача речи и видео в реальном времени. Остальные типы данных могут передаваться в неприоритетном потоке.

Выбор описанного разделения между частотными стволами обусловлен следующим. Большая пропускная способность ширины полосы сигнала в миллиметровом диапазоне способна обеспечить высокую скорость передачи данных, однако за счёт сильной подверженности сигнала этого диапазона затуханиям в дождях, при использовании технологии *SDB* в нём не назначают передачу приоритетного потока данных. Наоборот, в классическом диапазоне волн (*Common-Band*) такая подверженность отсутствует, поэтому значение пригодности выше, чем в диапазоне *E-band*, и в нём может быть гарантирована высокая устойчивость работы РРЛ, в связи с этим ему назначают передачу приоритетного потока данных.



Рисунок 4.7 – Схема работы технологии объединения частотных стволов *SDB*

Чтобы использовать возможности технологии *SDB* по повышению пропускной способности в полной мере, в программной реализации при расчёте интервалов с адаптивной модуляцией также необходимо проводить сегментацию расчёта между приоритетным и неприоритетными потоками с учётом их взаимозависимости. Это позволит сделать верные выводы о пригодности как каждого потока, так интервала и линии в целом, принять верное решение в выборе

максимально возможной градации скорости для каждого потока, сохранив при этом качество передачи и достигнув максимально доступной пропускной способности в радиорелейном интервале.

Для приоритетного потока значения $K_{\text{нг}_{\text{пр}}}$ и $SESR_{\text{пр}}$ должны отображаться в результатах расчёта наряду со значением заданной скорости приоритетного потока, и по ним должны делаться выводы о пригодности интервала после сравнения с требуемыми значениями $K_{\text{нг}_{\text{треб}}}$ и $SESR_{\text{треб}}$. Соответственно, в отдельном поле должны указываться значения скорости $C_{\text{ср}}$, коэффициентов устойчивости $K_{\text{нг}_{\text{нпр}}}$ и $SESR_{\text{нпр}}$ неприоритетного потока, а также признак пригодности интервала на данной скорости.

Расчёт $K_{\text{нг}_{\text{пр}}}$ и $SESR_{\text{пр}}$ для приоритетного потока с фиксированной заданной скоростью $C_{\text{пр}}$ при использовании двух спаренных интервалов (на которых предварительно рассчитываются значения $K_{\text{нг}_{\text{пр.1}}}$ и $SESR_{\text{пр.2}}$ и $K_{\text{нг}_{\text{пр.1}}}$ и $SESR_{\text{пр.2}}$ предлагается выполнять по следующим формулам:

$$K_{\text{нг}_{\text{пр}}} = 0,01 \cdot K_{\text{нг}_{\text{пр.1}}} \cdot K_{\text{нг}_{\text{пр.2}}} \quad (4.13)$$

$$SESR_{\text{пр}} = 0,01 \cdot SESR_{\text{пр.1}} \cdot SESR_{\text{пр.2}} \quad (4.14)$$

Расчёт средней скорости $C_{\text{ср}}$ неприоритетного потока при использовании двух спаренных интервалов предлагается выполнять по формуле:

$$C_{\text{ср}} = C_{\text{ср.1}} + C_{\text{ср.2}} \quad (4.15)$$

где $C_{\text{ср.1}}$ и $C_{\text{ср.2}}$ – средние скорости неприоритетных потоков на интервале *E-band* и *Common-Band*, соответственно, рассчитанные по формуле, учитывающей возможность использования нижних градаций скорости на одном интервале, когда приоритетный поток передаётся по другому интервалу.

Предложенный подход к расчёту был реализован в программном обеспечении *ONEPLAN RPLS-DB Link*. Результат предложенного расчёта, выполненного на интерфейсе *ONEPLAN RPLS-DB Link* представлен на рисунке 4.8.

№	Тип РРЛ	Название РРЛ	Тип потока	Скорость потока, [Mbit/s]	SESR [%]	Кнг [%]	КНГ мин в год	SESR треб [%]	Кнг треб [%]	Полоса [MHz]	Длина РРЛ [м]	Диапазон [GHz]	Пригодность
1	Common-Band	SDB-Common Клн-Балт	Приоритетный	212.0	0.00005	0.00001	0	0.00600	0.01250	56	3 867	38	пригоден
2	Common-Band	SDB-Common Клн-Балт	Неприоритетный	244.0	0.00005	0.00001	0	0.00600	0.01250	56	3 867	38	пригоден
3	E-Band	SDB-1 Клн-Балт	Неприоритетный	3 761.8	0.00001	0.00870	46	0.00600	0.01250	125	3 867	80	пригоден
4	SDB (Super Dual Band)		Неприоритетный	4 005.8	0.00006	0.00871	46	0.00600	0.01250				пригоден

Рисунок 4.8 – Сегментированный расчёт для приоритетного и неприоритетного потоков с применением технологии *SDB* на ПО *ONEPLAN RPLS-DB Link*

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.

4.5 Выводы по четвертому разделу

1. Отличительной особенностью разработанной методики расчёта пропускной способности радиорелейной линии с АМ при её планировании и оптимизации 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.

2. Разработанная методика позволяет проводить расчёт множества коэффициентов неустойчивости для всех поддерживаемых уровней модуляции, на основании которых оцениваются коэффициенты неустойчивости для непрерывного трафика с постоянной скоростью и для прерывистого трафика с переменной адаптивно переключаемой скоростью.

3. Разработанная методика позволяет проводить расчёт средней величины общей скорости агрегированного потока, состоящего из непрерывного и прерывистого трафиков, на основе рассчитанного множества коэффициентов неустойчивости для всех поддерживаемых уровней модуляции.

4. Разработанная методика позволяет оценить пропускную способность и коэффициенты неготовности для отдельных РРИ и для всей РРЛ, состоящей из множества РРИ.

5. Программная реализация разработанной методики расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в составе ПО *ONEPLAN RPLS-DB Link* позволяет проводить автоматизированный расчёт пропускной способности и параметров устойчивости $K_{нг}$, $SESR$, $K_{прост}$, $T_{нег.ч}$, $T_{раб.ч}$ при планировании и оптимизации радиорелейных линий с адаптивной модуляцией в различных условиях применения.

6. Разработаны предложения по повышению пропускной способности, которые включают в себя численное обоснование применения максимально возможного уровня модуляции на заданных РРИ/РРЛ в соответствии с условиями распространения радиоволн во всех одновременно используемых диапазонах (*SDB*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целями исследования в диссертационной работе решена актуальная задача, сформулированная во введении.

Основные результаты исследования заключаются в следующем.

При решении научной задачи разработаны:

1. Математическая модель радиорелейной линии (РРЛ) с адаптивной модуляцией (АМ).
2. Метод расчёта пропускной способности РРЛ с АМ с учётом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне.
3. Методика расчёта пропускной способности РРЛ с АМ при планировании и оптимизации радиорелейных линий в различных условиях применения.

Научная новизна первого научного результата заключается в том, что разработанная математическая модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией 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 РРС и параметров условий распространения радиоволн, характеризующихся быстрыми и медленными замираниями в используемых диапазонах волн.

Теоретическая значимость первого научного результата заключается в дальнейшем развитии и совершенствовании методов моделирования РРЛ, мультисервисных сетей связи, построенных на РРЛ с АМ, в виде согласованной совокупности математических зависимостей показателей достоверности, устойчивости и пропускной способности данных сетей от заданных параметров обслуживаемого мультимедийного трафика, контролируемых параметров нестационарных условий распространения радиоволн и управляемых параметров алгоритмов адаптивной модуляции.

