

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

Поповский Никита Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РЕКОНФИГУРАЦИИ
РЕЖИМОВ ПЕРЕДАЧИ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ
ТРАНСПОНДЕРОВ В ГИБКИХ СЕТЯХ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук, доцент
Давыдов Вадим Владимирович

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Анализ существующих архитектур и режимов работы адаптивных оптических транспондеров	11
1.1. Роль оптического транспорта в инфраструктуре 6G	11
1.2. Ограничения Fixed-Grid и статического планирования каналов передачи	12
1.3. Гибкая оптическая сетка и гибкие оптические сети	13
1.4. Эволюция архитектур оптических транспондеров	16
1.5. Суперканалы как основной механизм масштабирования в гибких оптических сетях.....	17
1.6. Классификация способов формирования суперканалов	18
1.7. Управление EON: задачи RSA/RMSA и ограничения сетевых подходов	19
1.8. Общая логика работы адаптивного транспондера	20
1.9. Автоматизация управления адаптивными транспондерами	21
1.10. Нерешённые ограничения существующих подходов и анализ научного зазора	22
1.11. Обзор литературы.....	23
1.12. Общая постановка проведения исследования	29
Глава 2. Математическая модель выбора режимов передачи адаптивного оптического транспондера.....	33
2.1. Постановка задачи математического моделирования режимов передачи адаптивного оптического транспондера	33
2.2. Формирование критериев допустимости и оптимальности режима передачи адаптивного транспондера.....	36
2.3. Математическая модель выбора режима передачи адаптивного транспондера	41
2.4. Формирование множества допустимых режимов и области решений	44
2.5. Разработка метода выбора рационального режима передачи адаптивного транспондера	46
2.6. Выводы по второй главе	52
Глава 3. Архитектура адаптивного оптического транспондера и аппаратные механизмы формирования суперканалов.....	53
3.1. Требования к архитектуре адаптивного оптического транспондера для гибких оптических сетей.....	53
3.2. Обобщённая структурная схема адаптивного оптического транспондера.....	55
3.3. Передающая часть адаптивного оптического транспондера	61
3.4. Приёмная часть адаптивного оптического транспондера	64
3.5. Метод формирования оптической частотной гребенки	67
3.6. Формирование суперканалов с использованием маршрутизатора на основе дифракционной волноводной решётки	73
3.7. Выводы по третьей главе.....	79
Глава 4. Исследование влияния параметров транспондера на показатели качества передачи	80
4.1. Постановка задачи исследования	80

4.2. Формальная постановка параметрического исследования	81
4.3. Методика исследования и параметры модели.....	82
4.4. Верификация модели транспондера	88
4.4.1. Формирование оптической гребёнки и распределение мощности поднесущих по портам AWGR	89
4.4.2. Спектральные характеристики AWGR и их влияние на формирование QoT-ограничений	92
4.4.3. Совместное влияние электрической полосы и полосы канала AWGR на показатели качества передачи.....	97
4.5. Исследование изменения спектральной структуры и параметров суперканала при реконфигурации	100
4.5.1. Постановка задачи исследования реконфигурации суперканала.....	100
4.5.2. Общие закономерности изменения спектральной структуры суперканала	101
4.5.3. Сравнительный анализ конфигураций 50, 100 и 200 ГГц.....	102
4.6. Исследование влияния мощности передачи на показатели качества суперканала	106
4.7. Исследование влияния длины маршрута на допустимые режимы передачи.....	108
4.8. Анализ различий между краевыми и центральными поднесущими суперканала.....	110
4.9. Влияние формата модуляции и числа активных поднесущих на область допустимых режимов.....	112
4.10. Построение области допустимых и рациональных режимов передачи транспондера ..	118
4.11. Сравнение с промышленными транспондерами	125
4.12. Выводы по четвертой главе.....	129
Глава 5. Метод реконфигурации режимов передачи адаптивного оптического транспондера по параметрам оптического тракта.....	132
5.1. Имитационная модель и методика проведения исследования	132
5.2. Архитектура программного модуля на T-SDN контроллере	134
5.3. Алгоритм решения обратной задачи выбора режима передачи транспондера.....	137
5.4. Алгоритм выбора рациональных режимов передачи транспондера.....	142
5.5. Исследование эффективности алгоритма выбора рационального режима передачи для типовых оптических трактов при динамическом трафике	146
5.6. Выводы по пятой главе.....	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	158
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	160
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	161
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	162
Приложение 1. Алгоритм решения обратной задачи выбора режима передачи транспондера .	177
Приложение 2. Алгоритм выбора рациональных режимов передачи транспондера	182
Приложение 3. Акт о внедрении научных результатов.....	191
Приложение 4. Патент на полезную модель.....	192
Приложение 5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.....	193

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время телекоммуникационные сети переживают этап фундаментальной трансформации, обусловленный экспоненциальным ростом объемов передаваемых данных. Внедрение технологий связи пятого и шестого поколений, развитие Интернета вещей, облачных вычислений и сервисов потокового видео высокого разрешения формируют новые требования к оптической транспортной сети. Ключевой особенностью современного трафика становится его высокая динамичность, пульсирующий характер и гетерогенность требований к качеству обслуживания [1-5].

Рост требований к транспортной инфраструктуре для систем связи шестого поколения (6G) обусловлен необходимостью поддерживать сверхвысокие скорости передачи данных, масштабируемость по числу сервисов, низкую задержку и высокую надёжность при динамически меняющемся характере трафика [6-7]. В таких условиях оптическая транспортная сеть становится базовой технологической платформой для реализации различных сегментов сети и сквозных сетевых сервисов. Классические DWDM-системы с фиксированной сеткой частот (Fixed-Grid) и статическим планированием ресурсов ограничены фрагментацией спектра, недостаточной гибкостью и высокой стоимостью перенастройки при изменении нагрузки и качества канала [8-9].

Традиционные оптические транспортные сети, построенные на технологии спектрального мультиплексирования с фиксированной сеткой частот (Fixed-Grid), достигли предела своей спектральной эффективности вследствие использования сетки частот 50/100 ГГц. Статическое выделение ресурсов и жесткая привязка параметров передачи приводят к фрагментации спектральных слотов, появляются разрозненные свободные слоты, которые невозможно использовать под требуемый сетевой запрос, и неэффективному использованию пропускной способности волоконно-оптических каналов связи [10]. В связи с этим, переход к гибким оптическим сетям (Elastic Optical Networks, EON), способным автоматически адаптировать параметры систем связи, является одним из возможных путей развития [11-13].

Гибкие оптические сети и суперканалы рассматриваются как ключевое направление повышения спектральной эффективности и адаптивности оптических транспортных сетей. Однако практическая реализация потенциала гибких оптических сетей требует перехода от статической конфигурации к интеллектуальному управлению, учитывающему физический уровень и метрики качества передачи сигнала (Quality of Transmission, QoT) [14-15]. В связи с этим актуальной является разработка аппаратно-ориентированных решений адаптивных транспондеров, а также методик их интеграции в архитектуру транспортных программно-конфигурируемых сетей (T-SDN), обеспечивающих автоматизированную реконфигурацию маршрутизации, спектра и параметров модуляции [16-17].

В зарубежной литературе устройства, обеспечивающие динамическое изменение спектральной ширины канала, классифицируются как транспондеры с переменной полосой пропускания (Bandwidth-Variable Transponders, BVT) или, в случае многонесущих систем, как нарезаемые транспондеры (Sliceable-BVT, S-BVT) [18-19]. В рамках данной диссертации для описания объекта исследования используется термин «адаптивный оптический транспондер», под которым понимается приемо-передающий модуль, являющийся аппаратной основой BVT и обеспечивающий программное управление форматом модуляции и количеством подканалов.

Однако простого внедрения нового оборудования недостаточно. Критической проблемой остается управление такими сетями. Существующие транспондеры, например Ciena WaveLogic, Infinera ICE, Nokia PSE, Huawei OptiX, часто не обладают достаточной гибкостью и скоростью реакции, чтобы в реальном времени адаптировать физические параметры передачи, такие как формат модуляции, число подканалов и ширину суперканала, под требования трафика [20-21]. Решением данной проблемы является интеграция адаптивных оптических транспондеров в единый контур управления архитектуры T-SDN. Таким образом, исследование и разработка методов построения и управления такими сетями является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности научной проблемы. Вопросам построения гибких оптических сетей и алгоритмов RMSA (Routing, Modulation and Spectrum Assignment) посвящены работы многих зарубежных (М. Jinno, Z. Zhu, S.J.B. Yoo и др.) [22-30] и отечественных ученых (Р.В. Киричек, А.Е. Кучерявый, А.Н. Волков, А.В. Бурдин, А.Г. Владыко, М.А. Маколкина, С.С. Владимиров, Б.С. Гольдштейн, В.Н. Трещиков, В.Г. Фокин и др.) [1-14, 31-58]. Однако, большинство существующих работ рассматривают задачи маршрутизации и управления физическим уровнем отдельно, либо используют упрощенные модели физического уровня, не учитывающие возможности современных адаптивных оптических транспондеров и методов интеллектуального управления.

Проблематика управления ресурсами гибких оптических сетей широко исследуется в части алгоритмов RMSA, вопросов фрагментации спектра, стратегий восстановления и защиты соединений, а также QoT ориентированных методов планирования [26]. Параллельно развивается направление когерентных оптических систем с адаптацией форматов модуляции и скорости передачи, позволяющих гибко балансировать между спектральной эффективностью и устойчивостью к ухудшению условий в канале связи [27].

В то же время сохраняется разрыв между сетевыми алгоритмами управления, которые часто опираются на упрощённые модели физического уровня, и аппаратными механизмами формирования и обработки суперканалов, где ограничения определяются спектральной

селективностью, внутренними потерями, межканальными перекрёстными помехами, температурным дрейфом и стабильностью оптической частотной гребёнки [32, 35].

Недостаточно системно проработан вопрос построения сквозной методики, связывающей аппаратные параметры адаптивного транспондера (в частности, решений на базе AWGR и генерации ортогональных оптических поднесущих) с механизмами T-SDN и критериями QoT на уровне сети. Это ограничивает практическую применимость многих теоретических исследований гибких оптических сетей в сценариях 6G, где требуется реконфигурация транспондеров в реальном времени и надёжная эксплуатация при аппаратных допусках и температурных дрейфах. Также недостаточно проработан вопрос решения обратной задачи конфигурирования адаптивного оптического транспондера: определения параметров (формат модуляции, число подканалов, мощность) его настройки по заранее известным характеристикам конкретного оптического тракта.

Все это приводит к проблеме, которая заключается в отсутствии метода выбора и реконфигурации режимов передачи адаптивного оптического транспондера, позволяющего по заданным параметрам оптического тракта и доступного спектрального ресурса выбирать рациональную конфигурацию с учётом QoT и реальных аппаратных ограничений формирования суперканалов, а также в отсутствии формализованной зависимости между параметрами аппаратной структуры адаптивного оптического транспондера и показателями качества передачи.

Решение указанной проблемы позволит формировать множество допустимых режимов транспондера для заданного оптического тракта и спектральных ограничений с гарантией выполнения QoT, выбирать рациональный режим передачи с минимальным спектральным расходом при заданном OSNR и ограничений на число реконфигураций, выполнять реконфигурацию в реальном времени в контуре управления T-SDN при изменении трафика и условий передачи, включая процедуры верификации QoT и переход к предыдущему режиму передачи, связать аппаратные параметры транспондера с системами управления сетью, обеспечив воспроизводимую методику настройки адаптивных транспондеров на основе измеряемых параметров оптического тракта и ограничений сетевого оборудования.

Объектом исследования являются адаптивные оптические транспондеры с программно-конфигурируемым управлением.

Предметом исследования являются алгоритмы и методы выбора режимов реконфигурирования адаптивных оптических транспондеров с учётом показателей качества суперканала и физических ограничений на работу устройства.

Цель и задачи научного исследования

Целью диссертационной работы является исследование влияния параметров аппаратной структуры адаптивного оптического транспондера на показатели качества передачи информации и разработка метода выбора допустимых и оптимальных режимов передачи для определенного оптического тракта.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

Провести анализ существующих адаптивных оптических транспондеров и методов формирования суперканалов.

Разработать математическую модель выбора режима передачи адаптивного оптического транспондера, описывающую взаимосвязь между форматом модуляции, числом подканалов, параметрами спектрального уплотнения, мощностью передачи, доступным спектральным окном и качеством передачи.

Сформулировать задачу выбора оптимального режима транспондера по критериям максимизации пропускной способности, минимизации занимаемого спектра и сохранения запаса по качеству передачи.

Разработать архитектуру адаптивного оптического транспондера, ориентированную на формирование и реконфигурацию суперканалов.

Выполнить имитационное моделирование адаптивного оптического транспондера в среде OptiSystem и получить зависимости показателей качества передачи от параметров устройства.

Определить область допустимых и оптимальных режимов передачи адаптивного оптического транспондера на основе полученных зависимостей качества передачи.

Разработать методику выбора оптимального режима передачи адаптивного оптического транспондера с учётом параметров устройства и требований по качеству передачи.

Провести имитационное моделирование для количественной оценки выигрыша адаптивного подхода по сравнению со статическими DWDM системами.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы состоит в обосновании и разработке QoT методики выбора и реконфигурации режимов адаптивного оптического транспондера в гибких оптических сетях, которая отличается от ранее применяемых методик более широким согласованием параметров аппаратной структуры устройства (число активных поднесущих, формат модуляции, мощность поднесущих, электрическую полосу модуляторов, параметры AWGR), спектральных ресурсов оптического тракта и требований к качеству передачи (ограничения по OSNR, BER, Q-factor, EVM), а также при реализации этой методики в контуре управления T-SDN с механизмами устойчивости и верификации.

Предложенная математическая модель выбора режимов передачи адаптивного оптического транспондера, в отличие от ранее используемых, позволяет учесть при выборе его

параметров (число активных поднесущих, формат модуляции, диапазон мощности передачи, параметры модуляторов, характеристики AWGR), а также параметров оптического тракта (длина маршрута, OSNR, доступный спектральный блок (несколько спектральных слотов по 12,5 ГГц, который маршрутизатор может выделить под новое соединение)), ограничения по QoT (BER, Q-factor, EVM).

Полученные зависимости качества передачи информации (BER, Q-factor, EVM) от параметров адаптивного оптического транспондера позволяют более обоснованно, в отличие от ранее используемых способов, сформировать область допустимых режимов для заданного оптического тракта и тем самым использовать параметры устройства как исходные ограничения для процедур программируемой реконфигурации.

Разработана методика и алгоритм интеллектуальной реконфигурации режимов передачи адаптивного транспондера, основанные на совместном анализе QoT-метрик, доступных спектральных ресурсов и параметров оптического тракта (длина маршрута, OSNR, доступный спектральный блок).

Практическая значимость работы

Предложена скорректированная модель транспондера, которая в отличие от ранее используемых упрощенных, позволяет рассмотреть ограничения на потенциально реализуемые режимы передачи адаптивного транспондера.

Разработана архитектура программного модуля выбора и реконфигурации режимов передачи адаптивного оптического транспондера в составе T-SDN-контроллера.

Предложен способ формирования множества допустимых конфигураций транспондера для заданного оптического тракта на основе параметров (длина маршрута, OSNR, накопление шумов, доступный спектральный блок) аппаратной структуры устройства и ограничений по качеству передачи (BER, Q-factor, EVM и запас по QoT).

Результаты работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации оптических транспортных сетей для инфраструктуры 5G/6G, в системах SDN-управления и планирования ресурсов гибких оптических сетей, а также при разработке адаптивных транспондеров и подсистем мониторинга QoT для автоматизированной реконфигурации оптических соединений.

Методология и методы исследования. При проведении научного исследования были использованы методы теорий оптических волноводов, нелинейной оптики, теории линий передачи, теории цифровой обработки сигналов, теории дифференциального и интегрального исчисления и численного моделирования.

Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы машинного обучения, теории оптимизации, имитационного и эмуляционного моделирования. Имитационное

моделирование выполнялось с помощью программного обеспечения OptiSystem и языка программирования Python с необходимыми программными пакетами и библиотеками обработки данных (OptiCommPy, scikit-learn, NumPy, SimPy).

