

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Доктора экономических наук, кандидата технических наук, профессора
Тихвинского Валерия Олеговича на диссертационную работу Степанец Ирины
Валерьевны на тему **«Исследование и разработка методов расчета
пропускной способности радиорелейных линий с адаптивной модуляцией»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.2.13 - Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

1. Актуальности темы диссертации

Наиболее массовое применение радиорелейная связь получила в транспортном сегменте сетей подвижной связи. Принципиально новые решения по совершенствованию архитектуры и технологий радиодоступа в сетях 5-го (5G) и в будущем 6-го поколений (6G) обеспечивают не только удовлетворение требований по сверхнадежной высокоскоростной передаче данных, но также являются движущей силой развития систем фиксированной связи, в том числе радиорелейной. Внедрение на радиорелейных линиях (РРЛ) режимов с адаптивной модуляцией (АМ) высоких порядков (до 4096QAM), поляризационного мультиплексирования, агрегации несущих, а также освоение новых диапазонов радиочастот направлены прежде всего на повышение пропускной способности РРЛ как системы с ограниченным набором градаций скоростей, т.е. на повышение максимально возможной скорости передачи данных в заданных условиях распространения радиоволн.

В настоящее время сложилась ситуация, когда научно-методический аппарат, включая рекомендации МСЭ и официальные методики расчета показателей качества РРЛ не в полной мере учитывают технологические решения и условия функционирования, что снижает достоверность расчета при проектировании РРЛ с АМ и обоснованность проектных и технических решений. Следовательно, возникло противоречие между возможностями научно-методического аппарата и реализованными режимами работы РРЛ с

АМ, которое негативно сказывается на обоснованности решений и повышает как технические, так и финансовые риски.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы Степанец И.В. «Исследование и разработка методов расчета пропускной способности радиорелейных линий с адаптивной модуляцией» является актуальной, имеет прикладную направленность и практическую значимость.

2. Характеристика содержания диссертационной работы, степень ее завершенности и качество оформления

Для достижения поставленной цели работы, которая состоит в повышении пропускной способности РРЛ за счет использования адаптивной модуляции и количественного обоснования режимов работы радиорелейных станций при планировании и оптимизации РРЛ с АМ, автором был предложен комплексный подход к решению научной задачи исследования, корректно объединяющий предложенные математическую модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, метод и методику расчета пропускной способности РРЛ с АМ.

Предложенные автором модель, метод и методика расчета радиорелейных линий с адаптивной модуляцией позволяет более точно учитывать работу в миллиметровом диапазоне волн и обеспечивает увеличение пропускной способности за счет учета механизмов адаптации на этапе планирования радиорелейной линии, что подтверждено статистическими данными о работе РРЛ с АМ.

Диссертация содержит 173 страницы машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы (147 библиографических источника).

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, объект и предмет, методология и методы исследования, определены научная новизна, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе работы анализируются технические возможности и особенности применения современных радиорелейных линий. Исследуется роль и место радиорелейных линий в транспортном сегменте сетей подвижной связи (СПС), а также проводится анализ условий и тенденций их развития. В конце раздела представлены результаты анализа существующего научно-методического аппарата, применяемого для оценки показателей качества функционирования радиорелейных линий. Также выявлены составляющие, которые не учитываются в существующих моделях, методах и методиках, но являются значимыми для расчетов пропускной способности и устойчивости радиорелейных линий с адаптивной модуляцией. Исходя из этого, формулируется научная задача исследования, а также определяются пути ее решения.

Во втором разделе работы описана разработка математической модели радиорелейной линии с адаптивной модуляцией. Приводятся модели радиорелейного интервала с постоянной и изменяемой битовой скоростью передачи в условиях замираний, включая быстрые и медленные замирания в радиорелейных линиях с адаптивной модуляцией. Эти модели представляют собой набор математических зависимостей между показателями устойчивости и пропускной способности радиорелейного интервала и заданными параметрами, внешними факторами и управляемыми параметрами режимов работы радиорелейного интервала с адаптивной модуляцией, включая вид передаваемого трафика.

В третьем разделе работы представлен метод расчета пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, учитывающий особенности распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне. Рассмотрены особенности распространения радиоволн в этом диапазоне, а также представлены результаты анализа статистических данных о влиянии метеоусловий на замирания сигналов на интервалах радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в миллиметровом диапазоне от 71 до 76 ГГц, от 81 до 86 ГГц и от 92 до 95 ГГц (E-band). Проведено сравнение результатов измерений

с результатами расчета устойчивости и пропускной способности, полученными известными методами. На основе собранных и обработанных статистических данных с действующих радиорелейных интервалов и близлежащих метеостанций предложен метод расчета пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, а также обоснована его применимость в условиях воздействия погодных факторов, вызывающих замирания, и учета особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне.