Практическая значимость первого научного результата заключается в возможности использования разработанной математической модели для обоснования

новых технологических решений в области адаптивных пакетных радиорелейных линий. Кроме того, данная модель может быть использована сотрудниками телекоммуникационных компаний, выполняющими расчёты характеристик проектируемых РРЛ с АМ для обоснования целесообразности предлагаемых ими решений.

Научная новизна второго научного результата заключается в том, что разработанный метод расчёта пропускной способности радиорелейной линии с АМ в отличие от известных опирается на новое более точное математическое выражение, описывающее распределение вероятностей глубины замираний в миллиметровом диапазоне волн.

Теоретическая значимость второго научного результата заключается в дальнейшем развитии и совершенствовании методов расчёта показателей качества адаптивных радиолиний при прохождении радиосигналов через различные среды.

Практическая значимость второго научного результата заключается в возможности его применения в составе специализированного программного комплекса планирования и оптимизации радиорелейных линий с АМ в миллиметровом диапазоне радиоволн.

Научная новизна третьего научного результата заключается в том, что разработанная методика расчёта пропускной способности радиорелейной линии при планировании и оптимизации РРЛ 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 значимость третьего научного результата заключается в дальнейшем развитии и совершенствовании методов расчёта показателей качества цифровых РРЛ на основе учёта изменения пропускной способности и устойчивости РРЛ с АМ в условиях замираний при обслуживании разноприоритетного трафика с учётом используемых алгоритмов АМ.

Практическая значимость третьего научного результата заключается в том, что разработанная методика расчёта пропускной способности РРЛ с АМ доведена

до программной реализации в составе специализированного программного комплекса, используемого при планировании и оптимизации РРЛ с АМ в различных условиях применения.

Степень достоверности результатов является достаточно высокой и подтверждается совпадением полученных результатов с ранее известными аналитическими результатами для типовых условий применения, а также с численными результатами измерений, для особых условий, для которых аналитические результаты отсутствовали.

Результаты диссертационной работы реализованы в ООО «ИнфоТел» и использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Получены 1 свидетельство Федеральной службы по интеллектуальной собственности об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2021619677 от 15.06.2021 г. и 1 патент № RU 2783387 от 11.11.2022 г.

Таким образом, результаты, представленные в диссертационной работе, позволяют считать научную и практическую задачи решёнными, а цель исследования – достигнутой. Следовательно, данное исследование можно считать завершённым.

Завершение исследования не закрывает рассматриваемую тему. Радиорелейные линии с АМ как техническая основа транспортного сегмента СПС является объектом непрерывного совершенствования, данная работа не претендует на полноту решения всех вопросов, связанных с процессом устойчивости РРЛ с АМ, но предлагает учёт особенностей работы РРЛ с АМ, отсутствующий ранее. В диссертации рассмотрены наиболее важные, по мнению автора, первоочередные вопросы, которые могут быть приняты для практической реализации, а также определены новые задачи, выявлены пути и направления дальнейших исследований по данной тематике. Основными из них могут являться:

- Продолжение обработки статистических данных с целью уточнения зависимости параметров предложенной функции распределения вероятности замираний от параметров метеоусловий, касающихся осадков, в районе планируемого развёртывания интервалов РРЛ с АМ в диапазоне *E-band*.

- Разработка модели замираний в миллиметровом диапазоне с учётом других метеофакторов (пар, температура, точка росы, порывы ветра, давление, относительная влажность и др.) помимо влияния осадков.

- Исследование вопросов повышения эффективности использования РРЛ с АМ с учётом различных требований к отдельным потокам общего мультимедийного трафика.

- Исследование вопросов использования нескольких маршрутов, в частности, более сложных конфигураций *SDB*.

- Моделирования сети доступа и транспортной сети (*IAB, Integrated Access Backhaul*), функционирующих в одной и той же полосе миллиметрового диапазона волн.

- Получение феноменологической модели для полного закона распределения вероятности замираний в диапазоне *E-Band* на основе уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова с учётом марковского процесса.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АБГШ –	аддитивный белый гауссовский шум
АМ –	адаптивная модуляция
БД –	база данных
ВОЛС –	волоконно-оптические линии связи
ВСС –	взаимоувязанные сети связи
ГОСТ –	государственный стандарт Российской Федерации
ГСК –	государственная система координат
гПа –	гектопаскали
ДМВ –	дециметровые волны
ИД –	исходные данные
Кнг –	коэффициент неготовности
Кнг_треб -	требуемый коэффициент неготовности
ЛОНИИР -	ленинградское отделение Научно-исследовательского института радио
МВ –	метровые волны
мин –	минуты
мм –	миллиметры
ММВ –	миллиметровые волны
м/с –	метры в секунду
МСЭ –	Международный Союз Электросвязи
НИИР –	научно-исследовательский институт радио
ОСШ –	отношение сигнал-шум
ПО –	программное обеспечение
ПЦИ –	плезиохронная цифровая иерархия
РРВ –	распространение радиоволн
РРИ –	радиорелейный интервал
РРЛ –	радиорелейная линия
РРС –	радиорелейная станция
САПР –	система автоматизированного проектирования

СК –	система координат
СКО –	среднеквадратическое отклонение
СМВ –	сантиметровые волны
СПС –	сети подвижной связи
СЦИ –	синхронная цифровая иерархия
ТХ –	технические характеристики
ТЧ –	тональная частота
ФМ –	фазовая модуляция
ФРВ –	функция распределения вероятности
ЦРРЛ –	цифровая радиорелейная линия
ЧМ –	частотная модуляция
ЭМС –	электромагнитная совместимость
<i>3GPP –</i>	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
<i>5GPPP –</i>	<i>5G Infrastructure Public Private Partnership</i>
<i>AMPS –</i>	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
<i>AMR –</i>	<i>Adaptive Multirate</i>
<i>A-QAM –</i>	<i>Adaptive Quadrature Amplitude Modulation</i>
<i>BBU –</i>	<i>Base Band Unit</i>
<i>BCA –</i>	<i>Bands and Carriers Aggregation</i>
<i>BEP –</i>	<i>Bit Error Probability</i>
<i>BER –</i>	<i>Bit Error Rate</i>
<i>BPSK –</i>	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
<i>BSC –</i>	<i>Base Station Controller</i>
<i>BTS –</i>	<i>Base Transceiver Station</i>
<i>CDMA –</i>	<i>Code Division Multiple Access</i>
<i>CU –</i>	<i>Centralized Unit</i>
<i>DAMPS –</i>	<i>Digital AMPS</i>
<i>DU –</i>	<i>Distributed Unit</i>
<i>DU-bb –</i>	<i>Distributed baseband unit</i>

<i>eMBB</i>	–	<i>enhanced Mobile Broadband</i>
<i>eNB</i>	–	<i>eNodeB</i>
<i>ES</i>	–	<i>Errored Second</i>
<i>ETSI</i>	–	<i>European Telecommunication Standards Institute</i>
<i>gNB</i>	–	<i>next generation New radio Base station</i>
<i>GSM</i>	–	<i>Global System for Mobile Communications</i>
<i>HLS</i>	–	<i>High-Layer Split</i>
<i>IAB</i>	–	<i>Integrated Access Backhaul</i>
<i>IDU</i>	–	<i>Indoor Unit</i>
<i>IP</i>	–	<i>Internet Protocol</i>
<i>ITU-R</i>	–	<i>International Telecommunication Union- Radiocommunication Sector</i>
<i>LLS</i>	–	<i>Low-Layer Split</i>
<i>LOS</i>	–	<i>Line-Of-Sight</i>
<i>LTE</i>	–	<i>Long Term Evolution</i>
<i>LTE-A</i>	–	<i>LTE-Advanced</i>
<i>MIMO</i>	–	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
<i>MPLS</i>	–	<i>Multiprotocol Label Switching</i>
<i>MW</i>	–	<i>Microwave</i>
<i>NMT</i>	–	<i>Nordic Mobile Telephony</i>
<i>OAM</i>	–	<i>Orbital Angular Momentum</i>
<i>ODU</i>	–	<i>Outdoor Unit</i>
<i>OFDM</i>	–	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
<i>PDH</i>	–	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>
<i>PmP</i>	–	<i>Point-to-Multipoint</i>
<i>PtP</i>	–	<i>Point-to-Point</i>
<i>TWDP</i>	–	<i>Two-Wave with Diffuse Power</i>
<i>QAM</i>	–	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<i>QPSK</i>	–	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
<i>RNC</i>	–	<i>Radio Network Controller</i>
<i>RRU</i>	–	<i>Remote Radio Unit</i>