Для верификации результатов физического моделирования и генерации расширенного датасета конфигураций была использована библиотека OptiCommPy, реализующая моделирование когерентных оптических систем связи. Эмуляция динамического трафика в замкнутом контуре T-SDN-управления реализована с использованием библиотеки дискретно-событийного моделирования SimPy.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработана математическая модель выбора режима передачи адаптивного оптического транспондера, позволяющая при порогах OSNR 12/14/16/20/24 дБ для форматов QPSK/8QAM/16QAM/32QAM/64QAM и запасе по QoT 1,5 дБ выбирать оптимальные конфигурации по критериям спектральной эффективности и запасу по качеству передачи. Применение модели в вычислительном эксперименте обеспечило снижение вероятности блокировки с 15 % до 10 %, уменьшение среднего спектрального расхода с 220 до 185 ГГц на соединение и увеличение среднего запаса Δ OSNR с 1,5 до 1,8 дБ.

2. Разработан алгоритм выбора рационального режима передачи адаптивного оптического транспондера, основанный на согласовании параметров устройства — числа активных подканалов, формата модуляции, мощности передачи, полосы суперканала, параметров модулятора и характеристик AWGR — с ограничениями по качеству передачи. Алгоритм обеспечивает отбор допустимых конфигураций по критериям post-FEC BER не хуже 10^{-12} , требуемого OSNR, доступного спектрального блока и числа свободных слотов, а также устойчивый выбор режима с учётом реконфигурации; при этом в модельном эксперименте число возвратов к предыдущей конфигурации не превысило 3,5 % при росте числа реконфигураций с 25 % до 37 %.

3. Установлены зависимости показателей качества передачи адаптивного оптического транспондера (BER, EVM) от числа активных подканалов (2 - 10), формата модуляции (QPSK/8QAM/16QAM/32QAM/64QAM) и ширины суперканала (50 - 250 ГГц), что позволило определить область допустимых и рациональных режимов передачи в гибкой оптической сети. Показано, что при увеличении ширины суперканала от 50 до 250 ГГц, числа подканалов от 2 до 10, при шаге каналов AWGR 25 ГГц, электрической полосе модулятора от 15 до 25 ГГц, внутренних потерях AWGR 4 дБ, неравномерности потерь по портам 1 дБ и перекрёстных помехах соседнего канала –25 дБ, суммарная скорость возрастает от 200 до 800 Гбит/с, одновременно возрастают требования к OSNR (от 12 до 24 дБ), ухудшаются показатели качества передачи (BER с 10^{-12} до 10^{-11} , EVM с 9,5 % до 14,2 %), что ограничивает применение

высоких порядков модуляции (32QAM, 64QAM) на длинных оптических трактах (более 50 км) и определяет условия рационального выбора режима передачи.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 2, 5 и 10 паспорта специальности 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад. Все результаты, сформированные в основных положениях, выносимых на защиту, получены автором самостоятельно. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена та их часть, которая получена соискателем лично.

Степень достоверности. Достоверность результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования с использованием программного обеспечения для моделирования волоконно-оптических сетей связи OptiSystem и научных библиотек языка программирования Python, результатами эмуляционного моделирования на базе модельной программно-конфигурируемой сети, апробацией в рамках программы УМНИК-Фотоника, полученным патентом на полезную модель и свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ, а также обсуждением результатов диссертационной работы на конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационного исследования и отдельные его главы докладывались, обсуждались и были одобрены на следующих международных конференциях и форумах: Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», Москва, 2024 год; Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Санкт-Петербург, 2024, 2025 год; International Conference on Electrical Engineering and Photonics, Санкт-Петербург, 2022 год; Конференция Saint-Petersburg OPEN, Санкт-Петербург, 2022, 2023, 2024, 2025 год.

Публикации по теме исследования. Результаты диссертационного исследования опубликованы в ведущих рецензируемых научно-технических журналах, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки РФ (7 работ), а также в материалах международных научно-технических конференций и форумов (7 работ), в том числе в издании, индексируемом в международной базе SCOPUS (6 работ). Всего опубликовано 14 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка условных обозначений, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 193 страницы. Материал диссертационного исследования иллюстрируется 46 рисунками и 18 таблицами. Список литературы содержит 133 наименования.

Глава 1. Анализ существующих архитектур и режимов работы адаптивных оптических транспондеров

1.1. Роль оптического транспорта в инфраструктуре 6G

Появление большого количества трафика в транспортных оптических сетях, обусловленного развитием облачных вычислений, центров обработки данных, IoT и внедрением стандартов связи 5G/6G, приводит к необходимости оперативного масштабирования ёмкости магистральных и агрегационных сегментов транспортных сетей, а также к ужесточению требований к управляемости физическим уровнем [3]. В таких условиях статическая конфигурация DWDM-каналов приводит к неэффективному использованию спектральных ресурсов и росту эксплуатационных затрат [9].

Современный трафик характеризуется высокой динамичностью: короткие пики нагрузки, резкие изменения направления потоков, высокие требования к QoS и QoT для разных классов сервисов [6]. В этих условиях традиционные подходы управления волоконно-оптическими сетями передачи, основанные на статическом планировании и фиксированных профилях передачи, приводят к неэффективному использованию спектральных ресурсов.

Классические сети DWDM с фиксированной частотной сеткой формально упрощают эксплуатацию, однако ограничивают гибкость: канал задается как заранее выделенный набор спектральных слотов, зачастую с запасом на худший случай. В результате при хорошем состоянии канала связи сеть продолжает использовать низкоэффективные форматы модуляции и излишнюю спектральную полосу, даже если QoT (Quality of Transmission) допускает увеличение пропускной способности при использовании меньшего объема ресурсов [14, 15].

Гибкие оптические сети предоставляют механизм дискретизации спектра с тонкой гранулярностью, однако полный эффект достигается лишь при наличии адаптивных транспондеров, способных динамически изменять полосу пропускания и формат модуляции сигнала, а также при наличии системы управления, учитывающей текущие параметры качества передачи сигналов.

Архитектура управления гибкими оптическими сетями строится на принципе разделения плоскостей данных и управления и включает следующие функциональные элементы: T-SDN-контроллер, принимающий решения о распределении маршрутов, спектральных ресурсов и параметрах передачи сигнала, и адаптивные оптические транспондеры, транслирующие высокоуровневые команды T-SDN-контроллера в низкоуровневые операции физического уровня [16, 17].

Развитие сетей связи шестого поколения характеризуется одновременным ростом требований к пропускной способности, вариативности трафика и надёжности транспортной инфраструктуры. В отличие от предыдущих поколений, где доминировал относительно

предсказуемый пользовательский трафик с суточной периодикой, в 6G ожидается значительное увеличение доли машинного и сенсорного обмена данными, распределённых вычислений, иммерсивных сервисов, а также сетей с жёсткими требованиями к задержкам и доступности [4-7]. В результате транспортная сеть должна обеспечивать не только высокую среднюю пропускную способность, но и способность оперативно перераспределять ресурсы при резких изменениях нагрузки, обеспечивая при этом выполнение соглашений об уровне обслуживания (SLA) для разнотипных сервисов.

Оптический транспорт традиционно является базовым технологическим уровнем магистральных и региональных сетей за счёт высокой спектральной эффективности, низких потерь на дальних расстояниях и масштабируемости по ёмкости. Однако классические решения на базе фиксированной частотной сетки и статического планирования длин волн достигают предела эффективности в условиях динамического трафика. Главные причины — необходимость резервирования спектра «по худшему случаю», сложность оперативного перестроения каналов без деградации качества передачи и рост фрагментации спектрального ресурса.

Для транспортной инфраструктуры 6G в значительной степени становится определяющим не абсолютная пропускная способность как таковая, а уровень управляемости оптическим слоем: возможность в реальном времени адаптировать параметры передачи, спектральный ресурс и маршрутизацию с учётом физических ограничений линии связи. В этом контексте актуально использование гибких оптических сетей с поддержкой оптических суперканалов, а также внедрение концепции адаптивных оптических транспондеров, способных менять полосу пропускания суперканала и формат модуляции.

1.2. Ограничения Fixed-Grid и статического планирования каналов передачи

Классические DWDM системы строятся на фиксированной частотной сетке (например, 50 ГГц) и предполагают выделение отдельной длины волны под соединение или группу сервисов. В такой модели спектральный ресурс дискретизирован, а изменение параметров канала зачастую требует повторного планирования и ручного вмешательства [8-9].

В фиксированной сетке частот каждый канал занимает строго выделенную полосу (например, 50 ГГц). Если для передачи сигнала (например, 50 Гбит/с PM-QPSK) требуется меньшая спектральная ширина, оставшаяся часть полосы просто простаивает. С другой стороны, если требуется передать сигнал со скоростью 400 Гбит/с или сформировать суперканал, которому нужно, например, 75 ГГц, рамки жесткой сетки в 50 ГГц не позволят это сделать без разбиения сигнала на части [11].

Хотя статическая конфигурация проще в планировании и может использовать более дешевые компоненты, она имеет существенные недостатки в современных реалиях:

1. Избыточное резервирование спектра.

Если сервис требует переменную полосу (например, периодические пики нагрузки), то при фиксированной сетке приходится выделять полосу под максимальную скорость, что снижает среднюю спектральную эффективность.

2. Низкая гранулярность масштабирования.

В фиксированной сетке частот масштабирование ёмкости обычно осуществляется добавлением новых длин волн. Это приводит к фрагментации ресурсов на уровне оборудования, усложняет управление мощностью и повышает вероятность межканальных взаимодействий.

3. Ограниченная поддержка суперканалов.

Высокоскоростные соединения (сотни Гбит/с и выше) часто требуют объединения нескольких несущих в единый суперканал. В фиксированной сетке частот его размещение либо неэффективно по спектральным ресурсам, либо приводит к появлению значительного количества защитных интервалов.

4. Сложность динамической реконфигурации.

При динамическом трафике частые переключения приводят к росту эксплуатационных рисков. Без надёжного механизма контроля QoT и безопасной транзакционной реконфигурации возможны деградации BER и кратковременные потери качества.

5. Сужение полосы пропускания.

При передаче сигнала через каскад множества узлов ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) с фиксированными характеристиками фильтров происходит накопление искажений. Края спектра сигнала начинают обрезаться из-за неидеальной формы АЧХ фильтров, что вносит шум, сильно ухудшает оптическое отношение сигнал/шум (OSNR) и снижает дальность передачи [60].

Из-за этих ограничений традиционные статические DWDM системы постепенно вытесняются гибкими оптическими сетями с гибкой сеткой частот, которые позволяют динамически менять ширину канала кратно 12,5 ГГц и использовать спектр оптического волокна более эффективно [55].

1.3. Гибкая оптическая сетка и гибкие оптические сети

Гибкая сетка частот определяется рекомендацией ITU-T G.694.1 [61]. В отличие от фиксированных сеток с шагом 50 ГГц или 100 ГГц, гибкая сетка позволяет выделять спектральные слоты произвольной ширины для каждого канала.

Номинальная центральная частота может быть смещена с шагом 6,25 ГГц. Ширина слота определяется как кратное 12,5 ГГц. Ширина слота рассчитывается по формуле $12,5 \times m$ ГГц, где m — положительное целое число. Формула центральной частоты: $193,1 + n \times 0,00625$ ТГц, где n — целое число.

Гибкая сетка частот является фундаментальной технологией для построения гибких оптических сетей. В гибкой оптической сети спектр рассматривается как непрерывный ресурс, который можно гибко нарезать на слоты в соответствии с требованиями конкретного запроса на соединение, а не делить на фиксированные по ширине каналы.

Гибкая сетка частот позволяет создавать суперканалы, объединяя несколько оптических подканалов в единую сущность для механизмов маршрутизации. Поскольку эти подканалы коммутируются вместе, между ними не нужны защитные интервалы, что значительно повышает спектральную эффективность. Например, суперканал может занимать слот шириной 75 ГГц, что невозможно в фиксированной частотной сетке 50 ГГц [11, 67, 68].

Для реализации гибкой сетки частот необходимы ROADMs, оснащенные селективными переключателями по длине волны (WSS, Wavelength Selective Switches).

При прохождении оптического сигнала через каскад узлов ROADM/WSS возникает эффект сужения результирующей полосы пропускания оптического тракта. Это приводит к ограничению спектра сигнала на краях суперканала и возникновению межсимвольной интерференции, что вызывает деградацию качества передачи и требует учета при расчете QoT [60]. В гибкой сетке частот можно динамически расширять выделенную полосу (например, добавляя дополнительные 12,5 ГГц), чтобы компенсировать этот штраф по OSNR.

Для эффективного использования гибкой сетки необходимы адаптивные приемопередатчики.

Транспондеры с переменной полосой (BVT) могут динамически изменять скорость передачи, формат модуляции и ширину занимаемого спектра. Например, в зависимости от дальности передачи (960 км для BPSK или 120 км для 16QAM), транспондер выбирает оптимальную модуляцию, занимая ровно столько спектральных слотов, сколько ему необходимо [18, 19].

Суперканалы в гибкой сетке частот позволяют объединять несколько подканалов в единый широкий канал без защитных интервалов между ними. Это повышает спектральную эффективность всей системы (например, позволяя передавать 24 Тбит/с в С-диапазоне). Для формирования таких плотных каналов часто используется формирование спектра сигнала по Nyquist [69, 70].

Внедрение гибкой сетки частот переводит задачу управления сетью из плоскости RWA (Routing and Wavelength Assignment) в плоскость RSA (Routing and Spectrum Assignment). Поскольку спектральный блок непрерывен, контроллер сети должен находить непрерывный участок спектра (спектральный слот) вдоль всего маршрута. Это требует сложных алгоритмов для минимизации фрагментации спектра [23].

Программно-определяемые сети (SDN) играют ключевую роль при внедрении гибкой сетки частот, так как они позволяют централизованно управлять параметрами фильтров и транспондерами через стандартные интерфейсы (например, NETCONF или OpenFlow), обеспечивая автоматизацию при настройке оборудования [63-66].

Гибкие оптические сети используют частотную сетку с меньшим шагом (6,25 ГГц или иные варианты в зависимости от стандартизации и реализации), что позволяет размещать соединения в виде спектральных блоков переменной ширины [71]. Основные принципы гибких оптических сетей включают:

- частотную гибкость, где соединению выделяется спектральный блок, ширина которого соответствует требуемой скорости и выбранной модуляции;
- согласованность спектра по маршруту, где спектральный блок должен быть доступен на всех рёбрах маршрута;
- непрерывность спектрального блока, где выделение спектрального блока должно быть непрерывным;
- возможность формирования оптических суперканалов как агрегированных высокоскоростных соединений.

Преимущества гибкой сетки частот по отношению к фиксированной сетке частот наиболее ярко проявляются при динамическом трафике и смешанных сервисах:

1. Повышение спектральной эффективности.

При более тонкой дискретизации спектра уменьшается перерасход спектра при размещении каналов.

2. Поддержка сервисов переменной ширины.

Возможность увеличивать или уменьшать спектральный блок позволяет адаптировать спектральные ресурсы под текущий спрос без добавления новых длин волн.

3. Естественная поддержка суперканалов и многонесущих схем.

Суперканал может быть представлен как набор тесно расположенных подканалов, размещённых в одном блоке.

Вместе с тем гибкие оптические сети порождают новые задачи управления, которые отсутствовали или были менее выражены в фиксированной сетке частот:

- фрагментация спектра, когда при динамическом добавлении или удалении соединений свободный спектр распадается на фрагменты, что повышает вероятность блокировки новых запросов даже при наличии достаточной суммарной свободной полосы;
- необходимость QoT управления, где выбор модуляции и ширины блока должен учитывать физические ограничения и состояние линии;

- рост сложности алгоритмов назначения ресурсов, где решается задача RMSA и её расширения становятся вычислительно сложнее.

Следовательно, технологический потенциал гибких оптических сетей реализуется при наличии эффективного алгоритмического управления и адаптивных оптических транспондеров.

1.4. Эволюция архитектур оптических транспондеров

На ранних этапах развития транспортных сетей транспондеры имели фиксированные параметры: заранее определённую скорость передачи, формат модуляции, ширину оптического канала и уровень выходной мощности. Такие устройства проектировались под конкретную сетку частот и конкретные сценарии эксплуатации. Их достоинством были относительная простота реализации и предсказуемость поведения, однако они практически не поддерживали адаптацию к изменяющимся условиям в оптическом тракте.