В четвертом разделе исследования представлена методика расчета пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, применяемая при планировании и оптимизации радиорелейных линий в различных условиях. Описана общая структура предлагаемой методики с использованием разработанного метода расчета пропускной способности РРЛ с АМ. Также представлена программная реализация данной методики в составе программного комплекса ONEPLAN RPLS-DB Link. Изложены предложения по программной реализации разработанного метода, учитывающего особенности распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне, а также раскрыты предложения по увеличению пропускной способности за счет использования радиорелейных линий с адаптивной модуляцией в транспортном сегменте сетей подвижной связи.

В заключении подводятся итоги основных результатов исследования, обсуждается их новизна и значение для теории и практики, а также определяются направления для дальнейших исследований.

Диссертационная работа написана современным научным языком, логично структурирована, каждый последующий раздел является логическим продолжением предыдущего. Диссертационная работа и автореферат полностью завершены, оформлены в соответствии с принятыми для научно-квалификационных работ требованиями. Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации.

Ценность диссертации для науки и практики определяется системным характером и четкой постановкой проблемы исследования. К достоинствам работы следует отнести оригинальность полученных результатов, использование современных языков программирования для моделирования результатов и обработки статистических данных, а также возможность использовать полученные результаты в программном комплексе ONEPLAN RPLS-DB Link для дальнейших исследований.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы следует из использования адекватных и широко известных математических методов, в том числе расчета частной и общей корреляции, численное сравнение по критерию согласия Колмогорова, а также результатов измерений с действующих радиорелейных станций.

4. Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена адекватным применением математических методов, корректностью постановок задач, вводимых допущений, ограничений и формулировок выводов, адекватностью применяемых моделей физическим процессам в системах радиорелейных линий. Достоверность результатов подтверждается непротиворечивостью полученных результатов результатам предшествующих исследований, а также статистическим данным о работе действующих РРЛ с адаптивной модуляцией.

Полученные в диссертационной работе научные результаты характеризуются новизной, что подтверждается новыми постановками задач и способами их решения, новой моделью радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, методом и методикой расчета пропускной способности радиорелейной линии с адаптивной модуляцией, учитывающие особенности замираний для различных диапазонов РРЛ с АМ.

Научной новизной обладают следующие результаты диссертации:

1) разработанная математическая модель радиорелейной линии с адаптивной модуляцией в отличие от известных включает аналитические зависимости показателей качества функционирования, определяющих пропускную способность радиорелейной линии с учетом 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 расчета 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 расчета 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(с буферизацией) / not real-time).

Основные результаты исследования докладывались на: X Международной конференции по инновациям, современной прикладной науке и экологическим исследованиям (ICIES'2022), Марокко 2022 г.; VII и XI Международной научно-технической и научно-методической конференции СПбГУТ (АПИНО 2018, 2022); 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. 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.

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них: 6 публикаций в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, 5 работ опубликованы в изданиях, индексируемых SCOPUS, 2 результата интеллектуальной деятельности, 3 работы в других научных изданиях и материалах конференций.

5. Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в дальнейшем развитии и совершенствовании моделей и методов расчета 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 подвижной связи и является инструментом для разработки обоснованных и своевременных технических и проектных решений по развитию и совершенствованию беспроводного сегмента транспортной распределительной сети, построенной на РРЛ с АМ.

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

6. Замечания по содержанию и оформлению диссертации

Отмечая несомненную научную и практическую значимость диссертационной работы, необходимо сделать ряд замечаний:

1. Благодаря переходу современных сетей связи на пакетную структуру данных появилась возможность использовать режим адаптивной модуляции в радиорелейных линиях, которые традиционно использовались для работы только с постоянной скоростью передачи. При этом важным отличием разработанной в диссертации математической модели является учет особенностей пакетной структуры передаваемого по РРЛ с АМ разнородного мультимедийного трафика, в котором предлагается различать и по-разному оценивать непрерывный и прерывистый трафик, что не делается согласно существующим методикам расчета РРЛ, но давно уже назрело на практике. Однако актуальность этого отдельного учета характеристик составных частей трафика в первой главе диссертации раскрыта очень слабо и отражена только в выводах по этой главе.

2. С целью повышения пропускной способности в сетях подвижной связи 5G и 6G предусматривается в дополнение к части сантиметрового диапазона использование и миллиметрового диапазона волн FR2. В первой главе диссертации упоминается факт дополнительного использования миллиметрового диапазона и в сети радиодоступа, и в транспортной сети организованной на основе базовых станций gNB с использованием технологии IAB (Integrated Access Backhaul), но в следующих главах при описании разработанной модели, метода и методики это не нашло отражения, хотя у автора есть публикация по этой тематике.