<i>RU</i>	–	<i>Radio Unit</i>
<i>SDB</i>	–	<i>Super Dual Band</i>
<i>SDH</i>	–	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
<i>SES</i>	–	<i>Severely Errored Second</i>
<i>SESR</i>	–	<i>Severely Errored Second Rate</i>
<i>TDM</i>	–	<i>Time Division Multiplexing</i>
<i>UMTS</i>	–	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
<i>URLLC</i>	–	<i>Ultra-Reliable Low Latency Communication</i>
<i>VoIP</i>	–	<i>Voice over IP</i>
<i>VoLTE</i>	–	<i>Voice over LTE</i>
<i>WGS</i>	–	<i>World Geodetic System</i>
<i>XPIC</i>	–	<i>Cross-Polarization Interference Compensation</i>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абезгауз, Г.Г. Справочник по вероятностным расчетам / Г.Г. Абезгауз, А.П. Тронь, Ю.Н. Копенкин, И.А. Коровина. – М.: Воениздат, 1970. 536 с.
2. Агишева, Д.К. Математическая статистика: учебное пособие / Д.К. Агишева, С.А. Зотова, Т.А. Матвеева, В.Б. Светличная. – Волгоград: ВолгГТУ, 2010. – 158 с.
3. Беван Д.Н. Сравнительная эффективность сотовых систем связи, использующих адаптивную модуляцию и кодирования, и систем с управлением мощностью / В.Т. Ермолаев, Е.А. Маврычев. // Известия вузов. Радиофизика. – 2001. – Т. 44. – №. 12. – С. 1050-1061.
4. Бонч-Бруевич М.А. Перспективы ультракоротких волн / Радио всем. – 1930. – № 15. – С. 73-74.
5. Бородич С. В. Справочник по радиорелейной связи / Москва: Радио и связь, 1981. – 416 с.
6. Василенко Г.О. Разработка теоретических моделей прогноза уровней сигналов в радиолиниях УВЧ и СВЧ диапазонов и их применение при построении сетей электросвязи: специальность «05.12.07»: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Василенко Г.О.; – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. МА Бонч-Бруевича. – Санкт-Петербург, 2011. – 342 с.
7. Введенский Б.А. Физический энциклопедический словарь / Москва: Советская энциклопедия, 1966. – Т. 5. – 3152 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Москва: Наука, 1969. – 576 с.
9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – Москва: Кнорус, 2018. – 480 с.
10. Волков, Е. А. Методика расчёта радиорелейных и тропосферных линий связи / Е. А. Волков, В. П. Васильев, В. В. Куликов. – Ленинград: ВАС, 1977. – 70 с.

11. ГОСТ 24375-80. Радиосвязь. Термины и определения.
12. ГОСТ 53801-2010. Связь федеральная. Термины и определения.
13. ГОСТ Р 53363-2009. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета.
14. Гребешков А.Ю. Теория и принципы построения единой сети электросвязи РФ / Самара: ФГБОУ ВО Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2017. – 210 с.
15. Данилович О. С. Теория и методы оптимизации радиорелейных линий связи»: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Данилович О. С.; – ЛЭИС. – Ленинград, 1990. – 395 с.
16. Долуханов М.П. Распространение радиоволн / Москва: Издательство Связь, 1972. – 336 с.
17. Дорохов Ф.М. Оптимальное управление ресурсами в радиосистемах / Ф.М. Дорохов, В.П. Постюшков. – Ленинград: ВАС, 1986. – 88 с.
18. Ермолаев В.Т. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета. – 2011. – 368 с.
19. Зайчик Е.М. Автоматизация поддержки принятия решений по планированию и оптимизации радиопокрытия сетей мобильной связи и БШПД специального назначения на основе программного комплекса ОНЕПЛАН РПЛС / Е.М. Зайчик, И.В. Степанец, В.А. Степанец // ВАС Сборник материалов. – 2023. – С. 45-51.
20. Зайчик Е.М. Программный комплекс поддержки принятия решений при планировании сетей связи силовых структур / Е.М. Зайчик, С.М. Одоевский, В.А. Степанец, В.М. Тучин // Первая миля. – 2020. – №. 2. – С. 26-31.
21. Зюко А.Г. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов / Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. – Москва: Связь, 1980. – 288 с.
22. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний / Москва: Связь, 1979. – 296 с.

23. Калинин А. И. Расчет трасс радиорелейных линий / Москва: Связь, 1964. – 248 с.
24. Каменский Н.Н. Разработки в области радиорелейной связи прямой видимости // Электросвязь: история и современность. – 2005. – № 4. – С. 7 - 14.
25. Каневский З. М. Передача информации с обратной связью / Москва: Связь, 1976. – 352 с.
26. Коржик В. И. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений / В.И. Коржик, Л.М. Финк, К.Н. Щелкунов. – Москва: Радио и связь, 1981. – 232 с.
27. Кукк, К.И. Из истории становления отечественной военной радиорелейной и тропосферной связи // Электросвязь: история и современность. – 2008. – № 1. – С. 13-17.
28. Ларин Е.А. Метод расчёта ослабления радиоволн в дожде на приземных трассах // Электросвязь. – 1982. – № 8. – С. 48-54.
29. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая / Москва: Советское радио, 1969. – 752 с.
30. Матье М. Радиорелейные системы передачи / Пер. с фр. Л. О. Мыровой, Г. И. Рыбаковой. – Москва: Радио и связь, 1982. – 280 с.
31. Мешалкин В.А. Основы энергетического расчёта радиоканалов / В.А. Мешалкин, Б.В. Сосунов – Ленинград: ВАС, 1991. – 110 с.
32. Миркин В.В. Эволюция отечественных систем радиорелейной связи / Вестник Томского государственного университета. – 2013. № 372. – С. 120–125.
33. НИИР Методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости в диапазоне частот 2–20 ГГц. Государственный Комитет Российской Федерации по связи и информации. Москва: Инженерный центр, 1998.
34. Одоевский С.М. Проектирование РРЛ: программный комплекс ONEPLAN RPLS / С.М. Одоевский, В.А. Степанец. // Первая миля. – 2016. – № 8. – С. 18-23.
35. Одоевский С.М. Описание и инструкция по использованию комплекса программ расчёта РРЛ (ТРЛ) на СМ, ЭВМ и ПЭВМ / Санкт-Петербург: ВАС, 1993.

36. Ошерович Л. Г. Радиорелейная и тропосферная связь / Л. Г. Ошерович, В.В. Куликов, Е. А. Волков; Под ред. И. П. Леонова. – Ленинград: ВАС, 1972. – 470 с.

37. Ошерович Л.Г. Расчёт радиорелейных и тропосферных линий связи при их планировании и строительстве / Ленинград: ВАС, 1974. – 47 с.

38. Пистолькорс А. А. Михаил Александрович Бонч-Бруевич (Очерк жизни и деятельности) // Собрание трудов. – Москва: Юрайт, 2018. – С. 8-37.