Иногда допускается лишь грубая регулировка мощности или переключение между ограниченным числом сервисных профилей. В условиях динамического трафика и гибких оптических сетей такие устройства становятся неэффективными, поскольку не позволяют гибко согласовывать режим передачи с длиной маршрута и требуемой ёмкостью.

Появление когерентного приёма и цифровой обработки сигналов стало ключевым этапом развития транспортных оптических сетей. Когерентные транспондеры обеспечили возможность более плотной спектральной упаковки каналов, повышения чувствительности приёма, компенсации хроматической дисперсии и использования более сложных форматов модуляции.

Однако на раннем этапе транспондер всё ещё часто рассматривался как устройство, формирующее одиночный канал, пусть и с несколькими доступными профилями передачи. Несмотря на существенное повышение гибкости, архитектура оставалась ориентированной преимущественно на канал как неделимую единицу.

Современные когерентные транспондеры уже демонстрируют широкий диапазон доступных режимов, который может использоваться при анализе работы адаптивных оптических транспондеров. Так, спецификация OIF 400ZR ориентирована на передачу DP-16QAM 400 Гбит/с по DWDM-трактам до 120 км при канальном интервале 75 или 100 ГГц [20, 65]. Спецификация OpenZR+ расширяет этот подход и задаёт фиксированные профили 100G, 200G, 300G и 400G с модуляциями QPSK, 8QAM и 16QAM, причём для режимов 200/300/400G указывается скорость передачи 60 Бод, а для 100G — 30 Бод [64]. В коммерческих решениях аналогичного класса также встречаются 100G когерентные модули с доступной скоростью 28 Бод и дальностью до 80 км без применения усилителей.

Дальнейшее развитие привело к появлению транспондеров переменной полосы пропускания (BVT), в которых можно изменять не только формат модуляции, но и фактическую ширину занимаемого спектра и соответствующую ёмкость канала [18-19].

BVT лучше согласуются с гибкой сеткой частот, поскольку позволяют формировать каналы с разной шириной и ёмкостью в зависимости от требований сервиса и качества линии. Тем не менее типичный BVT всё ещё может быть ориентирован на один спектральный блок, а не на полноценный суперканал с несколькими управляемыми подканалами [72-73].

Следующим шагом стала архитектура S-BVT. В таких устройствах спектральный ресурс может быть разделён на несколько спектральных слотов или подканалов, направляемых на разные маршруты или используемых для формирования составного суперканала. S-BVT уже ближе всего к концепции гибкого многонесущего транспондера, пригодного для тонкой адаптации в гибких оптических сетях [74].

Именно на уровне BVT/S-BVT становится возможным эффективное использование суперканалов как базового механизма масштабирования ёмкости. При этом транспондер из оконечного физического устройства превращается в управляемый ресурсный узел, параметры которого должны выбираться с учётом не только сетевого запроса, но и реальных ограничений конкретной аппаратной реализации. Под адаптивным транспондером в работе понимается совокупность аппаратной части S-BVT и разработанного метода интеллектуального управления режимами передачи в реальном времени.

1.5. Суперканалы как основной механизм масштабирования в гибких оптических сетях

В условиях роста требуемой ёмкости каналов и перехода к гибкой сетке частот суперканалы стали одним из основных способов наращивания производительности волоконно-оптических систем передачи. Под суперканалом в общем случае понимается совокупность тесно связанных подканалов, совместно обеспечивающих передачу одного высокоскоростного логического соединения либо группы согласованных потоков данных [75].

Использование суперканалов позволяет перейти от масштабирования по одной длине волны к масштабированию за счёт координированного формирования набора спектральных компонент, которые рассматриваются как единое управляемое целое. Такой подход особенно эффективен в гибких оптических сетях, поскольку позволяет:

- точнее согласовывать спектральную ширину канала с требуемой ёмкостью;
- уменьшать относительные потери на защитные интервалы;
- повышать спектральную эффективность;
- более гибко выбирать форматы модуляции и число подканалов;
- осуществлять ступенчатое масштабирование канала без полного перепроектирования маршрута.

С точки зрения транспортной сети суперканал удобен ещё и тем, что он объединяет в себе преимущества аппаратного мультиплексирования и программной управляемости. В зависимости

от архитектуры транспондера суперканал может быть реализован как набор плотно упакованных отдельных несущих, как OFDM-структура из ортогональных поднесущих либо как композиция пространственных и спектральных подканалов [74].

Особенно важно, что суперканал становится не просто формой передачи, а объектом управления. Для него необходимо выбирать число активных подканалов, формат модуляции, шаг между спектральными компонентами, ширину спектрального блока, мощность и запас QoT. Следовательно, суперканал невозможно эффективно рассматривать отдельно от архитектуры адаптивного транспондера, который его формирует [76].

1.6. Классификация способов формирования суперканалов

Способы формирования суперканалов различаются по физическому механизму спектральной упаковки, требованиям к аппаратной реализации и возможностям управления.

В системах Nyquist-WDM суперканал формируется как набор отдельных оптических несущих, размещённых с минимальными межканальными интервалами за счёт спектрального формирования и приближения формы сигнала к Nyquist-профилю [69, 70]. Такой подход позволяет уменьшить защитные интервалы между каналами и повысить плотность спектральной упаковки по сравнению с традиционным DWDM.

Преимущества Nyquist-WDM:

- высокая спектральная эффективность;
- возможность использования уже известных когерентных технологий;
- сравнительно ясная трактовка отдельных спектральных каналов.

Ограничения:

- высокая чувствительность к точности фильтрации и частотной стабилизации;
- усложнение межканального согласования;
- рост требований к линейности и фазовой стабильности аппаратуры.

В OFDM-суперканалах суперканал строится как система ортогональных поднесущих, формируемых в единой многонесущей структуре. Ортогональность поднесущих позволяет резко уменьшить или практически устранить необходимость в больших внутренних защитных интервалах, а число активных поднесущих и их параметры могут изменяться в зависимости от требований к каналу [77].

Преимущества OFDM-суперканалов:

- высокая гибкость формирования полосы;
- возможность адаптивного изменения числа поднесущих;
- удобство реализации переменной полосы пропускания;
- тесная связь с DSP-управлением и цифровой реконфигурацией.

Ограничения:

- чувствительность к нарушениям ортогональности;
- рост межподнесущей интерференции при аппаратных неидеальностях;
- зависимость качества от полосы электрического тракта, характеристик модулятора, фильтрации и частотной селективности оптических компонентов.

Именно OFDM-суперканалы наиболее тесно связаны с BVT/S-BVT транспондерами, поскольку позволяют рассматривать число поднесущих, формат модуляции и ширину спектрального блока как непосредственно управляемые параметры.

В SDM-суперканалах масштабирование достигается за счёт использования пространственного мультиплексирования: нескольких пространственных мод, сердцевин или путей передачи. Такой суперканал может комбинировать спектральную и пространственную размерности, обеспечивая значительное увеличение суммарной ёмкости.

Преимущества SDM:

- дополнительная размерность масштабирования;
- потенциал существенного роста пропускной способности;
- возможность совместного управления спектральными ресурсами.

Ограничения:

- высокая аппаратная сложность;
- необходимость контроля межмодовых и межсердцевинных помех;
- ещё более сложная задача учёта физических ограничений в контуре управления.

С практической точки зрения для гибких транспортных сетей наибольший интерес представляют OFDM- и Nyquist-WDM суперканалы, поскольку они наиболее тесно связаны с уже развивающимися архитектурами когерентных адаптивных транспондеров [69, 70, 78, 79].

1.7. Управление EON: задачи RSA/RMSA и ограничения сетевых подходов

В гибких оптических сетях управление соединениями традиционно формализуется через задачи RSA и RMSA. Эти задачи направлены на выбор маршрута, выделение спектрального блока и выбор формата модуляции [23].

Такие методы внесли значительный вклад в развитие гибких оптических сетей, поскольку позволили рассматривать использование спектра и маршрута как единую оптимизационную задачу. Однако в большинстве случаев RMSA-подходы опираются на абстрактную модель транспондера, в которой режим передачи задаётся ограниченным набором профилей, а сам транспондер рассматривается как идеализированная сущность с дискретным выбором допустимых скоростей и модуляций.

Эта абстракция удобна на уровне сетевого алгоритма, но становится недостаточной при переходе к реальным BVT/S-BVT транспондерам. Причины этого заключаются в следующем.

Во-первых, сетевые RMSA-модели обычно не учитывают внутреннюю структуру суперканала: число подканалов, шаг между ними, распределение мощности, крайние подканалы, фильтрационное сужение и неидеальность спектральной формы. Между тем именно эти факторы определяют фактический QoT в реальном транспондере.

Во-вторых, в сетевых алгоритмах параметры физического уровня зачастую задаются через упрощённые пороговые модели длины маршрута или OSNR. Такой подход не отражает реальные ограничения конкретной архитектуры передатчика и приёмника: полосы модулятора, разрешения ЦАП/АЦП, характеристик AWGR, неравномерности частотной гребёнки, чувствительности крайних подканалов и т.д.

В-третьих, RMSA-подходы, как правило, решают задачу установления соединения, но значительно слабее прорабатывают задачу сквозной реконфигурации режима передачи. В динамической сети этого недостаточно, поскольку требуется не только выбрать новый спектральный блок, но и безопасно перестроить параметры реального суперканала без потери его целостности.

Следовательно, при переходе от условного сетевого управления к эксплуатации реального адаптивного транспондера возникает разрыв между:

- логикой сетевой оптимизации;
- физическими ограничениями конкретного устройства.

Именно этот разрыв становится одной из центральных проблем при построении практических методов управления суперканалами.

1.8. Общая логика работы адаптивного транспондера

Для интеграции адаптивного транспондера в гибкую оптическую сеть его архитектура должна включать средства взаимодействия с внешним контуром управления. Таким контуром может выступать локальный контроллер узла, централизованный T-SDN-контроллер или специализированный модуль QoT-оркестрации.

Интерфейс с внешним контроллером должен обеспечивать двусторонний обмен информацией. В сторону сети транспондер передаёт сведения о доступных режимах, состоянии суперканала и измеренных QoT-параметрах. В обратном направлении он принимает команды на реконфигурацию и установку нового режима передачи. Такой механизм превращает адаптивный оптический транспондер в активный программно-конфигурируемый элемент оптической инфраструктуры.

Системно работа адаптивного оптического транспондера может быть описана следующим образом. На вход устройства поступает клиентский поток данных и управляющая информация о требуемом режиме передачи. Подсистема управления определяет конфигурацию суперканала, соответствующую текущим сетевым условиям. Далее в передающей части формируется OFDM-

сигнал с заданным числом поднесущих и параметрами модуляции, который после оптической модуляции и частотно-селективного объединения передаётся в линию.

На стороне приёма суперканал выделяется, разделяется на поднесущие, демодулируется и анализируется. Полученные метрики качества возвращаются в подсистему управления, где используются для подтверждения допустимости текущего режима либо для принятия решения о его перестройке.

Таким образом, обобщённая структурная схема адаптивного оптического транспондера включает совокупность взаимосвязанных блоков, обеспечивающих формирование OFDM-суперканала, его передачу и приём, анализ качества передачи и программно-управляемую реконфигурацию режима. Такая архитектура создаёт основу для дальнейшего рассмотрения метода формирования ортогональных поднесущих, особенностей реализации AWGR и аппаратных ограничений, определяющих область допустимых режимов передачи устройства.

1.9. Автоматизация управления адаптивными транспондерами

Для архитектур, основанных на OFDM-суперканалах и частотно-селективных фотонных элементах, таких как AWGR, задача управления приобретает выраженный аппаратно-зависимый характер. Это означает, что решение о выборе или реконфигурации режима передачи должно формироваться не только по сетевым параметрам, но и по характеристикам конкретной реализации транспондера.

Внедрение AWGR перспективно для многоканального мультиплексирования и демультиплексирования благодаря компактности, регулярности спектральной структуры и возможности интегральной реализации. Однако использование AWGR в составе OFDM-ориентированного транспондера требует учитывать ряд аппаратных особенностей:

- неидеальность амплитудно-частотной характеристики;
- неравномерность прохождения краевых спектральных компонентов;
- ограничение полосы отдельных портов;
- чувствительность к точности совмещения сетки поднесущих;
- влияние фильтрационного сужения на крайние поднесущие суперканала.

Кроме того, OFDM-реализация суперканала чувствительна к:

- нарушению ортогональности поднесущих;
- межподнесущей интерференции;
- неидеальностям электрического тракта;
- неравномерности мощности по линиям гребёнки;
- фазовым и амплитудным ошибкам модулятора.

Из этого следует, что управление таким транспондером не может ограничиваться только выбором маршрута, ширины блока и формата модуляции. Требуется сквозная координация сетевых и аппаратных параметров, включающая:

- выбор числа активных поднесущих;
- выбор спектрального шага и ширины суперканала;
- выбор мощности передачи и распределения мощности;
- учёт допустимых аппаратных диапазонов;
- проверку QoT по поднесущим, а не только по усреднённой метрике.

Современные подходы к управлению транспондерами развиваются в направлении автоматизированных процедур, где используются:

- сбор телеметрии физического уровня;
- оценка QoT в процессе эксплуатации;
- прогнозирование деградации режима;
- реконфигурация параметров передачи;
- верификация результата по фактическим измерениям;
- переход к предыдущему режиму при недопустимом ухудшении состояния.

Таким образом, транспондер требует аппаратно-ориентированного управления, в котором объектом адаптации является не абстрактный канал, а конкретная физическая реализация суперканала с её ограничениями и характеристиками.

1.10. Нерешённые ограничения существующих подходов и анализ научного зазора

Проведённый анализ показывает, что современное состояние исследований в области гибких оптических сетей характеризуется высокой проработанностью отдельных направлений: Flex-Grid/EON, задач RSA/RMSA, QoT управления, когерентных транспондеров, суперканалов и программно-конфигурируемых сетей. Однако при попытке объединить эти направления в единую практическую схему управления адаптивным транспондером обнаруживается ряд нерешённых ограничений.

Во-первых, **использование гибкой частотной сетки само по себе не решает задачу эффективной адаптации режима передачи в условиях динамического трафика.** При фиксированных профилях работы транспондера спектральный ресурс может выделяться гибко, однако параметры передачи не согласуются с текущими характеристиками оптического тракта и QoT-ограничениями, что приводит к неэффективному использованию доступных спектральных ресурсов сети.

Во-вторых, **сетевые алгоритмы часто не учитывают реальные ограничения транспондера.** В большинстве работ управление выполняется на уровне абстрактных профилей модуляции и ширины канала, без детального учёта внутренней структуры суперканала,

ограничений электрического тракта, характеристик AWGR, неидеальностей фильтрации и деградации отдельных подканалов.

В-третьих, **характеристики оптического тракта** (длина маршрута, OSNR, накопление шумов, доступный спектральный блок) **и самого транспондера** (число активных подканалов, набор поддерживаемых форматов модуляции, диапазон мощности передачи, параметры модулятора, характеристики AWGR) **не в полном объеме интегрированы в контур управления**. Метрики QoT зачастую используются только как внешние ограничения или статические пороги, а не как результат взаимодействия маршрута и реальных параметров передатчика.

В-четвёртых, **отсутствует сквозная QoT-ориентированная реконфигурация суперканала**, которая одновременно учитывала бы сетевые условия, спектральную упаковку, аппаратные ограничения и фактические показатели качества передачи. Существующие решения либо сосредоточены на сетевой маршрутизации и спектральном размещении, либо на физическом моделировании устройств, но редко объединяют эти уровни в едином методе.

В-пятых, для аппаратной реализации суперканала остаётся недостаточно проработанным вопрос о том, как использовать аппаратную обратную связь для выбора и безопасной перестройки его режимов. Между тем именно такие реализации являются наиболее чувствительными к аппаратным ограничениям и одновременно наиболее перспективными для адаптации в гибких оптических сетях.

Проведенный анализ позволяет отметить, что в сложившейся ситуации сохраняется научный и прикладной зазор между разработками и исследованиями в сетевых алгоритмах управления спектром и маршрутизацией, и физическими ограничениями адаптивного транспондера.