3. В современных радиорелейных станциях адаптивная модуляция применяется в сочетании с адаптацией по мощности передатчика. Автор упоминает об этой особенности реализации адаптивной модуляции в реальной аппаратуре радиорелейных станций, в частности, во второй главе на рисунке 2.4 и в комментариях к этому рисунку. Однако, учитывается ли (в явном или неявном виде) совместная адаптация на интервалах РРЛ по скорости и по

мощности в разработанной математической модели, в диссертации не говорится.

4. Еще одной особенностью практической реализации режима адаптивной модуляции на интервалах РРЛ является то, что пороговые значения отношения сигнал/шум (ОСШ) при переключении с более низкого уровня модуляции на более высокий (когда ОСШ увеличивается) и при переходе с более высокого на более низкий уровень модуляции (когда ОСШ уменьшается) принимают различные величины, что отмечено во второй главе и отражено на примере конкретных численных значений в таблице 2.1. Однако, как этот гистерезис переключений между соседними уровнями модуляции учитывается в разработанной модели РРЛ с адаптивной модуляцией, в диссертации в явном виде не указывается.

5. Потери распространения радиоволн на интервалах радиорелейных линий, которые относятся к наземным трассам прямой видимости, являются суммой различных составляющих, по-разному проявляющихся в разных диапазонах радиоволн. Для миллиметрового диапазона радиоволн характерными являются составляющие потерь из-за влияния атмосферных газов и осадков, а также других метеорологических факторов, влияние которых на распространение радиоволн пока недостаточно исследовано, но известно, что оно отличается в разных географических регионах в разное время года. Судя по представленным материалам диссертации, при разработке предлагаемого метода автор обработал и использовал статистические данные наблюдений, проведенных в течение пятнадцати месяцев, однако на рисунках 3.7-3.10 в третьей главе, отражена совмещенная статистика уровня сигнала и параметров метеоусловий только для одного месяца. Для более полного и разностороннего обзора следовало бы привести результаты для различных сезонов года с акцентом на наихудшем месяце, как это принято в существующих методиках расчета РРЛ.

6. Исследование статистики переключения между уровнями модуляции в РРЛ с АМ в реальных условиях является важной научной задачей и следовало

бы более подробно проанализировать процессы, происходящие при этом. Например, в разделе 3 (табл. 3.2) при описании динамики изменения мощности сигнала на приеме автор приводят значения среднеквадратического отклонения (СКО) для различных амплитудно-квадратурных модуляций, но не отмечает и не комментирует наблюдаемую закономерность увеличения СКО при уменьшении уровня модуляции.

7. Практическая реализация полученных теоретических результатов исследований в специализированном программном комплексе ONEPLAN RPLS-DB Link позволяет использовать результаты для автоматизированного проектирования сетей подвижной и фиксированной радиосвязи. Однако в четвертой главе, посвященной описанию разработанной методики, предложения по программной реализации представлены в основном только в части касающейся предлагаемых изменений интерфейса программы для ввода и вывода дополнительных исходных данных и результатов.

Отмеченные недостатки не являются определяющими и не могут повлиять на положительную оценку работы.

7. Соответствие содержания научной специальности

Диссертация Степанец Ирины Валерьевны соответствует паспорту научной специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» по пунктам:

п.2 «Исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов, учитывающих эффекты их рассеяния и отражения при прохождении через различные среды распространения»;

п.8 «Разработка и исследование радиотехнических устройств и систем передачи информации, в том числе эфирных, радиорелейных и космических, с целью повышения их пропускной способности, помехоустойчивости и помехозащищенности»;

п.13 «Создание теории синтеза, анализа и адаптации радиотехнических устройств и систем, алгоритмов обработки сигналов и информации в этих системах».

8. Общее заключение

Диссертационная работа содержит все требуемые разделы в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011 и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на высоком уровне решена актуальная научная задача разработки метода и методики расчета пропускной способности РРЛ с АМ при планировании и оптимизации радиорелейных линий в различных условиях применения с учетом особенностей распространения радиоволн в миллиметровом диапазоне.

Считаю, что диссертация Степанец Ирины Валерьевны на тему «Исследование и разработка методов расчета пропускной способности радиорелейных линий с адаптивной модуляцией» соответствует критериям, предъявляемым в отношении кандидатских диссертаций, которые установлены пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), а ее автор Степанец Ирина Валерьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Доктор экономических наук,
кандидат технических наук
профессор

Тихвинский Валерий Олегович

Организация: ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ "ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИО
ИМЕНИ М.И. КРИВОШЕЕВА"

Почтовый адрес: 105064, город Москва, ул Казакова, д. 16А стр. 1

Тел.: +7(495)647-17-77, E-mail: info@niir.ru

*Подпись Тихвинского Валерия Олеговича
заведующий кафедрой радио
Вязнова ЕП
30.05.2014*