39. Постановление № 1203-47 от 18 сентября 2019 г. Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации. Правительство Российской Федерации.

40. Приказ № 200 от 10 июля 2014 г. Об утверждении Правил применения систем радиорелейной связи. Часть VI. Правила применения цифровых радиорелейных систем связи, передающих пакетные данные. Министерство информационных технологий и связи Российской Федерации.

41. Приказ № 25 от 27 февраля 2007 г. Об утверждении Правил применения систем радиорелейной связи. Часть I. Правила применения цифровых радиорелейных систем связи плездохронной цифровой иерархии. Министерство информационных технологий и связи Российской Федерации.

42. Приказ № 251 от 05 декабря 2012. Об утверждении Правил применения систем радиорелейной связи. Часть V. Правила применения цифровых радиорелейных систем связи, работающих в полосах частот 71-76 ГГц, 81-86 ГГц. Министерство информационных технологий и связи Российской Федерации.

43. Приказ № 26 от 27 февраля 2007 г. Об утверждении Правил применения систем радиорелейной связи. Часть II. Правила применения цифровых радиорелейных систем связи синхронной цифровой иерархии. Министерство информационных технологий и связи Российской Федерации.

44. Приказ №92 РФ от 10 августа 1996 г. об утверждении норм на электрические параметры основных цифровых каналов и трактов магистральной и внутризональных первичных сетей ВСС России. Министерство Связи Российской Федерации.

45. Программный комплекс ONEPLAN RPLS-DB TE планирования и учёта потоков, поиска маршрутов на транспортных сетях связи (автономный модуль) Руководство оператора. RU.ФРМЕ.00005-01 34 01. Санкт-Петербург, 2021.

46. Программный комплекс планирования и оптимизации радиорелейной связи ONEPLAN RPLS-DB Link. Руководство оператора RU.ФРМЕ.00004-01 34 01. – Санкт-Петербург, 2023.

47. Прокис Дж. Цифровая связь / Москва: Радио и связь, 2000 – 800 с.

48. Рекомендация МСЭ-R F.2006 (03/2012). Планы размещения частот радиостволов и блоков радиочастот для систем фиксированной беспроводной связи, действующих в полосах 71–76 и 81–86 ГГц.

49. Рекомендация МСЭ-R F.592-4. Словарь терминов для фиксированной службы (2007).

50. Рекомендация МСЭ-R F.746-10. Планы размещения частот радиостволов для систем фиксированной службы. – 2012.

51. Рекомендация МСЭ-R M.2083-0 (09/2015). Концепция ИМТ – Основы и общие задачи будущего развития ИМТ на период до 2020 года и далее. – 2015.

52. Рекомендация МСЭ-R P.1510-1. Средняя приземная температура. – 2017.

53. Рекомендация МСЭ-R P.453-14. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции. – 2019.

54. Рекомендация МСЭ-R P.525-4. Расчет ослабления в свободном пространстве. – 2019.

55. Рекомендация МСЭ-R P.526-15. Распространение радиоволн за счет дифракции. – 2019.

56. Рекомендация МСЭ-R P.530-17. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости. – 2017.

57. Рекомендация МСЭ-R P.676-13. Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие. – 2022.

58. Рекомендация МСЭ-R P.835-6. Эталонные стандарты атмосферы. – 2017.

59. Рекомендация МСЭ-R P.836-6. Водяные пары: плотность у поверхности Земли и общее объемное содержание. – 2017.

60. Рекомендация МСЭ-R P.837-7. Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения радиоволн. – 2017.

61. Рекомендация МСЭ-T Y.1540. Служба передачи данных по межсетевому протоколу (IP) – Параметры рабочих характеристик переноса и доступности IP-пакетов. – 2019.

62. Рыбакова, Ж. В. Физическая метеорология (отдельные разделы) / Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2013. – 384 с.

63. Савищенко Н. В. Двухлучевая модель с диффузным замиранием мощности сигнала / Дырин В. И., Макаренко В. П. // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2021. – Т. 13. – № 1. – С. 18-23.

64. Савищенко Н. В. Специальные интегральные функции, применяемые в теории связи / Санкт-Петербург: ВАС, 2012. – 560 с.

65. Самохин В. П. Михаил Александрович Бонч-Бруевич (1888 – 1940) // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наука и образование. – 2013. – № 02. – 30 с.

66. Соколов А.В. НИИ Радио: от радиорелейных линий - к спутниковой связи / А.В. Соколов, В.М. Шифрина // Электросвязь. – 1999. – №10.

67. Справочник. Данные о распространении радиоволн для проектирования наземных линий связи пункта с пунктом. ITU-R. – 2008.

68. 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). Сборник научных статей. Радиотехнологии связи. – Т. 3. – №. 11. – С. 371-376.

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. 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.

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

74. 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). – 2018. – С. 279-284.

75. Степанец И.В. Расчёт радиорелейных интервалов с адаптивной модуляцией. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619677 Российская Федерация / И.В. Степанец, В.О. Ключников, С.М. Одоевский ; заявитель и правообладатель Ключников В.О. – № 2021618923 ; заявл. 31.05.2021 ; опубл. 15.06.2021 – 1 с.

76. Степанец И.В. Способ передачи данных между радиорелейными станциями с адаптивной модуляцией. Патент № RU 2783387 / И.В. Степанец, В.О. Ключников, С.М. Одоевский ; заявитель и патентообладатель академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. – № 2022112759 ; заявл. 11.05.2022 ; опубл. 11.11.2022.

77. 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.

78. Украинцев Ю.Д. История связи и перспективы развития телекоммуникаций: учебное пособие / Ю.Д. Украинцев, М.А. Цветов. – Ульяновск: УЛГТУ, 2009. – 128 с.

79. Alouini M.S. Adaptive modulation over Nakagami fading channels / M.S. Alouini, A.J. Goldsmith // *Wireless Personal Communications*. – 2000. – Т. 13. – P. 119-143.

80. Alouini M.S. Adaptive M-QAM modulation over Nakagami fading channels / M.S. Alouini, A. Goldsmith // *Proceedings of the 1997 IEEE Global Telecommunications Mini-Conference*. – IEEE. – 1997. – P. 218-233.

81. Boiocchi G. Next-generation microwave packet radio: Characteristics and evolution areas to support new scenarios in wireless backhauling / G. Boiocchi, P. D. Prisco, A. Lahrech, P. Lopez, M. Moretto, P. Volpato // *Bell Labs Technical Journal*. – 2013. – Т. 18. – №. 2. – P. 143-157.

82. Brychkov Yu.A. Applications of Multiple Hypergeometric Functions in Communication Theory: A New Multiple-Wave Model with Diffuse Power / Yu.A. Brychkov, N.V. Savischenko // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2021. – Т. 42. – P. 1807-1828.

83. Choi B. Optimum mode-switching-assisted constant-power single-and multicarrier adaptive modulation / B. Choi, L. Hanzo // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2003. – Т. 52. – №. 3. – P. 536-560.

84. Choi B.J. Optimum mode-switching assisted adaptive modulation / L. Hanzo, B.J. Choi // *GLOBECOM'01. IEEE Global Telecommunications Conference (Cat. No. 01CH37270)*. IEEE. – 2001. – Т. 6. – P. 3316-3320.

85. Choi B.J. Optimum mode-switching levels for adaptive modulation systems / L. Hanzo // *Submitted to IEEE GLOBECOM 2001*. – 2001.