Именно в этом зазоре и формируется необходимость разработки методов управления, способных описывать, выбирать и реконфигурировать режимы передачи адаптивного оптического транспондера как функции одновременно сетевых и аппаратных параметров. Детальный анализ источников, подтверждающих выявленный зазор, представлен в разделе 1.11.

1.11. Обзор литературы

Вопросам развития гибких оптических сетей, адаптивных транспондеров и методов управления спектральными ресурсами посвящён значительный массив отечественных и зарубежных исследований. Анализ литературы показывает, что научная база по тематике гибких оптических сетей уже сформирована по нескольким основным направлениям: переход от фиксированной к гибкой сетке частот, развитие BVT и S-BVT транспондеров, использование суперканалов как средства масштабирования пропускной способности, QoT управление, а также внедрение архитектур программно-конфигурируемого управления оптической сетью. Анализ

современной научно-технической литературы показывает, что традиционные системы спектрального уплотнения DWDM с фиксированной сеткой частот становятся менее эффективными при передаче каналов на скоростях свыше 100 Гбит/с из-за значительного объема неиспользованного, жестко зарезервированного спектра [9, 20, 21]. Вместе с тем имеющиеся результаты в значительной степени развиваются по отдельным направлениям, тогда как задачи сквозного управления реальным адаптивным транспондером с учётом аппаратных ограничений остаются решёнными лишь частично.

Фундаментальные положения концепции гибких оптических сетей были заложены в работах М. Jinno, Z. Zhu, S.J.B. Yoo, Р.В. Киричека, А.Е. Кучерявого, А.Н. Волкова, А.В. Бурдина, и др. [1-14, 31-58], где была обоснована необходимость перехода от жёсткой фиксированной сетки к спектрально-эластичной архитектуре с переменной шириной оптического канала. В частности, в трудах М. Jinno и соавторов была впервые предложена концепция гибкого распределения спектральных слотов шириной 12,5 ГГц на базе транспондеров с переменной полосой пропускания (BVT). Для управления такими сетями авторами была формализована расширенная задача совместной маршрутизации, выбора формата модуляции и назначения спектра (RMSA), требующая соблюдения условий спектральной непрерывности и смежности [23].

В этих исследованиях показано, что использование гибких оптических сетей обеспечивает более эффективное использование спектра по сравнению с фиксированной сеткой частот, а также создаёт основу для динамической подстройки полосы канала под фактическую потребность трафика. В последующих работах та же научная школа развила эти представления, связав гибкое распределение спектра с программной перестройкой параметров передачи и задачами стандартизации таких сетей. Именно эти работы фактически сформировали парадигму гибких оптических сетей как объекта, в которой маршрутизация, спектр и режим передачи должны рассматриваться совместно [72, 73, 80].

Следующее важное направление связано с эволюцией самих транспондеров. Если ранние транспондеры ориентировались на заранее заданные скорость передачи, формат модуляции и ширину спектрального канала, то развитие когерентных технологий и цифровой обработки сигналов привело к появлению BVT, а затем S-BVT. Для BVT и S-BVT в литературе подчёркивается возможность перестройки формата модуляции, символьной скорости, ширины занимаемой полосы и распределения спектральных ресурсов между несколькими подканалами или направлениями. В обзорах S-BVT рассматривается уже не как «улучшенный транспондер», а как программируемый фотонный ресурс, поддерживающий суперканалы, то есть совместное формирование группы подканалов с возможностью их дальнейшей независимой маршрутизации или перераспределения [18, 19].

Дальнейшее развитие алгоритмов маршрутизации пошло по пути внедрения ограничений физического уровня. В исследованиях J.L. Ravipudi, S. Li и ряда других авторов доказано, что учет метрик оптического отношения сигнал/шум (OSNR), частоты битовых ошибок (BER) и модуля вектора ошибки (EVM) критически важен для гибких оптических сетей [28]. Внедрение алгоритмов, осведомленных о качестве передачи, позволяет минимизировать вероятность блокировки соединений на 20–33 % по сравнению с базовыми алгоритмами, такими как First-Fit, которые являются простой жадной эвристикой распределения спектральных ресурсов, которую часто используют как базовую в задачах размещения каналов в волоконно-оптических сетях (RSA/RMSA) [81]. Отдельное внимание в литературе уделяется проблеме деградации ресурсов из-за фрагментации спектра. Для инфраструктуры 6G предлагаются подходы, такие как алгоритмы SFQA (Spectrum Fragmentation and QoT-Aware) и гибридное агрегирование, применение которых способно снизить количество необходимых реконфигураций сети на 80 % [26].

Значительное количество публикаций посвящено суперканалам как основному механизму масштабирования транспортных оптических систем. В литературе суперканал рассматривается как совокупность тесно упакованных спектральных компонент, функционирующих как единое логическое соединение [59, 70, 74, 77, 79, 82-86]. В обзорах и экспериментальных работах показано, что такой подход обеспечивает более высокую спектральную эффективность и упрощает масштабирование пропускной способности до терабитного уровня по сравнению с одиночными несущими. При этом в литературе выделяются по меньшей мере три основных класса суперканалов: Nyquist-WDM, OFDM-суперканалы и SDM-суперканалы. Для Nyquist-WDM ключевыми достоинствами считаются плотная спектральная упаковка и совместимость с когерентной передачей; для OFDM — высокая гибкость цифрового формирования, возможность изменения числа поднесущих и удобство реализации переменной полосы пропускания; для SDM — добавление пространственной размерности масштабирования. Вместе с тем именно OFDM-подход в наибольшей степени связывается с задачей адаптивного управления внутренней структурой суперканала.

Отдельный пласт работ посвящён задачам маршрутизации и распределения ресурсов в гибких оптических сетях. В рамках RSA/RMSA-подходов исследуются выбор маршрута, назначение спектральных слотов, выбор формата модуляции, минимизация фрагментации спектра и снижение вероятности блокировки запросов. Однако анализ литературы показывает, что большинство RMSA-подходов по-прежнему используют упрощённую модель транспондера, в которой режим передачи задаётся набором дискретных профилей, а внутренняя структура суперканала не моделируется явно. Даже в более точных постановках учитываются главным образом непрерывность и смежность спектральных слотов, а также пороговые ограничения по

длине маршрута, OSNR или спектральной ёмкости, тогда как реальные ограничения транспондера такие как электрическая полоса, особенности DSP, фильтрационное сужение, крайние подканалы и частотная неидеальность обычно остаются вне контура оптимизации [22, 23, 26-29].

Существенное развитие получили исследования QoT управления. В них показано, что использование только геометрических сетевых ограничений недостаточно для надёжной эксплуатации гибких оптических сетей, а принятие решений должно быть дополнено оценкой качества передачи с учётом шума усилителей, нелинейностей, межканальных помех и спектрального окружения [26, 27]. В современных работах используются как аналитические, так и гибридные модели QoT; растёт интерес к ML-подходам, мониторингу физического уровня и прогнозированию деградации канала [87, 88]. Тем не менее во многих публикациях QoT рассматривается преимущественно как характеристика маршрута, а не как функция внутренней конфигурации конкретного суперканала и аппаратных параметров адаптивного транспондера. Для многонесущих систем этого уже недостаточно, поскольку качество передачи существенно зависит от числа подканалов, их взаимного расположения, параметров фильтрации и неравномерности по краям спектрального блока.

Параллельно с развитием аналитических и гибридных моделей QoT значительное внимание в современной литературе уделяется программным инструментам, обеспечивающим численную оценку качества передачи на уровне оптического тракта и на уровне сети. Среди таких инструментов особую роль играет открытая библиотека GNPу, разработанная консорциумом Telecom Infra Project и реализующая обобщённую гауссовскую модель нелинейных шумов (GN-модель) для расчёта OSNR и обобщённого отношения сигнал/шум (GSNR) по произвольному маршруту в волоконно-оптической сети. GN-модель позволяет учитывать не только шумы спонтанного излучения каскада усилителей (ASE), но и нелинейные искажения, обусловленные эффектами фазовой самомодуляции (SPM), перекрёстной фазовой модуляции (XPM) и четырёхволнового смешения (FWM), а также кумулятивное влияние каскадной фильтрации в узлах ROADM. Благодаря этому GNPу обеспечивает существенно более точную оценку достижимого OSNR на длинных многопролётных маршрутах по сравнению с упрощёнными линейными моделями, в которых учитывается только ASE-составляющая.

Коммерческие среды, такие как VPItransmissionMaker и OptiSystem, обеспечивают высокую точность за счёт детального моделирования каждого оптического компонента, однако характеризуются значительными вычислительными затратами при параметрическом моделировании, что ограничивает объём генерируемых данных. В качестве альтернативы в ряде публикаций используются программные библиотеки на языке Python, реализующие численное моделирование когерентных оптических систем связи, в частности OptiCommPy. Данная

библиотека позволяет моделировать генерацию QAM/OFDM-сигналов, распространение по волокну методом SSFM, когерентный приём и цифровую обработку сигнала, обеспечивая при этом вычислительную производительность, достаточную для генерации датасетов объёмом в десятки тысяч конфигураций. Однако в опубликованных работах OptiCommPy используется преимущественно для исследования отдельных физических эффектов (нелинейности, дисперсия, формат модуляции), а не для систематического формирования области допустимых режимов адаптивного транспондера и не в связке с сетевыми инструментами QoT-оценки.

Отдельно следует выделить исследования, посвящённые управлению оптическими сетями на основе T-SDN [16, 17, 18, 86, 87, 89]. Современные обзоры показывают, что оптические сети эволюционируют в сторону централизованного управления, где телеметрия физического уровня, расчёт управляющего решения и проверка результата объединяются в едином контуре. В этой логике развиваются задачи автоматизированного выделения ресурсов, динамической реконфигурации и восстановления после отказов. Для S-BVT и суперканалов предложены подходы к интеллектуальному выделению емкости канала, а также схемы управления, учитывающие распределение нагрузки и восстановление сервиса. Однако даже в таких работах уровень абстракции часто остаётся сетевым: они хорошо описывают логику распределения спектральных и маршрутных ресурсов, но лишь ограниченно включают в модель реальные особенности реализации транспондера.

Для раскрытия тематики, представленной в диссертации особенно важны работы, в которых рассматривается управление именно суперканалами с обратной связью от физического уровня. В последних публикациях [70, 77, 79] показано, что частотные дрейфы и фильтрационные смещения могут заметно ухудшать работу суперканала, особенно по краевым подканалам, и поэтому для сохранения требуемого QoT требуется динамическая подстройка частотных позиций, межподнесущего шага и полос фильтрации. Экспериментальные исследования по автоматической оптимизации суперканалов в T-SDN подтверждают, что уменьшение запасов и более плотная упаковка возможны только при наличии замкнутого цикла для оценки состояния, корректировки параметров и повторной верификации [90, 91]. Эти результаты особенно ценны, поскольку они приближают управление суперканалом к аппаратно-зависимой логике, однако рассматривают в основном отдельные аспекты настройки и не формируют полноценной модели выбора режима передачи адаптивного транспондера с учётом всей совокупности его аппаратных ограничений.

Анализ аппаратно-ориентированных публикаций показывает, что для OFDM-суперканалов критическое значение имеют неидеальности частотно-селективных и модуляционных элементов: ограниченная полоса электрического тракта, чувствительность к нарушению ортогональности поднесущих, межподнесущая интерференция, неравномерность

спектральной формы и фильтрационное сужение [46, 51, 52]. В уже собранной структуре диссертации этот аспект закономерно связан с использованием AWGR как ключевого элемента формирования и разделения поднесущих, поскольку именно такие компоненты определяют фактическую область допустимых режимов суперканала. Однако в литературе вопросы реализации таких транспондеров чаще рассматриваются либо как задача аппаратного проектирования, либо как задача передачи и оценки BER/EVM/Q-factor, без полноценного включения этих параметров в сетевой контур реконфигурации [65, 66]. Этот разрыв между физической реализуемостью и сетевым управлением и составляет один из главных нерешённых вопросов.

В ряде работ по гибким оптическим сетям и задачам RMSA основной акцент сделан на сетевом уровне, выборе маршрута и спектрального ресурса, а транспондер моделируется как набор профилей передачи, проверяемых по упрощённой QoT-оценке (обычно через пороги OSNR). Так, в работе Jinno et al. предложена архитектура SLICE и концепция гибких оптических трактов с OFDM транспондером и WXC с переменной полосой пропускания, направленные на повышение спектральной эффективности и поддержку переменной полосы, однако вопросы аппаратных ограничений формирования суперканалов и их влияния на метрики качества передачи в рамках контура управления не являются центральными [20].

Современные QoT подходы, в том числе работы Agranaei и соавторов, расширяют постановку задачи на многодиапазонные сценарии и учитывают физические факторы на уровне канала, а также вводят дополнительные сетевые критерии (фрагментация спектра, стоимость реконфигураций). Например, в работе по SF- и QoT-aware RBMSA для динамических гибких оптических сетей показано снижение количества блокировок до 33,2 % относительно алгоритма, учитывающего только QoT, при умеренном увеличении средней длины маршрута [26]. В другой работе Agranaei и соавторов для динамических C+L-band сетей предлагается набор QoT эвристик для гибридного груминга. Авторы сообщают о снижении частичной вероятности блокировки до 35 %, снижение потребности в развёртывании новых интерфейсов до 20 % и снижение числа реконфигураций до 80 % в зависимости от выбранной политики [27].

В диссертационной работе предложен подход, ориентированный на сквозное управление режимами передачи адаптивного транспондера в контуре T-SDN. В отличие от сетевых постановок, решение выбирается из области аппаратно реализуемых конфигураций суперканала с учетом реальных ограничений формирования (неравномерность спектрального формирования, деградация крайних поднесущих, межподнесущая интерференция), а QoT оценка выполняется по метрикам BER/Q/EVM с использованием ML-предиктора. Надёжность решения обеспечивается пост-верификацией QoT после применения режима и механизмами перехода к

предыдущему режиму передачи, что снижает риск закрепления режимов с минимальным запасом качества при малых флуктуациях параметров оптического тракта [85, 86].

Выполненный обзор литературы показывает, что на сегодняшний день сформированы необходимые теоретические и технологические основания для построения гибких оптических сетей: разработаны концепция гибкой сетки частот [60, 72, 80, 92], предложены архитектуры транспондеров BVT и S-BVT [18, 19], исследованы способы реализации суперканалов [74, 75, 77, 82-86, 93-107], созданы методы RSA/RMSA и QoT управления [22, 23], а также активно развивается T-SDN [86, 87, 89]. Вместе с тем остаются нерешёнными следующие ограничения: сетевые алгоритмы во многих случаях не учитывают реальные аппаратные ограничения транспондера; аппаратные параметры тракта и самого транспондера слабо интегрированы в единый контур управления; отсутствует сквозная QoT-ориентированная реконфигурация суперканала, одновременно учитывающая маршрут, спектр, структуру подканалов и аппаратную реализуемость. Следовательно, актуальной остаётся задача разработки метода управления адаптивным оптическим транспондером, в котором выбор и реконфигурация режима передачи осуществляются на основе совместного учёта сетевых и аппаратных параметров, а QoT рассматривается как результат их взаимодействия. Именно эта задача и определяет научную направленность настоящей диссертационной работы.

1.12. Общая постановка проведения исследования

В диссертационной работе исследование построено как последовательный переход от физически обоснованной модели адаптивного оптического транспондера к практическому методу выбора и реконфигурации его режимов передачи по параметрам оптического тракта (рис. 1.1).

На первом этапе формируется и уточняется структурная схема адаптивного транспондера, ориентированного на передачу суперканалов. В качестве базовой среды моделирования используется программный комплекс OptiSystem, позволяющий собрать сквозную модель. В модели задаются функциональные блоки транспондера, а также параметры линии связи, соответствующие metro сети. Такая постановка обеспечивает возможность анализа не только сетевых характеристик, но и реальных аппаратных ограничений устройства.

На втором этапе выполняется параметрическое исследование режимов передачи транспондера. Для заданной архитектуры систематически варьируются ключевые параметры, определяющие структуру и качество суперканала: число подканалов и ширина спектрального блока, формат модуляции, мощность передачи, длина маршрута, а также параметры оптических компонентов. Для каждой конфигурации фиксируются показатели качества передачи (QoT), включая BER, EVM, Q-factor, OSNR, а также показатели, отражающие различие между центральными и краевыми подканалами. В результате формируется набор экспериментальных

данных, связывающий параметры режима передачи и параметры тракта с достигаемыми QoT-характеристиками.