86. Choi B.J. Performance of Rake receiver assisted adaptive-modulation based CDMA over frequency selective slow Rayleigh fading channels / B.J. Choi, M. Munster, L.L. Yang, L. Hanzo // *Electronics Letters*. – 2001. – T. 37. – №. 4. – P. 247-248.
87. ETSI GR mWT 008 V1.1.1: millimetre Wave Transmission (mWT); Analysis of Spectrum, License Schemes and Network Scenarios in the D-band. – 2018.
88. ETSI GR mWT 012 V1.1.1 (2018-11). 5G Wireless Backhaul/X-Haul. – 2018.
89. ETSI GR mWT 012 V1.1.1: 5G Wireless Backhaul/X-Haul. (2018-11). – 2018.
90. ETSI TR 103 053 V1.1.1 (2014-09) Fixed Radio Systems; Parameters affecting the Signal-to-Noise Ratio (SNR) and the Receiver Signal Level (RSL) threshold in point-to-point receivers; Theory and practice. – 2014.
91. ETSI TR 103 103 v1.1.1: Fixed Radio Systems; Point-to-point systems; ATPC, RTPC, Adaptive Modulation (mixed-mode) and Bandwidth Adaptive functionalities; Technical background and impact on deployment, link design and coordination (2012-09). – 2012.
92. Goldsmith A. J. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels / A.J. Goldsmith, S.G. Chua // *IEEE transactions on communications*. – 1997. – T. 45. – №. 10. – P. 1218-1230.
93. Goldsmith A. *Wireless communications* / Cambridge: Cambridge university press, 2005. – 561 p.
94. Hanzo L. *Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems* / S.X. Ng, W.T. Webb, T. Keller. – IEEE Press-John Wiley, 2004. – 1072 p.
95. Hanzo L. *Single-and Multi-carrier Quadrature Amplitude Modulation: Principles and Applications for Personal Communications, WATM and Broadcasting: 2nd.* / L. Hanzo, W.T. Webb, T. Keller. – IEEE Press-John Wiley, 2000. – 686 p.
96. Hilt A. Availability and Fade Margin Calculations for 5G Microwave and Millimeter-Wave Anyhaul Links // *Applied Sciences*. – 2019. – T. 9. – №. 23. – P. 5240.
97. Himadri S. Performance Evaluation of Two-Hop Wireless Link under Rayleigh and Nakagami-m Fading / Md. Saha, Islam Imdadul, M.R. Amin. // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2012. – T. 2. – №1. – P. 22-27.

98. ITU-R P.1057 Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling, 08/2019. – 2019.
99. ITU-R P.1411-10 Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. 08/2019. – 2019.
100. ITU-R R-HDB-24-1996-PDF-E_Справочник ЦРПЛ. – 1996.
101. ITU-R R-HDB-54-2009-OAS-PDF-R_Справочник РРВ в системах Точка-Точка. – 2009.
102. ITU-R Workshop: Evolution of Fixed Services for WB of IMT 2020/5G. Geneva. – 2019.
103. ITU-T Technical Report (9 February 2018) GSTR-TN5G Transport network support of IMT-2020/5G. – 2020.
104. Kayahara M. xHaul Solution Suite for Advanced Transport Network // NEC Technical Journal: Special Issue on Open Network Technologies. – 2023. – Т. 17. - № 1. – P. 165-168.
105. Li W. 23.1-Gb/s 135-GHz Wireless Transmission Over 4.6-Km and Effect of Rain Attenuation / W. Li; J. Yu; J. Ding; X. Ji; Y. Wang; K. Wang; W. Zhou; F. Zhao; J. Yu // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2023.
106. Liew T.H. Switching threshold and coding-rate optimisation for turbo convolutional and turbo BCH coded adaptive modulation / T.H. Liew, L. Hanzo // The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. – IEEE. – 2003. – Т. 4. – P. 2167-2171.
107. Metsälä E. Mobile Backhaul / E. Metsälä, J. Salmelin. – John Wiley & Sons, 2012. – 376 p.
108. NEC: iPASOLINK EX Advanced. Adaptive Modulation Bandwidth. Operation Sequence. Sep. 2016. – 2016.
109. Peng X. Cross-layer design for adaptive modulation and coding with hybrid ARQ / X. Peng, M. Song, J. Song // 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. IEEE. – 2007. – P. 138-141.

110. Pons J. Bit error rate based link adaptation for GSM / J. Pons, J. Dunlop // Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (Cat. No. 98TH8361). IEEE. – 1998. – T. 3. – P. 1530-1534.
111. Premkumar M. Data Transmission and Reception in Spatial Modulation MIMO Wireless Systems and Analysis in Nakagami-m Fading Channels / M. Premkumar, V.Sachan, B. R. Singh // Traitement du Signal. – 2023. – T. 40. – №. 1. P.401-406.
112. Press W.H. Numerical Recipes in C / W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. – Cambridge University Press, 1992. – 106 p.
113. Proakis J. G. Digital communications. – McGraw-Hill, Higher Education, – 2008. – 928 p.
114. Rapoport T.S. Principle of communication systems simulation with wireless applications / T.S. Rappaport, W.H. Tranter, K.S. Shanmugan, K.L. Kosbar. – New Jersey: Prentice Hall, 2003. – 778 p.
115. Recommendation F.1101. E Characteristics of digital fixed wireless systems below about 17 GHz / ITU-T. – Geneva. – 2002.
116. Recommendation G.821. Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an Integrated Services Digital Network / ITU-T. – Geneva. – 2002.
117. Recommendation G.826. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections / ITU-T. – Geneva. – 2002.
118. Recommendation ITU-R F.1703-0. Availability objectives for real digital fixed wireless links used in 27 500 km hypothetical reference paths and connections. – 2005.
119. Recommendation ITU-R M.2083-0. IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. – 2015.
120. Recommendation ITU-R P.530-18. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. – 2021.

121. Recommendation ITU-R P.676-12. Attenuation by atmospheric gases and related effects. – 2019.
122. Recommendation ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. – 2005.
123. Recommendation ITU-T G.827. Availability performance parameters and objectives for end-to-end international constant bit-rate digital paths (09/2003). – 2003.
124. Recommendation ITU-T I.113. Integrated services digital network. General structure – Terminology (06/97). – 1997.
125. Report ITU-R F.2086-1. Technical and operational characteristics and applications of broadband wireless access in the fixed service. – 2010.
126. Savischenko N.V. Multiple Hypergeometric Functions in Communication Theory: Evaluations of Error Probabilities for Four-Parameter, and Signals Distributions in General Fading Channels / N.V. Savischenko, Y.A. Brychkov // Lobachevskii J Math. – 2022. – № 43, P. 1976–1992.
127. Stepanets I.V. Capacity estimation ways of massive MIMO systems / I. Stepanets, G.A. Fokin, A. Mueller // T-Comm. – 2018. – T. 12. – №. 10. – P. 64-69.
128. 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.
129. Stepanets I. Beamforming Techniques Performance Evaluation for 5G Massive MIMO Systems / I. Stepanets, G. Fokin, A. Müller // CERC. – 2019. – P. 57-68.
130. 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.
131. 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. – T. 351. – P. 01064/1-01064/6.

132. 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.
133. Technical Specification 3GPP TR 21.905 V9.3.0 (2009-09). Vocabulary for 3GPP Specifications (Release 9). – 2009.
134. Technical Specification 3GPP TS 22.261 V17.2.0. Service requirements for the 5G system. Release 17. – 2020.
135. Technical Specification 3GPP TS 25.814 V7.1.0. (2006-09). Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) (Release 7). – 2006.
136. Technical Specification 3GPP TS 25.848 V4.0.0. (2001-03). Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access (Release 4). – 2001.
137. Technical Specification 3GPP TS 38.300 V17.5.0 (2023-06). NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 (Release 17). – 2023.
138. Technical Specification 5G PPP Architecture Working Group. View on 5G Architecture. July. – 2016.
139. Technical Specification 5GPPP Architecture working group. View on 5G Architecture, Version 4.0, October. – 2021.
140. Torabi M. Performance analysis of adaptive M-ary quadrature amplitude modulation for amplify-and-forward opportunistic relaying under outdated channel state information / M. Torabi, J.F. Frigon, D. Haccoun // IET Communications. – 2013. – T. 7. – №. 11. – P. 1163-1175.
141. Torrance J. M. The potential and limitations of adaptive modulation over slow Rayleigh fading channels / J.M. Torrance, D. Didascalon, L. Hanzo // IEE Colloquium on the Future of Mobile Multimedia Communications. – IET. – 1996. – № 248. – P. 10/1-10/6.
142. Torrance J. M. Optimisation of switching levels for adaptive modulation in slow Rayleigh fading / J.M. Torrance, L. Hanzo // Electronics Letters. – 1996. – T. 32. – №. 13. – P. 1167-1169.