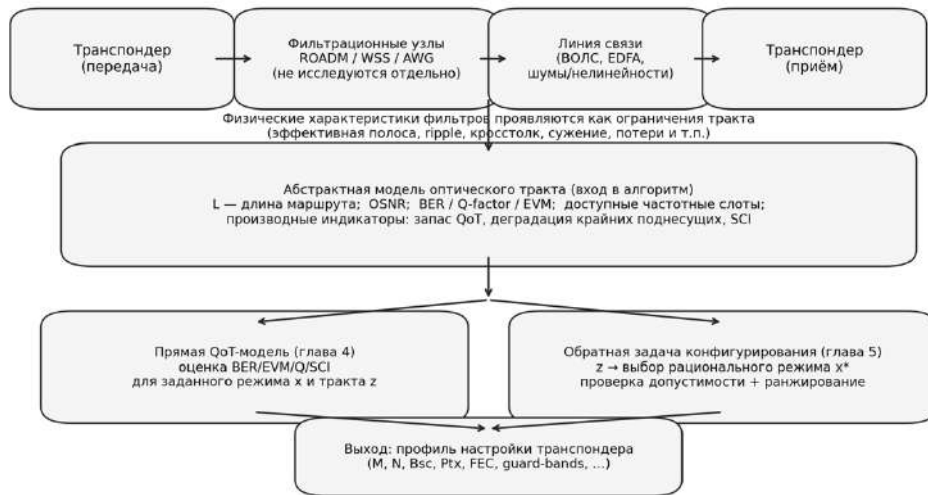


Рисунок 1.1 Общая схема проведения исследования

На третьем этапе результаты параметрических экспериментов используются для построения модели допустимости режима и области допустимых конфигураций. Иными словами, решается прямая задача: по заданным параметрам транспондера и тракта определяется, допустим ли режим передачи по QoT-ограничениям, и как меняется запас по качеству при увеличении ширины суперканала и числа подканалов. Такая модель позволяет выделить области помехоустойчивых, рациональных и предельных режимов и формирует основу для дальнейшего автоматизированного выбора конфигурации.

На четвёртом этапе выполняется переход к ключевой для практики постановке — обратной задаче конфигурирования адаптивного оптического транспондера. В этой задаче входом являются заранее известные характеристики конкретного оптического тракта (длина маршрута, OSNR, допустимый BER, доступные частотные слоты и требуемая скорость передачи), а выходом — набор параметров настройки транспондера, обеспечивающий рациональный режим передачи. Важной особенностью является то, что обратная задача решается как автоматизированная процедура выбора режима из множества аппаратно реализуемых конфигураций с проверкой QoT по построенной модели.

На заключительном этапе разрабатывается практический алгоритм и архитектура программного модуля, предназначенного для работы в составе T-SDN контроллера. Такой модуль принимает параметры тракта, формирует кандидаты режимов передач транспондера, оценивает их допустимость по QoT-модели, ранжирует допустимые конфигурации и выдаёт рациональный профиль настройки устройства. Тем самым результаты физического моделирования и параметрического исследования в OptiSystem преобразуются в прикладной

метод автоматического выбора и реконфигурации режима передачи адаптивного оптического транспондера.

В диссертационной работе не ставится задача отдельного исследования ROADM/WSS/фильтров как самостоятельных устройств. Параметры таких элементов (полоса пропускания, форма АЧХ, неравномерность потерь, межканальная изоляция, межканальные перекрёстные помехи, групповая задержка и др.) рассматриваются не как объект исследования, а как часть заданных характеристик оптического тракта (Таблица 1.1). Это позволяет сосредоточить исследование на основном объекте диссертации — режимах работы и алгоритмах конфигурирования транспондера, а не на детальной оптимизации фильтров или отдельных оптических узлов.

Таблица 1.1 Основные характеристики оптического тракта городской оптической сети

Параметр	Типичное значение
Топология	Кольцевая
Общая длина маршрута	10 – 120 км
Длина одного участка между узлами	5 – 25 км
Тип волокна	SMF G.652.D
Коэффициент затухания волокна	0,20 – 0,25 дБ/км
Хроматическая дисперсия	16 – 18 пс/(нм·км)
PMD	$\leq 0,1 - 0,2$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$
Потери на сварном соединении	0,05 – 0,10 дБ
Потери на разъёме	0,2 – 0,5 дБ
Потери узлов ввода/вывода	1 – 3 дБ
Вносимые потери ROADM	6 – 12 дБ
Усиление EDFA	15 – 25 дБ
Коэффициент шума EDFA	4,5 – 5,5 дБ
Рабочий спектральный диапазон	C-band (1530 – 1565 нм)
Шаг сетки частот	25 ГГц
Число узлов ROADM на маршруте	2 – 8
Неравномерность потерь в полосе ROADM	0,5 – 1,5 дБ
Межканальная изоляция ROADM	≥ 25 дБ
Межканальные перекрёстные помехи ROADM	≤ -25 дБ
Групповая задержка ROADM	10 – 20 пс
Суммарные линейные потери на маршруте	10 – 30 дБ
Требуемый OSNR на приеме	Определяется форматом модуляции
Эксплуатационный запас	1,5 – 2 дБ

Выводы по первой главе

Проведённый анализ показал, что развитие транспортной инфраструктуры 6G ведёт к переходу от Fixed-Grid DWDM к Flex-Grid EON, в которых центральную роль играют адаптивные транспондеры, способные формировать суперканалы переменной емкости [11-15, 54-55, 108].

Показано, что суперканалы становятся основным механизмом масштабирования пропускной способности в гибких оптических сетях, поскольку позволяют адаптировать ширину

спектрального блока, число подканалов и формат передачи к текущему спросу и состоянию оптического тракта. Наиболее перспективными вариантами их реализации являются Nyquist-WDM, OFDM- и SDM-суперканалы, причём именно OFDM-подход в наибольшей степени соответствует задачам гибкого управления полосой и реконфигурации структуры канала [82-86, 93-107].

Установлено, что существующие RMSA подходы в значительной степени ориентированы на сетевой уровень и обычно используют упрощённое представление транспондера как абстрактного профиля передачи, задаваемого парой скорость–модуляция и проверяемого по пороговому условию OSNR. В результате реальные аппаратные ограничения такие как полоса электрического тракта, характеристики частотно-селективных компонентов, неравномерность спектрального формирования, деградация крайних подканалов, межподнесущая интерференция оказываются неучтёнными.

На основании проведённого мною анализа научная проблема диссертационного исследования формулируется следующим образом:

существующие методы управления в гибких оптических сетях не обеспечивают сквозной выбор и реконфигурацию режимов передачи адаптивного оптического транспондера с учётом реальных (число активных поднесущих, набор поддерживаемых форматов модуляции, диапазон мощности передачи, параметры модулятора, характеристики AWGR) аппаратных ограничений формирования суперканала и требований к качеству передачи (ограничения по OSNR, BER, Q-factor, EVM), что приводит к резервированию спектральных ресурсов под худший случай и снижению устойчивости сети при динамическом трафике.

Отсюда вытекает необходимость разработки:

- математической модели режимов передачи адаптивного транспондера;
- метода определения допустимых и оптимальных конфигураций суперканала;
- алгоритмов QoT-ориентированной реконфигурации режима передачи;

Таким образом, глава 1 обосновывает переход от общей проблематики 6G и гибких оптических сетей к конкретной задаче диссертационного исследования — разработке методов управления адаптивными оптическими транспондерами, формирующими суперканалы в условиях динамического трафика, ограниченного спектрального ресурса и необходимости учёта реальных аппаратных ограничений.

Глава 2. Математическая модель выбора режимов передачи адаптивного оптического транспондера

2.1. Постановка задачи математического моделирования режимов передачи адаптивного оптического транспондера

Адаптивный оптический транспондер в гибкой оптической сети рассматривается как устройство с конечным множеством допустимых режимов передачи, отличающихся параметрами модуляции, шириной занимаемой полосы, скоростью передачи, параметрами помехоустойчивого кодирования и уровнем требований к параметрам оптического тракта (длина маршрута, OSNR, накопление шумов, доступный спектральный блок). В отличие от транспондеров с фиксированными параметрами, адаптивный транспондер допускает изменение режима передачи в зависимости от характеристик оптического тракта, наличия спектральных ресурсов и требований обслуживаемого трафика.

Основная задача математического моделирования заключается в формальном описании области допустимых режимов передачи адаптивного оптического транспондера и в определении критериев выбора оптимального режима передачи для заданного оптического тракта. Такая модель должна учитывать одновременно:

- параметры самого транспондера;
- требования к формируемому суперканалу;
- ограничения по качеству передачи;
- ограничения по спектральным ресурсам;
- ограничения, связанные с аппаратной реализацией транспондера.

В рамках диссертационной работы математическая модель строится как модель выбора режима передачи транспондера, при котором обеспечивается требуемое качество передачи и максимальная эффективность использования спектральных ресурсов оптического тракта.

Рассмотрим адаптивный оптический транспондер, формирующий суперканал, состоящий из N поднесущих. Для каждой i -й поднесущей задаются параметры передачи, включающие формат модуляции m_i , мощность P_i , а также частотное положение в пределах спектрального блока. Множество допустимых форматов модуляции запишем в виде:

$$\mathcal{M} = \{\text{QPSK}, 8\text{-QAM}, 16\text{-QAM}, 32\text{-QAM}, 64\text{-QAM}\}$$

Пусть режим передачи адаптивного транспондера описывается вектором параметров

$$\mathbf{x} = (N, \Delta f, R_s, \{m_i\}_{i=1}^N, \{P_i\}_{i=1}^N, B_{sc}),$$

где

N — число активных поднесущих;

Δf — частотный интервал между соседними поднесущими;

R_s — символьная скорость;

$m_i \in \mathcal{M}$ — формат модуляции i -й поднесущей;

P_i — мощность i -й поднесущей;

B_{sc} — суммарная ширина суперканала.

В рамках диссертационной работы задача состоит в выборе такого режима $\mathbf{x}$, который обеспечивает максимальную эффективность использования спектральных ресурсов канала при соблюдении ограничений по качеству передачи и аппаратным возможностям транспондера.

Для практического управления достаточно параметризовать значения M и N при фиксированных Δf , что соответствует наиболее распространённым сценариям эксплуатации волоконно-оптических систем связи [56].

Использование OFDM при реализации транспондеров позволяет формировать суперканалы с варьируемой полосой пропускания за счет изменения числа активных поднесущих [11].

Суммарная скорость передачи в общем случае определяется выражением [55]

$$R = N \cdot R_i \cdot (1 - \rho_{FEC}), \quad (2.1)$$

где ρ_{FEC} — коэффициент полезной нагрузки после учёта избыточности кодирования, скорость передачи по i -й поднесущей определяется как

$$R_i = \log_2 |m_i| \cdot R_s, \quad (2.2)$$

где $|m_i|$ — размер созвездия соответствующего формата модуляции.

Пропускная способность адаптивного оптического транспондера при выбранном режиме передачи оценивается как:

$$R = N \cdot R_0 \cdot b(M) \cdot (1 - \rho_{FEC}), \quad (2.3)$$

где N — число активных поднесущих, R_0 — скорость передачи на поднесущей при использовании формата модуляции BPSK, $b(M)$ — число бит на символ при выбранном формате модуляции ($b(QPSK)=2$, $b(8QAM)=3$, $b(16QAM)=4$, $b(32QAM)=5$, $b(64QAM)=6$ соответственно), ρ_{FEC} — доля избыточности кодирования. При эмуляции используется нормированная модель с фиксированным R_0 и заданным ρ_{FEC} .

Спектральный (или частотный) слот - базовая структурная единица спектра или конкретный выделенный диапазон. Согласно стандарту ITU-T G.694.1 [61], частотный слот определяется как непрерывный диапазон частот, который характеризуется номинальной центральной частотой и шириной.

Спектральный блок - непрерывная совокупность спектральных слотов, которая фактически резервируется под конкретное оптическое соединение из конца в конец.

Для согласования модели с гибкой сеткой частот вводится связь спектрального блока со слотами $S = B/\Delta f_{slot}$, где S — число занятых слотов на каждом ребре маршрута.

В качестве целевой функции примем максимизацию эффективной спектральной эффективности суперканала с учётом качества передачи:

$$SE(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^N R_i (1 - \rho_{FEC})}{B_{sc}}, \quad (2.4)$$

Ширина спектрального блока суперканала определяется числом поднесущих, их шагом и суммарной шириной защитных интервалов:

$$B_{sc} = N \cdot \Delta f + B_{edge} + G \quad (2.5)$$

где B_{edge} учитывает спектральное расширение на границах суперканала, зависящее от формы сигнала и параметров фильтрации, а G учитывает суммарные спектральные зазоры на границах спектрального блока, а также возможные дополнительные интервалы, связанные с требованиями фильтрации, перестройки и предотвращения межканальной интерференции.

Тогда задача выбора оптимального режима может быть записана в виде

$$\mathbf{x}^* = \arg \max_{\mathbf{x} \in \Omega_{adm}} SE(\mathbf{x}), \quad (2.6)$$

где Ω_{adm} — множество допустимых режимов передачи адаптивного транспондера, $\arg \max$ обозначает оператор выбора значения переменной $\mathbf{x} \in \Omega_{adm}$, при котором целевая функция спектральной эффективности $SE(\mathbf{x})$ принимает максимальное значение на множестве допустимых режимов Ω_{adm} .

Таблица 2.1 Входные и выходные параметры математической модели режимов передачи адаптивного оптического транспондера

Группа параметров	Обозначение	Наименование параметра	Единицы измерения
Входные параметры	N	Число активных поднесущих	—
	Δf	Шаг между поднесущими	Гц
	R_i	Символьная скорость i -й поднесущей	Гбод
	m_i	Формат модуляции i -й поднесущей	—
	P_i	Мощность i -й поднесущей	дБм
	B_{sc}	Ширина суперканала	Гц
	P_{max}	Максимально допустимая суммарная мощность	дБм
Выходные параметры	$S(f)$	Спектр суперканала	Гц
	R	Суммарная скорость передачи	Гбит/с
	SE	Спектральная эффективность	бит/с/Гц
	BER_i	BER i -й поднесущей	—
	EVM_i	Векторная ошибка модуляции i -й поднесущей	%
	$OSNR_i$	OSNR i -й поднесущей	дБ

2.2. Формирование критериев допустимости и оптимальности режима передачи адаптивного транспондера

После формализации задачи оптимизации параметров суперканала необходимо определить критерии, по которым тот или иной режим передачи адаптивного транспондера может быть признан допустимым, а среди допустимых режимов, оптимальным. Данный этап является принципиально важным, поскольку именно он связывает математическую постановку задачи с практической процедурой выбора конфигурации транспондера в волоконно-оптической системе передачи.

Критерий допустимости режима

Будем считать, что режим передачи адаптивного транспондера является **допустимым**, если для него одновременно выполняются ограничения по качеству передачи, энергетическим параметрам, полосе пропускания и аппаратным характеристикам устройства. В формальном виде условие допустимости можно записать как

$$\mathbf{x} \in \Omega_{\text{adm}}, \quad (2.7)$$

где Ω_{adm} — множество допустимых режимов, определяемое по формуле:

$$\Omega_{\text{adm}} = \{x: Q(x) \geq Q_{\min}, EVM(x) \leq EVM_{\max}, OSNR_{\text{req}}(x) \leq OSNR_{\text{avail}}\}.$$

После этого для каждой допустимой конфигурации вычисляется интегральная оценка качества передачи:

$$QoT_i = w_1 \frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\min}} + w_2 \frac{OSNR_i - OSNR_{\text{req}}}{OSNR_{\text{req}}} + w_3 \cdot 20 \log_{10} \left(\frac{EVM_{\max}}{EVM_i} \right), \quad (2.8)$$

где

Q_i — Q-factor на i -й поднесущей;

$OSNR_i$ — отношение сигнал/шум на i -й поднесущей;

EVM_i — векторная ошибка модуляции на i -й поднесущей;

w_1, w_2, w_3 — весовые коэффициенты, удовлетворяющие условию $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

Значения весовых коэффициентов определяются политикой управления сетью. В базовом сценарии используются равные веса $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$. Для сценариев с приоритетом устойчивости рекомендуется увеличение w_2 (OSNR-запас) до 0,5 при снижении w_1 и w_3 до 0,25 каждого.

Тогда режим передачи транспондера считается допустимым, если для всех поднесущих выполняется условие

$$QoT_i \geq QoT_{\text{th}}, i = 1, \dots, N, \quad (2.9)$$

где QoT_{th} — пороговое значение качества передачи.

На практике в качестве основного критерия допустимости может использоваться ограничение по BER, дополненное ограничениями по OSNR, Q-factor и EVM [115, 116].

Ограничения задачи

1. Ограничение по скорости передачи

Первым базовым ограничением является требование по обеспечению заданной полезной скорости передачи R_{req} . Для любого рассматриваемого режима должно выполняться условие

$$R_{req} \geq C_{req}, \quad (2.10)$$

где C_{req} – требуемая скорость передачи для конкретного запроса.

Если данное условие не выполняется, режим не может использоваться для обслуживания соответствующего трафика независимо от его спектральной эффективности или устойчивости.

2. Ограничение по BER

Для каждой поднесущей должно выполняться

$$BER_i \leq BER_{th}, i = 1, \dots, N, \quad (2.11)$$

где BER_{th} — допустимое пороговое значение коэффициента ошибок. Далее в работе под BER_{th} понимается пороговое значение вероятности битовой ошибки после FEC.

3. Ограничение по OSNR

Для выбранного формата модуляции необходимо обеспечить минимально допустимое значение отношения сигнал/шум:

$$OSNR_i \geq OSNR_{req}(m_i), i = 1, \dots, N. \quad (2.12)$$

Величина $OSNR_{req}(m_i)$ зависит от выбранного формата модуляции и определяется либо аналитически, либо на основе предварительно построенных зависимостей BER/OSNR [115].

4. Ограничение по суммарной мощности

Суммарная мощность всех поднесущих не должна превышать максимально допустимое значение:

$$\sum_{i=1}^N P_i \leq P_{max}. \quad (2.13)$$

5. Ограничение по спектральному ресурсу

Ширина суперканала должна укладываться в доступный спектральный блок сети:

$$B_{sc} \leq B_{avail}. \quad (2.14)$$

С учётом (2.5) это условие можно записать как

$$N \cdot \Delta f \leq B_{avail}. \quad (2.15)$$

6. Ограничение по аппаратным характеристикам транспондера

Даже если режим удовлетворяет требованиям по скорости, спектру и качеству передачи, он может оказаться нереализуемым аппаратно. Поэтому необходимо учитывать ограничения, связанные с конкретной архитектурой адаптивного транспондера.

К таким ограничениям относятся:

- максимально допустимое число поднесущих $N \leq N_{max}$;

- диапазон перестройки шага поднесущих $\Delta f_{min} \leq \Delta f \leq \Delta f_{max}$;
- допустимые форматы модуляции $m_i \in \mathcal{M}$;
- ограничение по полосе электрического тракта $R_s \leq B_e$;
- ограничение по полосе оптических фильтров и AWGR;
- ограничение по диапазону выходной мощности $P_{tx}^{min} \leq P_{tx} \leq P_{tx}^{max}$;
- дискретность настройки отдельных параметров.

Для адаптивного транспондера на базе спектрально-селективных компонентов существенным является ограничение, связанное с полосой пропускания электрической и оптической частей. Введём условие согласования полос: [71]

$$B_e \leq B_{AWGR}^{eff}, \quad (2.16)$$

где B_e — электрическая полоса формируемого сигнала MZM; B_{AWGR}^{eff} — эффективная полоса пропускания канала AWGR.

Нарушение этого условия приводит к фильтрационному срезу спектральных компонент, росту EVM и ухудшению BER и Q-factor, что фактически ограничивает множество допустимых режимов передачи транспондера. Важно также учитывать, что аппаратные элементы адаптивного транспондера не только накладывают ограничения, но и непосредственно влияют на QoT. Например, ограниченная полоса модулятора, АЦП/ЦАП, фильтров и неравномерность амплитудно-частотной характеристики AWGR формируют дополнительные искажения, которые затем проявляются на BER, EVM и межподнесущих перекрёстных помехах.

Таким образом, аппаратная реализуемость режима не может рассматриваться отдельно от качества передачи; эти два аспекта тесно связаны.

7. Ограничение с учётом нелинейных искажений

При увеличении мощности и числа поднесущих в волоконно-оптическом тракте возрастает влияние нелинейных эффектов [75, 117]. В рамках GN-модели нелинейная составляющая ухудшения качества может быть учтена через мощность нелинейного шума:

$$P_{NL,i} = \eta P_i^2 L_{eff} N_{spans}, \quad (2.17)$$

где

η — коэффициент, характеризующий нелинейное взаимодействие каналов;

L_{eff} — эффективная длина пролёта;

N_{spans} — число пролётов.

Тогда результирующее отношение сигнал/шум на i -й поднесущей можно записать как

$$\frac{1}{OSNR_{tot,i}} = \frac{1}{OSNR_{ASE,i}} + \frac{1}{OSNR_{NL,i}}. \quad (2.18)$$

Таким образом, задача оптимизации параметров суперканала состоит в выборе числа поднесущих, форматов модуляции и распределения мощности по поднесущим, обеспечивающих максимум спектральной эффективности при соблюдении ограничений (2.9 – 2.16).

Интегральный критерий качества

Для удобства дальнейшего анализа введём интегральный критерий качества передачи режима $\mathbf{x}$, который будем обозначать как

$$Q_{\text{adm}}(\mathbf{x})$$

В простейшем случае он может быть задан бинарно:

$$Q_{\text{adm}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mathbf{x} \in \Omega_{\text{adm}}, \\ 0, & \text{если } \mathbf{x} \notin \Omega_{\text{adm}}. \end{cases} \quad (2.19)$$

Такое представление удобно для разделения пространства режимов на допустимую и недопустимую области. Однако для задач адаптивной реконфигурации более полезно использовать не только бинарную оценку, но и количественную меру запаса по качеству передачи.

С этой целью введём формулу для запаса по качеству передачи:

$$QoT(\mathbf{x}) = \min_{i=1, \dots, N} \{QoT_i - QoT_{\text{th}}\}, \quad (2.20)$$

где QoT_i — текущее значение интегрального показателя качества на i -й поднесущей, QoT_{th} — порог допустимости передачи.

Если $QoT(\mathbf{x}) > 1$, то режим является допустимым с положительным запасом по качеству; если $QoT(\mathbf{x}) = 1$, режим является предельным; если $QoT(\mathbf{x}) < 1$, режим следует считать недопустимым.

Такое определение особенно важно для суперканальных режимов, поскольку качество передачи в этом случае определяется не средним значением QoT по всем поднесущим, а наиболее худшей поднесущей.

Множество допустимых режимов

С учётом введённых ограничений множество допустимых режимов адаптивного транспондера можно представить как

$$\Omega_{\text{adm}} = \left\{ \mathbf{x} \mid \begin{array}{l} BER_i \leq BER_{\text{th}}, \\ OSNR_i \geq OSNR_{\text{req}}(m_i), \\ QoT_i \geq QoT_{\text{th}}, \\ \sum_{i=1}^N P_i \leq P_{\text{max}}, \\ B_{\text{sc}} \leq B_{\text{avail}}, \\ B_e \leq B_{\text{AWGR}}^{\text{eff}} \end{array} \quad \forall i = 1, \dots, N \right\}. \quad (2.21)$$

Таким образом, допустимый режим определяется не одним параметром, а совместным выполнением QoT-ограничений, энергетических ограничений, условий спектрального уплотнения и аппаратных ограничений транспондера.

Критерий оптимального режима и реконфигурации

Среди допустимых режимов необходимо выбрать режим, который является наилучшим по совокупности критериев. Если множество Ω_{adm} не пусто, то оптимальным считается режим $\mathbf{x}^*$, максимизирующий спектральную эффективность (2.4). В задаче реконфигурации адаптивного транспондера важна не только максимизация SE , но и скорость перехода из текущего режима $\mathbf{x}^{(k)}$ в новый режим $\mathbf{x}^{(k+1)}$.

Однако для адаптивного транспондера этого недостаточно, поскольку режим с максимальной спектральной эффективностью может иметь минимальный запас по качеству и быть крайне чувствительным к небольшим изменениям состояния оптического тракта, такими как флуктуации OSNR, дрейф частоты лазеров, хроматической дисперсии, рост нелинейных искажений. Поэтому в практической постановке критерий оптимальности должен учитывать не только пропускную способность, но и устойчивость режима [102].

Поэтому в более общем случае может использоваться модифицированная целевая функция

$$J(\mathbf{x}) = w_1 \frac{SE(\mathbf{x})}{SE_{\max}} + w_2 \frac{QoT(\mathbf{x})}{QoT_{\max}}, \quad (2.22)$$

где

$SE(\mathbf{x})$ — спектральная эффективность, $QoT(\mathbf{x})$ — запас по качеству передачи,

w_1, w_2 — весовые коэффициенты.

При $w_1 = 0,6$ и $w_2 = 0,4$ обеспечивается компромисс между спектральной эффективностью и устойчивостью режима. Увеличение w_2 до 0,7 приводит к выбору конфигураций с запасом QoT на 0,5–1,0 дБ выше, но снижает среднюю спектральную эффективность на 8–12 %.

Тогда **оптимальным режимом** будем считать такой допустимый режим, для которого значение функции $J(\mathbf{x})$ максимально:

$$\mathbf{x}^* = \arg \max_{\mathbf{x} \in \Omega_{\text{adm}}} J(\mathbf{x}). \quad (2.23)$$

Оптимальный режим должен обеспечивать не просто максимально возможную пропускную способность, а наилучший компромисс между спектральной эффективностью и качеством передачи.

Такое представление особенно важно для дальнейшей интеграции модели транспондера в контур управления T-SDN, где решение должно приниматься с учётом как текущего состояния линии, так и затрат на изменение режима передачи [76, 97, 100]. Под текущим состоянием линии

в рамках ВОЛС понимаются оценка OSNR и её флуктуации, уровень и наклон спектральной мощности суперканала, доступный непрерывный спектральный блок на выбранном маршруте, накопленные фильтрационные искажения на каскаде ROADM/WSS, параметры дисперсионных и поляризационных искажений. Затраты на изменение режима включают время реконфигурации транспондера и прохождения управляющих команд, потенциальный кратковременный разрыв и деградацию сервиса, риск неподтверждения QoT и необходимость перехода к предыдущему режиму передачи, а также увеличение числа переключений, создающее дополнительную нагрузку на плоскость управления и ухудшающее стабильность при динамическом трафике.

Классификация режимов передачи

С учётом введённых критериев целесообразно выделить три класса режимов передачи адаптивного транспондера:

1. **допустимые устойчивые режимы**, для которых $QoT(x) > 1$;
2. **предельные режимы**, для которых $QoT(x) \approx 1$;
3. **недопустимые режимы**, для которых $QoT(x) < 1$.

Такое разделение важно для дальнейшего построения алгоритма реконфигурации, поскольку переход в предельный режим может быть оправдан только в условиях дефицита спектрального ресурса или необходимости временного увеличения ёмкости, тогда как устойчивые режимы предпочтительны для длительной эксплуатации.

Таким образом, критерий допустимости режима определяется выполнением ограничений по BER, OSNR, полосе суперканала, мощности и аппаратным параметрам транспондера, а критерий оптимальности — максимизацией целевой функции, учитывающей спектральную эффективность и запас по QoT. Введённое разделение режимов на допустимые, предельные и недопустимые создаёт основу для дальнейшего построения области допустимых решений и выбора рациональной конфигурации суперканала.

2.3. Математическая модель выбора режима передачи адаптивного транспондера

После формализации задачи оптимизации параметров суперканала и введения критериев допустимости и оптимальности необходимо построить математическую модель режима передачи адаптивного оптического транспондера. Такая модель должна описывать взаимосвязь между управляемыми параметрами устройства, формируемой спектральной структурой суперканала и показателями качества передачи. В отличие от общей оптимизационной постановки, представленной в предыдущем разделе, здесь основное внимание уделяется не столько выбору лучшего режима, сколько формальному описанию того, как именно параметры транспондера определяют характеристики передаваемого сигнала и его пригодность для передачи по заданному оптическому тракту.

С математической точки зрения OFDM-суперканал может быть представлен как сумма спектрально упорядоченных поднесущих, каждая из которых несёт независимый поток данных и характеризуется собственными параметрами модуляции и мощности. Комплексный сигнал на выходе передающей части транспондера может быть записан в виде [93]

$$s(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{P_i} a_i(t) e^{j2\pi f_i t}, \quad (2.24)$$

где $a_i(t)$ — комплексная огибающая i -й поднесущей, определяемая выбранным форматом модуляции и символьной последовательностью; f_i — центральная частота i -й поднесущей; P_i — мощность i -й поднесущей.

Для равномерно расположенных поднесущих центральные частоты задаются как

$$f_i = f_0 + \left(i - \frac{N+1}{2}\right) \Delta f, i = 1, \dots, N, \quad (2.25)$$

где f_0 — центральная частота суперканала.

Таким образом, конфигурация суперканала определяется одновременно числом активных поднесущих, шагом между ними, распределением мощности и типом модуляции каждой поднесущей. Изменение любого из этих параметров приводит к изменению как спектральной структуры сигнала, так и показателей качества передачи.

Суммарная скорость передачи по суперканалу может быть записана в виде

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N R_i, \quad (2.26)$$

а эффективная скорость передачи с учётом ошибок

$$R_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^N R_i (1 - \text{BER}_i). \quad (2.27)$$

Тогда спектральная эффективность режима определяется выражением

$$SE(\mathbf{x}) = \frac{R_{\text{eff}}}{B_{\text{sc}}}. \quad (2.28)$$

Из выражений (2.26) – (2.28) следует, что спектральная эффективность возрастает при увеличении числа поднесущих, переходе к форматам модуляции более высокого порядка и уменьшении фрагментации спектральных слотов. Однако такое увеличение сопровождается ростом чувствительности к шумам, фильтрационным искажениям и нелинейным эффектам, что требует учёта показателей качества передачи.

Существенным отличием исследуемого адаптивного транспондера является наличие спектрально-селективной оптической части, формирующей дополнительные ограничения на допустимые режимы. В частности, на качество передачи влияет соотношение электрической полосы сигнала B_e и эффективной полосы пропускания канала AWGR $B_{\text{AWGR}}^{\text{eff}}$.

Введём коэффициент согласования полос

$$K_B = \frac{B_e}{B_{AWGR}^{\text{eff}}}. \quad (2.29)$$

Если $K_B < 1$, сигнал занимает полосу уже полосы пропускания AWGR, то искажения, обусловленные фильтрацией, минимальны. Если $K_B \approx 1$, режим является предельным, поскольку крайние спектральные компоненты начинают попадать на скаты АЧХ AWGR. Если $K_B > 1$, возникает рассогласование полос, приводящее к срезу спектральных компонент, росту EVM и ухудшению BER и Q-factor.

В реальном суперканале разные поднесущие работают в неодинаковых условиях. Крайние поднесущие обычно сильнее подвержены влиянию скатов АЧХ, межканальных перекрёстных помех и неравномерности потерь по портам AWGR. Для учёта этого эффекта введём отклонение качества передачи i -й поднесущей от среднего уровня:

$$\delta_i = Q_o T_i - Q_o \bar{T}, \quad (2.30)$$

где

$$Q_o \bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_o T_i. \quad (2.31)$$

Если $\delta_i < 0$, то качество данной поднесущей хуже среднего уровня; если $\delta_i > 0$, то лучше. На практике интерес представляет прежде всего минимальное значение δ_i , поскольку именно оно соответствует наиболее неблагоприятной поднесущей и определяет границу допустимости суперканала.

Для оценки неоднородности распределения качества по поднесущим можно ввести показатель

$$D_{Q_o T} = \max_i Q_o T_i - \min_i Q_o T_i, \quad (2.32)$$

который характеризует разброс качества передачи внутри суперканала. При увеличении числа поднесущих и расширении суперканала величина $D_{Q_o T}$, как правило, возрастает.