143. Torrance J.M. Upper bound performance of adaptive modulation in a slow Rayleigh fading channel / J.M. Torrance, L. Hanzo // *Electronics letters*. – 1996. – T. 32. – №. 8. – P. 718-719.
144. Vrazic Z. Adaptive modulation in microwave networks / Z. Vrazic, D. Zagar, S. Grgic // *ELMAR 2007*. – IEEE. – 2007. – P. 247-250.
145. Webb W.T. Variable rate QAM for data transmissions over Rayleigh fading channels / W.T. Webb, R. Steele // *Proc. Wireless, Calgary, AB, Canada*. – 1991. – P. 1-14.
146. Webb W.T. Variable rate QAM for mobile radio / W.T. Webb, R. Steele // *IEEE Transactions on Communications*. – 1995. – T. 43. – №. 7. – P. 2223-2230.
147. Zhou, T. Ricean K-factor measurements and analysis for wideband high-speed railway channels at 2.35 GHz / T. Zhou, C. Tao, L.I.U. Liu, Z. Tan // *Radioengineering*, 23(2). – 2014. – P. 578-585.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ДЛЯ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Для нахождения вероятности битовой ошибки $P_b(\gamma)$ в АГБШ канале без замираний был проведен анализ работ [47, 64, 93, 94, 95, 113, 126].

Автором *L. Hanzo* [94, 95] приводится функция зависимости битовой ошибки $P_b(\gamma_s)$ от ОСШ γ_s . ОСШ представлен в форме отношения энергии символа на энергию шума:

$$P_b(\gamma_s) = \sum_i A_i Q(\sqrt{a_i \gamma_s}) \quad (\text{A.1})$$

где Q -функция представляет собой функцию распределения хвоста от стандартного нормального распределения Гаусса и может быть выражена через дополнительную функцию ошибки:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (\text{A.2})$$

а коэффициенты $\{A_i, a_i\}$ определены для различных созвездий модуляции M -QAM с $M=2, 4, 16, 64, 256$ следующим образом:

$$\begin{aligned} M = 2, \quad \text{BPSK} & \quad \{(1,2)\} \\ M = 4, \quad \text{QPSK} & \quad \{(1,1)\} \\ M = 16, \quad \text{16-QAM} & \quad \left\{ \left(\frac{3}{4}, \frac{1^2}{5}\right), \left(\frac{2}{4}, \frac{3^2}{5}\right), \left(-\frac{1}{4}, \frac{5^2}{5}\right) \right\} \\ M = 64, \quad \text{64-QAM} & \quad \left\{ \left(\frac{7}{12}, \frac{1^2}{21}\right), \left(\frac{6}{12}, \frac{3^2}{21}\right), \left(-\frac{1}{12}, \frac{5^2}{21}\right), \left(\frac{1}{12}, \frac{9^2}{21}\right), \left(-\frac{1}{12}, \frac{13^2}{21}\right) \right\} \\ M = 256, \quad \text{256-QAM} & \quad \left\{ \left(\frac{15}{32}, \frac{1^2}{85}\right), \left(\frac{14}{32}, \frac{3^2}{85}\right), \left(\frac{5}{32}, \frac{5^2}{85}\right), \left(-\frac{6}{32}, \frac{7^2}{85}\right), \left(-\frac{7}{32}, \frac{9^2}{85}\right), \right. \\ & \quad \left. \left(\frac{6}{32}, \frac{11^2}{85}\right), \left(\frac{9}{32}, \frac{13^2}{85}\right), \left(\frac{8}{32}, \frac{15^2}{85}\right), \left(-\frac{7}{32}, \frac{17^2}{85}\right), \left(-\frac{6}{32}, \frac{19^2}{85}\right), \right. \\ & \quad \left. \left(-\frac{1}{32}, \frac{21^2}{85}\right), \left(\frac{2}{32}, \frac{23^2}{85}\right), \left(\frac{3}{32}, \frac{25^2}{85}\right), \left(-\frac{2}{32}, \frac{27^2}{85}\right), \left(-\frac{1}{32}, \frac{29^2}{85}\right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

При этом точный расчёт коэффициентов $\{A_i, a_i\}$ предполагает определение минимального эвклидова расстояния между точками созвездия сигнала [64, 113], что является очень трудоёмкой процедурой.

Трудоёмкость расчёта по формуле (А.2) заключается в том, что $P_b(\gamma_s)$ разбивается на несколько интегральных функций, с ростом M количество интегральных функций возрастает, при этом коэффициенты $\{A_i, a_i\}$ рассчитываются индивидуально для каждого отдельного интеграла по минимальному евклидову расстоянию между символами внутри созвездия [64, 113]. Поэтому в литературе предлагается использовать различные методы аппроксимации.

Второй способ нахождения вероятности битовой ошибки в канале АГБШ предложен автором *Andrea Goldsmith* и представляет собой аппроксимацию (А.4), которая может быть использована в расчёте для любых уровней M -QAM и проста в применении [93]:

$$P_b(\gamma_b) \approx \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_b \log_2 M}{(M - 1)}} \right) \quad (\text{А.4})$$

$$P_s(\gamma_s) \approx \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M}} Q \left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_s}{(M - 1)}} \right) \quad (\text{А.5})$$

где $\bar{\gamma}_b$ и $\bar{\gamma}_s$ обозначают среднее битовое и символьное ОСШ, соответственно.

Чтобы привести выражения (А.4) и (А.5) к требуемому виду $P_b(\gamma_s)$, необходимо воспользоваться следующими преобразованиями. По общему определению ОСШ – это отношение мощности принимаемого сигнала Pr к спектральной мощности шума N_0 , возникающего в полосе частот B :

$$\gamma = \frac{Pr}{N_0 B} = \frac{E_s}{N_0 B T_s} = \frac{E_b}{N_0 B T_b} \quad (\text{А.6})$$

где E_s – энергия символа;

T_s – длительность символа;

E_b – энергия, приходящаяся на бит;

T_b – длительность бита.

Так как каждый символ содержит в себе количество бит $k = \log_2 M$, соответствующее M -QAM созвездию, то длительности символа и бита находятся во взаимосвязи:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E_s}{N_0 \log_2 M} \quad (\text{A.7})$$

То есть:

$$\gamma_b = \frac{\gamma_s}{\log_2 M} \quad (\text{A.8})$$

Руководствуясь вышеприведёнными преобразованиями из формул (A.4) и (A.5) и тем предположением, что энергия символа равномерно распределена между всеми битами, можно представить $P_b(\gamma_s)$ в нужном виде для любого уровня модуляции M -QAM:

$$P_b(\gamma_s) \approx \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_s}{(M - 1)}} \right) \quad (\text{A.9})$$

Формула (A.9) не ограничивается каким-либо уровнем M , что составляет её преимущество перед первым способом (A.1). Но, поскольку решение (A.9) является аппроксимацией, оно не может обладать той точностью, которую даёт решение первого способа (A.1).