Таким образом, построена математическая модель режима передачи адаптивного оптического транспондера, связывающая вектор параметров суперканала с его спектральными, энергетическими и качественными характеристиками. Показано, что режим передачи определяется не только числом поднесущих и форматом модуляции, но и согласованием полос электрической и оптической частей, распределением мощности и неоднородностью условий передачи по поднесущим. Полученная модель позволяет перейти от общей постановки задачи оптимизации к исследованию конкретных областей допустимых режимов и служит основой для последующего анализа влияния параметров транспондера на показатели качества передачи.

2.4. Формирование множества допустимых режимов и области решений

После введения критериев допустимости и оптимальности необходимо перейти к описанию структуры множества допустимых режимов передачи адаптивного транспондера. Такой переход важен, поскольку практическая задача реконфигурации заключается не в поиске решения в абстрактном пространстве параметров, а в выборе конфигурации из некоторой области, ограниченной аппаратными и QoT-условиями.

Каждая точка в этом пространстве соответствует определённой конфигурации суперканала. При этом часть переменных носит дискретный характер, например число поднесущих и формат модуляции, а часть — непрерывный, например мощность и ширина полосы.

В общем случае не каждая точка пространства параметров соответствует физически реализуемому режиму. Например, некоторые конфигурации могут не удовлетворять ограничению по полосе AWGR, некоторые — ограничению по OSNR, а некоторые — порогу BER. Следовательно, задача выбора режима сводится к выделению из полного пространства параметров его допустимой части.

Обозначим через Ω полное множество потенциально возможных конфигураций транспондера, а через Ω_{adm} — множество допустимых режимов. Тогда

$$\Omega_{\text{adm}} = \{x \in \Omega \mid x \text{ удовлетворяет всем ограничениям допустимости}\}.$$

С учётом результатов предыдущего подраздела множество Ω_{adm} определяется пересечением нескольких подмножеств:

$$\Omega_{\text{adm}} = \Omega_{\text{BER}} \cap \Omega_{\text{OSNR}} \cap \Omega_P \cap \Omega_B \cap \Omega_{\text{HW}}, \quad (2.33)$$

где

Ω_{BER} — множество режимов, удовлетворяющих ограничению по BER;

Ω_{OSNR} — множество режимов, удовлетворяющих ограничению по OSNR;

Ω_P — множество режимов, удовлетворяющих ограничению по мощности;

Ω_B — множество режимов, укладывающихся в доступную спектральную полосу;

Ω_{HW} — множество режимов, удовлетворяющих аппаратным ограничениям транспондера.

Такое представление удобно, поскольку позволяет рассматривать влияние различных факторов на форму области решений по отдельности.

В общем случае область допустимых режимов не является ни выпуклой, ни связной. Это обусловлено тем, что:

- выбор форматов модуляции носит дискретный характер;
- увеличение числа поднесущих расширяет суперканал и усиливает аппаратные ограничения;

- рост мощности улучшает OSNR лишь до определённого предела, после чего возрастает влияние нелинейных искажений;
- для различных форматов модуляции QoT-пороги различны.

Следовательно, область допустимых режимов представляет собой сложную многомерную область, границы которой определяются совокупностью спектральных, энергетических и качественных ограничений.

Помимо множества допустимых режимов Ω_{adm} , введём также множество предельных режимов Ω_{lim} и множество недопустимых режимов Ω_{inad} .

Под **предельными режимами** будем понимать такие конфигурации, для которых запас по качеству близок к нулю:

$$\Omega_{lim} = \{\mathbf{x} \in \Omega \mid |QoT(\mathbf{x})| \leq \varepsilon\}, \quad (2.34)$$

где ε — малая положительная величина, определяющая допуск к границе области допустимости.

Под **недопустимыми режимами** будем понимать такие конфигурации, для которых нарушается хотя бы одно из ограничений:

$$\Omega_{inad} = \Omega \setminus (\Omega_{adm} \cup \Omega_{lim}). \quad (2.35)$$

Такое разделение особенно целесообразно в задачах адаптивной реконфигурации. Если режим находится внутри Ω_{adm} , система может работать с достаточным запасом устойчивости. Если режим попадает в Ω_{lim} , система ещё сохраняет работоспособность, но становится чувствительной к небольшим изменениям состояния линии. Если же режим попадает в Ω_{inad} , требуется обязательная реконфигурация параметров суперканала.

Среди всех допустимых режимов можно выделить подмножество оптимальных решений

$$\Omega_{opt} = \left\{ \mathbf{x} \in \Omega_{adm} \mid J(\mathbf{x}) = \max_{\mathbf{y} \in \Omega_{adm}} J(\mathbf{y}) \right\}, \quad (2.36)$$

где $J(\mathbf{x})$ — целевая функция, введённая в предыдущем подразделе.

На практике подмножество Ω_{opt} может содержать не одну, а несколько близких по качеству конфигураций. Это особенно характерно для адаптивных транспондеров, где одинаковая или близкая пропускная способность может быть достигнута за счёт различных сочетаний числа поднесущих, формата модуляции и ширины спектрального блока.

В задачах оперативного управления транспондером область допустимых решений используется как основа для процедуры выбора нового режима. Общая логика такого выбора может быть представлена следующим образом:

1. по текущему состоянию линии и аппаратным параметрам транспондера формируется область Ω_{adm} ,
2. внутри Ω_{adm} выделяется подмножество Ω_{opt} ,

3. из множества Ω_{opt} выбирается конкретный режим с учётом текущей сетевой политики.

Таким образом, область допустимых решений является не просто аналитической конструкцией, а рабочим инструментом принятия решения в адаптивной системе управления.

Для последующего использования в архитектуре T-SDN и в алгоритмах интеллектуальной реконфигурации область допустимых режимов удобно представлять не только аналитически, но и в табличной или графической форме, например в виде карты допустимых режимов (рис. 2.1). Такое представление упрощает интеграцию модели транспондера в контур управления и позволяет сократить время поиска нового режима передачи.

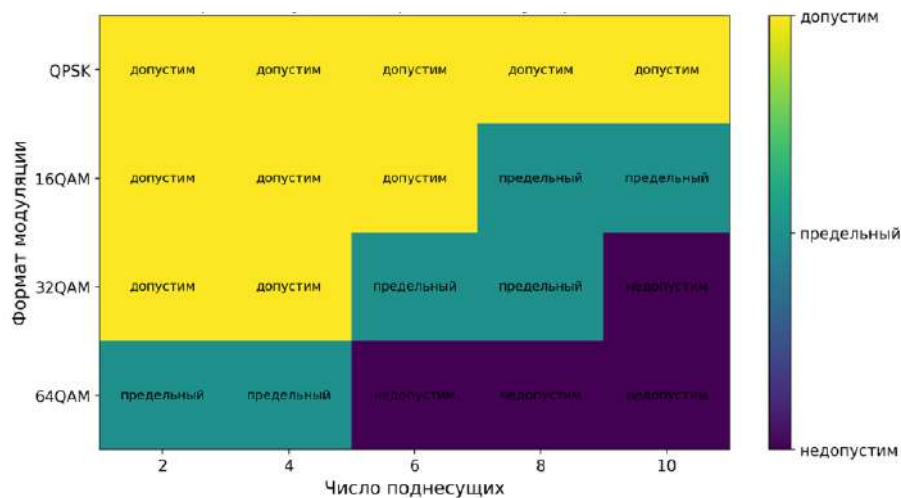


Рисунок 2.1 Карта допустимых режимов передачи адаптивного транспондера

Таким образом, введено множество допустимых режимов Ω_{adm} , выделены области предельных и недопустимых решений, а также определено подмножество оптимальных режимов Ω_{opt} . Показано, что область решений имеет сложную многомерную структуру и должна анализироваться через её двумерные и трёхмерные сечения. Полученный подход создаёт основу для последующего построения карт допустимых режимов и разработки метода реконфигурации адаптивного оптического транспондера в условиях изменяющегося состояния линии и сетевых ограничений.

2.5. Разработка метода выбора рационального режима передачи адаптивного транспондера

После формализации задачи оптимизации параметров суперканала, введения критериев допустимости и определения множества допустимых режимов необходимо перейти к разработке практического метода выбора рационального режима передачи адаптивного транспондера. В отличие от абстрактной задачи поиска глобального оптимума, в реальной системе управления требуется метод, который позволяет за ограниченное время определить конфигурацию

суперканала, обеспечивающую приемлемый компромисс между спектральной эффективностью и качеством передачи.

Далее решается задача, связанная с тем, что по заданным требованиям по скорости передачи, доступному спектральному ресурсу, длине маршрута, уровню OSNR и допустимому post-FEC BER требуется определить параметры настройки транспондера, обеспечивающие допустимый и рациональный режим передачи.

Под **рациональным режимом** будем понимать такой допустимый режим передачи адаптивного транспондера, который не обязательно является строго глобально оптимальным, но обеспечивает наилучшее соотношение между пропускной способностью, запасом по качеству передачи и устойчивостью к аппаратным ограничениям в конкретных условиях функционирования сети.

Пусть в момент времени k транспондер работает в режиме $\mathbf{x}^k$. В результате изменения состояния линии, нагрузки сети или доступного спектрального ресурса возникает необходимость перехода к новому режиму $\mathbf{x}^{(k+1)}$. Тогда задача выбора рационального режима заключается в нахождении такой конфигурации $\mathbf{x}^{(k+1)} \in \Omega_{\text{adm}}$, для которой максимизируется функция полезности (2.22).

Таким образом, рациональный режим определяется не только достижимой скоростью передачи, но и устойчивостью работы системы, а также ценой перехода из текущего состояния.

Метод выбора рационального режима опирается на следующие принципы

1. Приоритет допустимости над эффективностью

На первом этапе из пространства возможных конфигураций должны быть исключены все недопустимые режимы, не удовлетворяющие ограничениям по BER, OSNR, полосе суперканала, суммарной мощности и аппаратным характеристикам транспондера. Иными словами, выбор производится только внутри множества Ω_{adm} .

2. Приоритет устойчивых режимов над предельными

Если несколько режимов обеспечивают близкую спектральную эффективность, предпочтение должно отдаваться конфигурациям с большим запасом по QoT, поскольку они менее чувствительны к флуктуациям состояния линии и аппаратным отклонениям.

3. Минимизация объема реконфигурации

При переходе от текущего режима к новому целесообразно минимизировать число изменяемых параметров. Например, предпочтительнее сначала изменить формат модуляции или число активных поднесущих, а не полностью перестраивать весь суперканал. Это позволит уменьшить затраты на реконфигурацию и повысить устойчивость управления.

4. Учёт сетевых ограничений

Выбираемый режим должен соответствовать не только локальным параметрам транспондера, но и доступному спектральному окну, требованиям пропускной способности и политике управления ресурсами на уровне сети.

Предлагаемый метод выбора рационального режима включает последовательность этапов.

Этап 1. Сбор входных параметров

Пусть вектор требований к передаче и параметрам оптического тракта задаётся в виде

$$\mathbf{r} = (C_{\text{req}}, B_{\text{avail}}, L, OSNR_{\text{avail}}, BER_{\text{th}}, P_{\text{max}}), \quad (2.37)$$

где

C_{req} — требуемая скорость передачи, поступает от сетевого запроса

B_{avail} — доступная ширина спектрального блока;

L — длина оптического маршрута;

$OSNR_{\text{avail}}$ — доступный уровень OSNR в тракте;

BER_{th} — допустимое пороговое значение BER;

P_{max} — максимально допустимая суммарная мощность передачи.

Все данные для вектора $\mathbf{r}$ поступают от T-SDN контроллера. Тогда требуется определить такой вектор параметров адаптивного транспондера

$$\mathbf{x}^* = (N, \Delta f, R_s, m_i, P_i, B_{\text{sc}}), \quad (2.38)$$

который обеспечивает выполнение ограничений по качеству передачи, полосе частот, аппаратным возможностям транспондера и при этом является рациональным по критериям спектральной эффективности и устойчивости к нелинейным искажениям в оптическом тракте.

Следовательно, задача определения режима передачи транспондера может быть записана в виде отображения

$$\mathbf{x}^* = G(\mathbf{r}). \quad (2.39)$$

Практическая значимость рассматриваемой задачи определяется тем, что она соответствует реальному сценарию функционирования гибкой оптической сети: параметры передачи не являются постоянными и не задаются один раз на этапе первоначальной настройки сети. В данной сети с адаптивными транспондерами режим передачи выбирается из заранее определённого каталога аппаратно поддерживаемых конфигураций и может быть реконфигурирован при изменении требований сервиса и состояния оптического тракта. Поэтому система управления должна определять рациональную конфигурацию (формат модуляции, число слотов, число поднесущих) на основе текущей потребности в трафике и наблюдаемых параметров канала связи (OSNR, запас QoT, доступность спектрального блока на маршруте), обеспечивая выполнение QoT-ограничений и стабильность обслуживания. Поэтому разработка

метода синтеза режима передачи адаптивного транспондера является ключевым этапом перехода от модели устройства к технологии интеллектуальной реконфигурации.

Результатом работы этого метода является набор параметров настройки транспондера, включающий:

- число активных поднесущих N ;
- частотный интервал между поднесущими Δf ;
- символьную скорость R_s ;
- формат модуляции каждой поднесущей m_i ;
- распределение мощности P_i ;
- суммарную ширину суперканала B_{sc} ;
- электрическую полосу формируемого сигнала B_e ;
- итоговый статус режима: допустимый, предельный или недопустимый.

Тем самым метод выбора режима преобразует требования к передаче и параметры линии в конкретные команды настройки, передающей и приёмной частей транспондера.

Содержательно процедура выбора режима включает следующие этапы:

1. определение допустимого диапазона ширины суперканала по условию $B_{sc} \leq B_{avail}$;
2. оценка максимально допустимого порядка модуляции по условию $OSNR_{av} \geq OSNR_{req}(m)$;
3. определение числа поднесущих, позволяющего обеспечить требуемую скорость передачи;
4. проверка выполнения QoT-критериев по BER, Q-factor и EVM;
5. выбор рациональной конфигурации среди всех допустимых.

Таким образом, метод представляет собой процедуру синтеза конфигурации суперканала, согласованной одновременно с требованиями трафика, доступным спектральным ресурсом и состоянием тракта.

Этап 2. Формирование множества потенциально реализуемых режимов передачи

На основе входных данных формируется множество потенциально реализуемых конфигураций

$$\Omega_{cand} \subset \Omega, \quad (2.40)$$

которое включает режимы, потенциально достижимые при текущих ограничениях по полосе, числу поднесущих и формату модуляции.

На данном этапе выполняется генерация возможных сочетаний:

- числа поднесущих N ;
- форматов модуляции m_i ;

- ширины суперканала B_{sc} ;
- распределения мощности P_i .

Для сокращения вычислительной сложности генерация проводится не по всем возможным комбинациям, а по ограниченному набору реалистичных конфигураций, определяемых архитектурой транспондера и допустимыми режимами AWGR.

Этап 3. Проверка допустимости

Для каждой конфигурации $\mathbf{x} \in \Omega_{cand}$ вычисляются основные показатели качества:

- BER_i ,
- $OSNR_i$,
- Q_i ,
- EVM_i .

После этого выполняется проверка выполнения ограничений допустимости. В результате формируется множество допустимых режимов

$$\Omega_{adm} = \{\mathbf{x} \in \Omega_{cand} \mid \mathbf{x} \text{ удовлетворяет ограничениям}\}. \quad (2.41)$$

Если множество Ω_{adm} оказывается пустым, система должна перейти к более помехоустойчивой стратегии: уменьшить число поднесущих, сузить спектр суперканала или использовать формат модуляции более низкого порядка.

Этап 4. Выбор рационального режима

На заключительном этапе для каждой допустимой конфигурации вычисляется значение функции полезности $J(\mathbf{x})$, после чего выбирается рациональный режим передачи.

Выбранная конфигурация передаётся в модуль управления транспондером и используется для перестройки параметров суперканала.