Третий способ нахождения вероятности битовой ошибки в канале АБГШ предложен автором *J.G. Proakis* в [113] и представляет собой также аппроксимацию:

$$P_s(\gamma_b) \approx \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M}} Q \left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_b \log_2 M}{(M - 1)}} \right) \times \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_b \log_2 M}{(M - 1)}} \right) \right) \quad (\text{A.10})$$

Выражение (A.10) преобразовывается к виду $P_b(\gamma_s)$ аналогичным способом:

$$P_b(\gamma_s) \approx \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_s}{(M - 1)}} \right) \times \left(1 - \left(\frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M} \log_2 M} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_s}{(M - 1)}} \right) \right) \quad (\text{A.11})$$

Аппроксимация (A.11) также, как и (A.9), позволяет вычислить вероятность битовой ошибки для любого уровня модуляции M , но не может обладать той точностью, которую даёт решение первого способа (A.1).

Четвёртый способ нахождения вероятности битовой ошибки в канале АБГШ представляет собой точные формулы расчёта, разработанные российским учёным Николаем Васильевичем Савищенко и полученные на основе специальных

интегральных функций для зависимости от битового ОСШ $\bar{\gamma}_b$ [64, 126]. Этот способ является универсальным для любого уровня модуляции квадратного созвездия и выражается формулой:

$$P_b(\gamma_b) = \frac{1}{\log_2 M} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}-1} a_{2j-1} Q \left(\sqrt{\frac{3(2j-1)^2 \log_2 M}{(M-1)} \bar{\gamma}_b} \right) \quad (\text{A.12})$$

где $a_1 = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)$ и для $j = 2, \dots, \sqrt{M} - 1$ выполняется выражение:

$$a_{2j-1} = 4 \left(\frac{1}{2^{U_j+1}} - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) + 4 \sum_{q=0}^{U_j} (-1)^{[\mu_{q,j}]-1} (1 - 2[2\{\mu_{q,j}\}]) \left(\frac{1}{2^{q+1}} - \frac{[\mu_{q,j}]}{\sqrt{M}} \right) \quad (\text{A.13})$$

при этом $U_j = [\log_2(j-1)]$;

$$\mu_{q,j} = \frac{j-1}{2^{q+1}} + \frac{1}{2};$$

$[x]$ – это целая часть числа x ;

$\{x\} = x - [x]$ – это дробная часть числа x .

Формула (A.12) в зависимости от символьного ОСШ $\bar{\gamma}_s$ примет вид:

$$P_b(\gamma_s) = \frac{1}{\log_2 M} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}-1} a_{2j-1} Q \left(\sqrt{\frac{3(2j-1)^2}{(M-1)} \bar{\gamma}_s} \right). \quad (\text{A.14})$$

Результаты расчётов зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал-шум в модуляционном символе SNR_{ymb} по четырём вышеописанным методам представлены в виде графиков на рисунке А.1. В легенде на рисунке способы обозначены по именам их авторов: первый способ предложен автором *L. Hanzo* [94, 95], второй – *A. Goldsmith* [93], третий – *J.G. Proakis* в [113], четвёртый разработан профессором Н.В. Савищенко [64]. Расчёты были проведены аналитическим путем с помощью ПО «*Mathcad*» для модуляционных схем M - QAM с уровнями модуляции $M \geq 64$ - QAM , удовлетворяющими требованиям по пропускной способности СПС 5G. Красным цветом отмечена BER для уровня модуляции 64- QAM , синим – 256- QAM , зелёным – 1024- QAM , чёрным – 4096- QAM .

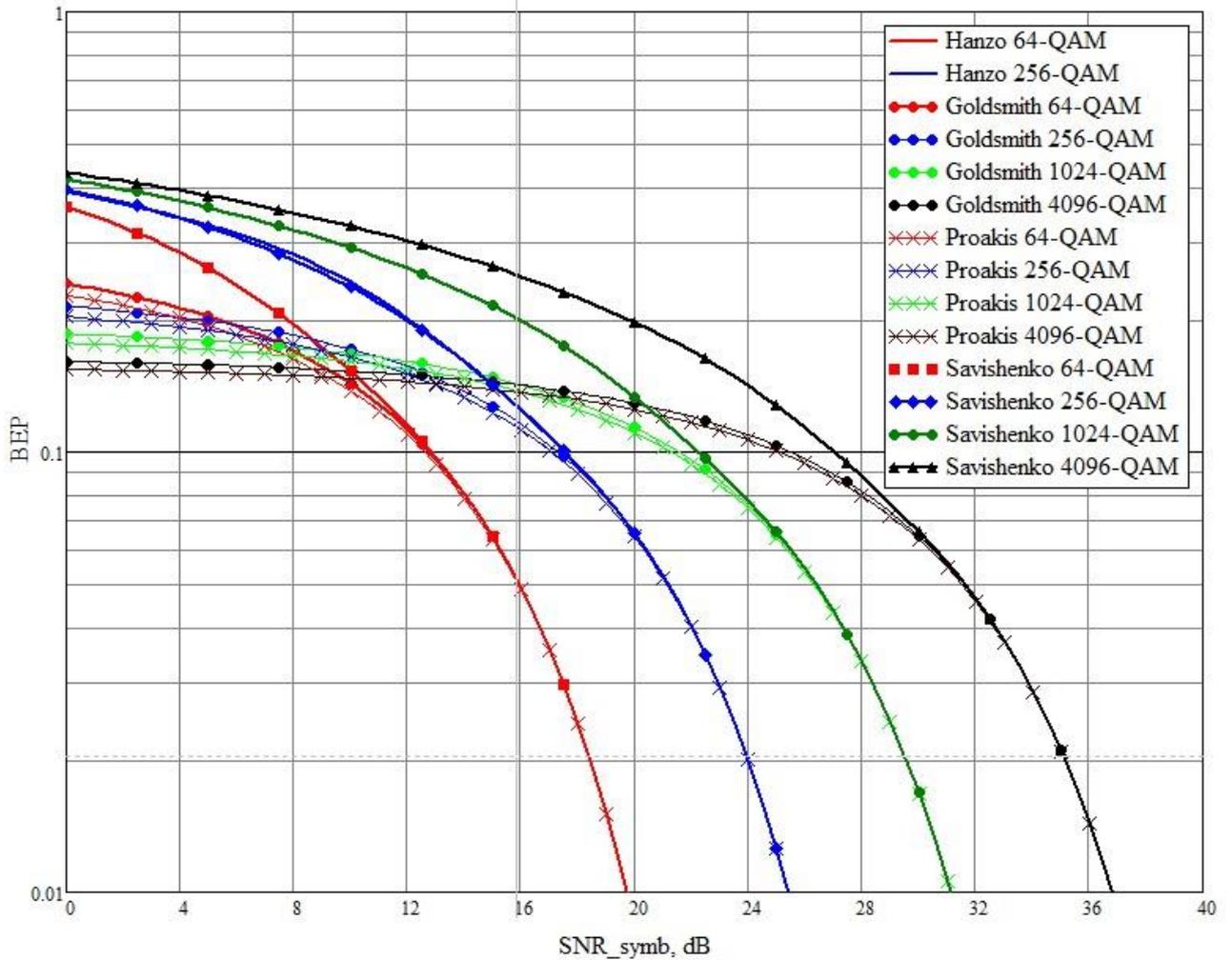


Рисунок А.1 – Результаты расчётов вероятности битовой ошибки, полученные четырьмя различными способами (первый: *Hanzo*, второй: *Goldsmith*, третий: *Proakis*, четвёртый: проф. Н.В. Савищенко)

Известно, что максимальная неопределенность при приёме сигнала возникает, когда вероятность ошибки стремится к 0,5. В этом случае верность и ошибочность принятого сигнала будут равновероятны, то есть вероятность битовой ошибки стремится к 50%. Ожидаемый результат $BER \rightarrow 0,5$ при ОСШ=0 показали только метод профессора Н.В. Савищенко и метод *Hanzo* для доступных в нём модуляционных схем, что ещё раз подчеркивает точность этих методов. Методы *Goldsmith* и *Proakis*, напротив, показали чрезмерно оптимистичный результат в области низких значений ОСШ до 15-20 дБ в зависимости от уровня модуляции.

В таблице А.1 обобщены выводы к сравнительному анализу результатов расчёта вероятности битовой ошибки, полученные описанными способами, по критериям трудоёмкости расчёта, точности результатов расчёта и применимости способа к уровням модуляции выше 256-QAM.

Таблица А.1 – Обобщённые выводы по результатам анализа различных способов расчёта вероятности битовой ошибки в канале АБГШ

Автор метода	Функция $P_b(\gamma_s)$	Трудоёмкость расчёта	Точность	Доступность для схем M -QAM выше 256
<i>Hanzo</i>	$= \sum_i A_i Q(\sqrt{a_i \gamma_s})$	высокая	высокая	нет
<i>Goldsmith</i>	$\approx \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_s}{(M-1)}}\right)$	низкая	низкая	да
<i>Proakis</i>	$\approx \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_s}{(M-1)}}\right) \times \left(1 - \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M} \log_2 M}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3\bar{\gamma}_s}{(M-1)}}\right)\right)$	низкая	низкая	да
Савищенко	$= \frac{1}{\log_2 M} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}-1} a_{2j-1} Q\left(\sqrt{\frac{3(2j-1)^2}{(M-1)} \bar{\gamma}_b}\right)$	средняя	высокая	да

Таким образом, наиболее точные результаты расчёта даёт четвёртый способ, который кроме этого отличается простотой использования и возможностью применения к модуляциям любого уровня M -QAM. Поэтому в данной диссертационной работе в разделе 2 для определения порогов переключения (таблица А.2) между уровнями адаптивной модуляции в канале с замираниями использовалась формула (А.14), полученная методом профессора Н.В. Савищенко.

Таблица А.2 – Пороговые значения ОСШ для заданной вероятности ошибки

Модуляция	Пороговые значения ОСШ, дБ			
	$BER=3*10^{-3}$	$BER=10^{-3}$	$BER=10^{-6}$	$BER=10^{-9}$
<i>BPSK</i>	5,8	6,8	10,5	12,5
<i>QPSK</i>	8,8	9,8	13,5	15,5
<i>8-QAM</i>	12,3	13,3	13,7	19,2
<i>16-QAM</i>	15,4	16,5	20,4	22,4
<i>32-QAM</i>	18,5	19,5	23,5	25,6
<i>64-QAM</i>	21,4	22,5	26,5	28,6
<i>128-QAM</i>	24,4	25,5	29,5	31,7
<i>256-QAM</i>	27,2	28,4	32,6	34,7
<i>512-QAM</i>	30,1	31,3	35,5	37,7
<i>1024-QAM</i>	33,0	34,2	38,5	40,7
<i>2048-QAM</i>	35,9	37,2	41,5	43,7
<i>4096-QAM</i>	38,8	40,1	44,5	46,7

Таблица А.3 – Пороговые значения ОСШ для заданной вероятности ошибки при использовании кодов Рида-Соломона RS(200,190) для $BER=10^{-6}$

Модуляция	Пороговые значения ОСШ, дБ	
	$BER=10^{-6}$ без кодирования	$BER=10^{-6}$ с кодом RS(200,190)
<i>BPSK</i>	10,5	7,5
<i>QPSK</i>	13,5	10,5
<i>8-QAM</i>	13,7	10,7
<i>16-QAM</i>	20,4	17,4
<i>32-QAM</i>	23,5	20,5
<i>64-QAM</i>	26,5	23,5
<i>128-QAM</i>	29,5	26,5
<i>256-QAM</i>	32,6	29,6
<i>512-QAM</i>	35,5	32,5
<i>1024-QAM</i>	38,5	35,5
<i>2048-QAM</i>	41,5	38,5
<i>4096-QAM</i>	44,5	41,5

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

ООО «ИнфоТел»
Телефон: +7 812 590-77-11
Факс: +7 812 590-77-57
www.rpls.ru, step@rpls.ru



Гражданский пр., д. 88,
кор. 3, лит. А, пом. 7Н,
г. Санкт-Петербург, Россия, 195257
ИНН 7802165930, КПП 780401001

27.11.2023г. №171
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
ВрИО Генеральный директор
ООО «ИнфоТел»

И.Г. Баручян

АКТ

о внедрении научных результатов,
полученных Степанец Ириной Валерьевной

Комиссия в составе:

Зайчика Евгения Михайловича, кандидата технических наук, ведущего научного сотрудника;

Горяинова Евгения Сергеевича, руководителя направления разработки и внедрения программного обеспечения;

Азаренко Алексея Викторовича, ведущего программиста

составили настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Степанец Ириной Валерьевной, а именно:

1. Методика расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией при планировании и оптимизации РРЛ в различных условиях применения;
2. Модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, включающая аналитические зависимости показателей качества, определяющие её пропускную способность, от технических характеристик РРС и параметров условий распространения радиоволн;
3. Научно-технические предложения по программной реализации методики расчёта и по повышению пропускной способности радиорелейных линий с адаптивной модуляцией

реализованы в программном комплексе ONEPLAN RPLS-DB планирования и оптимизации подвижной и фиксированной связи (сетевая версия) в конфигурации ONEPLAN RPLS-DB Link планирования и оптимизации радиорелейной связи (автономный модуль), внесённом в Единый реестр российских программ для ЭВМ и баз данных, реестровая запись №8968 от 28.01.2021 произведена на основании приказа Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 28.01.2021 №45.

Ведущий научный сотрудник,
кандидат технических наук

Е.М. Зайчик

Руководитель направления разработки
и внедрения программного обеспечения

Е.С. Горяинов

Ведущий программист

А.В. Азаренко

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, литера А, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232
Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159
http://sut.ru
E-mail: rector@sut.ru
ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635
ИНН 7808004760 КПП 784001001
ОКТМО 40909000

19.01.2024г. №

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-проректор
по учебной работе

Абылов А.В.



АКТ

о внедрении научных результатов,
полученных Степанец Ириной Валерьевной

Комиссия в составе:

- Коровина К.О., заведующего кафедрой Радиосистем и обработки сигналов, к.ф.-м.н.
- Глушанкова Е.И., профессора кафедры Радиосистем и обработки сигналов, д.т.н.
- Ликонцева А.Н., доцента кафедры Радиосистем и обработки сигналов, к.т.н.

составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Степанец Ириной Валерьевной, а именно:

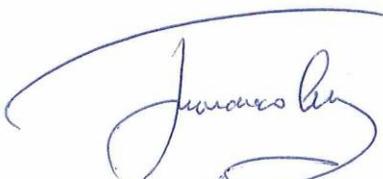
- математическая модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией
- метод расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией учитывающий особенности распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне
- методика расчёта пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией

использованы в курсах лекций и лабораторных/практических занятий по предметам «Спутниковые и радиорелейные линии связи», «Построение и оптимизация радиотехнических систем», «Борьба с замираниями и внутрисистемными помехами»

заведующий кафедрой
Радиосистем и обработки сигналов,
к.ф.-м.н.

 К.О.Коровин

профессор кафедры
Радиосистем и обработки сигналов,
д.т.н.

 Е.И. Глушанков

доцент кафедры
Радиосистем и обработки сигналов,
к.т.н.

 А.Н. Ликонцев