Поскольку задача выбора режима имеет непрерывный характер, включает ограничения по QoT, спектру и аппаратным параметрам, а число возможных конфигураций быстро растёт с увеличением числа поднесущих и форматов модуляции, полный перебор решений затруднителен для оперативной реконфигурации. Поэтому в работе выбран алгоритм последовательного улучшения с локальным поиском, позволяющий получать квазиоптимальные решения за ограниченное время [23]. В этом случае процедура выбора состоит из следующих шагов:

1. формирование начальной конфигурации, удовлетворяющей минимальным требованиям по QoT;
2. последовательное увеличение спектральной эффективности за счёт:
 - увеличения числа поднесущих,
 - перехода к более высокому формату модуляции,
 - расширения суперканала в пределах доступного спектрального блока;
3. после каждого изменения — проверка допустимости режима;

4. локальная корректировка мощности и форматов модуляции в окрестности найденного решения;

5. выбор конфигурации с максимальным значением $J(\mathbf{x})$.

Такой подход позволяет избежать полного перебора всех комбинаций параметров и получить квазиоптимальное решение за полиномиальное время.

Рассматриваемая задача имеет дискретно-непрерывный характер и относится в общей постановке к классу **NP-трудных комбинаторных задач**, поскольку включает:

- выбор числа активных поднесущих;
- выбор форматов модуляции;
- распределение мощности по поднесущим;
- ограничение по полосе суперканала;
- QoT-ограничения;
- аппаратные ограничения по полосе пропускания и энергетике.

При увеличении числа поднесущих число возможных конфигураций быстро растёт, что делает полный перебор решений практически неприменимым при оперативной реконфигурации. Следовательно, для практической реализации в адаптивном транспондере требуются приближённые или эвристические алгоритмы с полиномиальной вычислительной сложностью.

В качестве практического метода решения предлагается использовать эвристический алгоритм последовательного выбора с локальным поиском (Greedy Local Search, GLS), включающий:

1. формирование начальной допустимой конфигурации суперканала;
2. последовательный выбор форматов модуляции и числа поднесущих, увеличивающих значение целевой функции;
3. локальную корректировку мощности;
4. проверку выполнения QoT-ограничений и ограничений по полосе;
5. выбор квазиоптимального режима для текущего состояния линии.

В общей постановке задача совместного выбора числа поднесущих, форматов модуляции и распределения мощности при наличии дискретных и непрерывных переменных, нелинейных QoT-ограничений и спектральных условий является комбинаторной оптимизационной задачей с высокой вычислительной сложностью. Структурно она близка к задачам RMSA, для которых доказана NP-полнота [22, 23]. Такой подход является пригодным для реализации в контуре адаптивного управления транспондером и обеспечивает возможность оперативной реконфигурации режима передачи.

Оценка вычислительной сложности алгоритма может быть записана как

$$O(N \cdot |\mathcal{M}| \cdot I), \quad (2.42)$$

где N — число поднесущих, $|\mathcal{M}|$ — число допустимых форматов модуляции, I — число итераций локального поиска.

Таким образом, разработан метод выбора рационального режима передачи адаптивного транспондера, основанный на последовательном формировании множества потенциально реализуемых конфигураций, проверке их допустимости и оценке запаса по качеству передачи, а также выборе режима с максимальной спектральной эффективностью. Предложенный метод обеспечивает компромисс между данными параметрами и может быть использован как основа для адаптивной реконфигурации адаптивного транспондера в архитектуре T-SDN.

2.6. Выводы по второй главе

В данной главе разработана математическая модель выбора режима передачи адаптивного оптического транспондера. В рамках разработанной модели выбор режима передачи адаптивного транспондера осуществляется на основе параметров суперканала, включающая число активных поднесущих, межподнесущный интервал, символьную скорость, формат модуляции, мощность поднесущих и суммарную ширину суперканала. Допустимость выбора режима определяется совокупностью ограничений по скорости передачи, спектральным ресурсам, качеству передачи и аппаратным возможностям устройства.

Введено множество допустимых режимов передачи транспондера и сформулированы критерии выбора оптимального режима. Показано, что определение допустимых и оптимальных режимов должно базироваться на зависимостях показателей качества передачи от параметров транспондера и характеристик оптического тракта.

Полученная математическая модель является основой для дальнейшего анализа архитектуры адаптивного оптического транспондера, исследования влияния параметров устройства на QoT и разработки методики реконфигурации режимов его работы.

Глава 3. Архитектура адаптивного оптического транспондера и аппаратные механизмы формирования суперканалов

3.1. Требования к архитектуре адаптивного оптического транспондера для гибких оптических сетей

Для гибких оптических сетей архитектура транспондера должна удовлетворять совокупности функциональных, спектральных, аппаратных и эксплуатационных требований [19, 62].

Во-первых, архитектура должна обеспечивать переменную пропускную способность от 50 до 200 Гбит/с на поднесущую, до 800 Гбит/с суммарно на суперканал и переменную ширину спектрального канала от 50 до 250 ГГц. Это означает, что транспондер должен поддерживать формирование суперканалов различной ёмкости без необходимости использования фиксированного набора спектральных слотов и жёстко заданной ширины канала. На уровне аппаратной реализации данное требование предполагает возможность изменения числа активных поднесущих, символьной скорости, формата модуляции и общей полосы суперканала. Для гибких оптических сетей это является принципиальным условием эффективного использования спектра, поскольку позволяет согласовывать занимаемую полосу с фактической потребностью в пропускной способности.

Во-вторых, архитектура должна поддерживать формирование суперканалов. В отличие от фиксированной сетки частот, где канал обычно рассматривается как одиночная спектральная единица, в гибкой оптической сети высокоскоростной поток всё чаще представляется как совокупность ортогональных поднесущих, совместно образующих суперканал. Следовательно, транспондер должен обеспечивать генерацию, модуляцию, объединение, передачу и приём множества поднесущих, сохраняющих требуемую спектральную структуру. Для архитектуры это означает поддержку суперканалов, в которых изменение числа активных поднесущих выступает одним из ключевых механизмов масштабирования пропускной способности.

В-третьих, архитектура должна поддерживать изменение формата модуляции в зависимости от требований трафика и качества оптического тракта. В гибкой оптической сети не существует универсального режима передачи, одинаково эффективного для всех каналов. Короткие маршруты позволяют использовать более эффективные форматы модуляции и обеспечивать высокую спектральную эффективность, тогда как для более протяжённых и менее качественных оптических трактов требуются более устойчивые режимы передачи. Поэтому транспондер должен обеспечивать выбор и перестройку формата модуляции с учётом QoT, а также согласование этого выбора с параметрами суперканала и доступным спектральным блоком.

В-четвёртых, архитектура должна обеспечивать управление спектральной структурой суперканала. Это требование включает возможность регулирования межподнесущего шага, ширины спектрального блока и величины защитных интервалов. В отличие от фиксированных режимов передачи, здесь спектральная структура канала должна рассматриваться как управляемый объект. Сокращение защитных интервалов и уплотнение поднесущих позволяют повысить спектральную эффективность, однако в реальной аппаратной архитектуре это приводит к росту межподнесущей интерференции, усилению влияния частотно-селективных неровностей и повышению чувствительности краевых поднесущих. Следовательно, архитектура транспондера должна быть способна не только формировать плотную спектральную структуру, но и обеспечивать контроль допустимой области её перестройки.

В-пятых, архитектура должна удовлетворять требованиям QoT конфигурирования. Это означает, что перестройка режима передачи должна осуществляться не только на основе сетевого запроса на битрейт, но и на основе информации о длине маршрута, качестве оптического тракта, уровне шума, допустимом запасе по BER и OSNR. Иными словами, транспондер должен быть способен работать не в изолированном локальном режиме, а как элемент более общего контура управления, в котором параметры сигнала согласуются с состоянием оптической линии.

В-шестых, архитектура должна поддерживать аппаратную реконфигурацию режима передачи. Для гибких оптических сетей недостаточно только один раз выбрать конфигурацию суперканала при установлении соединения. В сети параметры передачи могут потребовать изменения в процессе эксплуатации — при изменении нагрузки, перераспределении спектральных ресурсов, деградации качества каналов, переходе на резервный маршрут или восстановлении после отказа. Следовательно, транспондер должен обеспечивать возможность изменения числа поднесущих, формата модуляции, мощности передачи и спектральной организации сигнала без полного аппаратного перепроектирования соединения.

В-седьмых, архитектура должна учитывать реальные аппаратные ограничения оптических элементов транспондера. Во многих сетевых моделях транспондер представляется как идеализированное устройство с дискретным набором допустимых профилей, однако в реальной системе область допустимых режимов определяется полосой модуляторов, характеристиками ЦАП/АЦП, параметрами DSP, частотной стабильностью источников излучения, ограниченной полосой частотно-селективных элементов. Для OFDM-суперканалов данные ограничения имеют особенно важное значение, поскольку непосредственно влияют на сохранение ортогональности поднесущих, уровень межподнесущей интерференции и состояние краевых спектральных компонентов [109, 110].

В-восьмых, архитектура должна обеспечивать возможность интеграции в централизованный контур программно-конфигурируемого управления. Для практического применения адаптивный транспондер должен быть способен:

- принимать команды на изменение режимов передачи;
- передавать телеметрию о текущем состоянии оптических трактов;
- предоставлять T-SDN контроллеру информацию о допустимых и рекомендуемых конфигурациях;
- участвовать в процедурах автоматизированной реконфигурации, масштабирования и восстановления соединений.

Следовательно, транспондер должен рассматриваться не только как физический модуль передачи, но и как программно-управляемый ресурс оптической сети.

В рамках диссертационной работы в качестве приоритетной рассматривается архитектура транспондера, способная формировать OFDM-суперканалы переменной структуры, использовать частотно-селективные фотонные компоненты для их объединения и разделения, а также поддерживать последующую интеграцию в контур T-SDN-управления.

3.2. Обобщённая структурная схема адаптивного оптического транспондера

С учётом сформулированных требований архитектура транспондера должна обеспечивать полный цикл формирования, передачи, приёма и реконфигурации суперканалов. Обобщённая структурная схема адаптивного оптического транспондера включает следующие основные системы: передающую часть; приёмную часть; подсистему цифровой обработки сигналов; подсистему управления и реконфигурации; интерфейс взаимодействия с T-SDN контроллером. Такое построение позволяет рассматривать транспондер одновременно как физическое устройство передачи и как управляемый объект в составе гибкой оптической сети.

Одним из ключевых элементов архитектуры транспондера является метод формирования суперканала, обеспечивающий высокую спектральную эффективность, гибкость изменения полосы передачи и возможность реконфигурации структуры канала. Для решения этой задачи в настоящей работе используется OFDM-подход, в рамках которого суперканал формируется как совокупность спектрально плотно упакованных ортогональных поднесущих, совместно обеспечивающих передачу заданного информационного потока.

Применение OFDM в архитектуре транспондера обусловлено рядом причин. Во-первых, OFDM-структура позволяет рассматривать число активных поднесущих как перестраиваемый параметр, что делает возможным ступенчатое изменение пропускной способности суперканала. Во-вторых, использование ортогональных поднесущих позволяет существенно уменьшить внутренние спектральные интервалы между ними по сравнению с традиционным набором независимых каналов. В-третьих, цифровая природа OFDM облегчает интеграцию метода в

архитектуру с программной реконфигурацией, где параметры суперканала должны изменяться по команде системы управления [73].

В рамках рассматриваемой архитектуры процесс формирования OFDM-суперканала начинается с представления входного цифрового потока в виде набора символов, распределяемых по поднесущим. Пусть суммарный поток данных должен быть передан с использованием N поднесущих. Тогда каждой поднесущей сопоставляется собственная последовательность комплексных символов, формируемых в соответствии с выбранным форматом модуляции. В общем случае передаваемый OFDM-сигнал в комплексной форме может быть записан как [93]

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \exp(j2\pi f_k t), 0 \leq t < T_s, \quad (3.1)$$

где:

- a_k — комплексный символ, передаваемый по k -й поднесущей;
- f_k — частота k -й поднесущей;
- T_s — длительность OFDM-символа.

Смысл данного представления заключается в том, что суперканал формируется как сумма гармонических компонентов, каждая из которых несёт собственную часть информационного потока, но при этом все компоненты совместно образуют единый спектральный блок.

Критически важным условием OFDM-передачи является ортогональность поднесущих. Она достигается, если разность частот между соседними поднесущими удовлетворяет условию

$$\Delta f = \frac{1}{T_s}, \quad (3.2)$$

При выполнении данного условия справедливо соотношение

$$\int_0^{T_s} \exp(j2\pi(f_k - f_m)t) dt = 0, \quad k \neq m, \quad (3.3)$$

то есть при демодуляции каждая поднесущая оказывается ортогональной всем остальным на интервале OFDM-символа. Именно это позволяет плотно располагать поднесущие в спектре и при этом сохранять возможность их независимого восстановления на приёмной стороне [79].

Для адаптивного транспондера указанное свойство имеет принципиальное значение. В отличие от фиксированной сетки частот, где спектральная упаковка задаётся внешней сеткой и обычно требует выделения сравнительно больших интервалов между соседними спектральными слотами, OFDM-суперканал формируется как внутренне согласованная многонесущая структура.

Суперканал в гибкой оптической сети удобно представлять как совокупность поднесущих с шагом Δf , суммарная полоса которых определяется числом активных поднесущих N и

защитных интервалов между ними. В контексте управления адаптивными оптическими транспондерами основными параметрами являются:

- изменение числа активных поднесущих N ;
- выбор формата модуляции M ;
- управление мощностью и спектральным наклоном;
- выбор спектрального блока в гибкой сетке частот.

При этом для аппаратной реализации транспондера важны два класса ограничений:

1. Ограничения частотно-селективных узлов (AWGR/фильтры/ROADM). Ширина полосы пропускания, форма АЧХ, внутрисполосная неравномерность, межканальные перекрёстные помехи, потери, температурная чувствительность. Эти параметры прямо влияют на OSNR и BER и определяют допустимые режимы передачи [19].

2. Ограничения модуляторов и трактов формирования суперканала.

Полоса модуляции, линейность, требования к синхронизации по времени между поднесущими, а также требования к стабильности частот и фаз поднесущих [77].

Следовательно, архитектура адаптивного транспондера должна одновременно обеспечивать:

- воспроизводимое формирование набора поднесущих с контролируемым шагом Δf ,
- аппаратное мультиплексирование/демультиплексирование множества поднесущих с минимальными потерями и межканальными перекрёстными помехами,
- возможность независимой модуляции поднесущих или групп поднесущих,
- поддержку программируемой реконфигурации N и M при соблюдении заданных QoT.

Формирование оптических поднесущих волн для суперканала, как правило, выполняется от одного оптического генератора в линейной либо нелинейной среде. Для получения управляемого количества поднесущих с высокой стабильностью частот и мощности на практике широко используются схемы на базе амплитудных и фазовых модуляторов Маха—Цендера (MZM). В типовом варианте применяются перестраиваемые одномодовые лазеры, интерферометры Маха—Цендера, электрические синусоидальные генераторы, управляемые фазовращатели, а также усилители/аттенюаторы для выравнивания амплитуд поднесущих каналов [94, 118-120].

После получения набора оптических частот возникает задача их разделения на отдельные поднесущие для последующей модуляции информационными сигналами. В классическом случае это может быть реализовано пространственным оптическим фильтром (демультиплексором) с требуемым частотным шагом. В предлагаемой аппаратной архитектуре роль такого демультиплексора эффективно выполняет маршрутизатор на основе дифракционной

волноводной решётки (AWGR), обеспечивающий многоканальное разложение по длинам волн и последующую маршрутизацию/коммутацию поднесущих каналов [71, 121].

Таким образом, AWGR выполняет ключевую функцию аппаратного коммутационного ядра для множества поднесущих, обеспечивая таким образом мультиплексирование/демультиплексирование, а при соответствующей конфигурации — маршрутизацию оптических каналов между портами, что особенно важно для реализации реконфигурации и построения схем гибких оптических сетей [122].

Для обеспечения адаптивности и интеграции в архитектуру T-SDN параметры транспондера целесообразно разделить на четыре группы: параметры формирования поднесущих, параметры модуляции/кодирования информационных сигналов, параметры спектрального управления и параметры управления мощностью поднесущих.

1) Параметры формирования суперканала

- N — число активных поднесущих
- Δf — шаг поднесущих
- B — суммарная полоса суперканала

2) Параметры модуляции и кодирования сигналов

- M — формат модуляции (QPSK/8QAM/16QAM/32QAM/64QAM)
- R_i — символьная скорость на поднесущей

3) Параметры спектрального блока в гибкой сетке частот

- $[f_1, f_2]$ — спектральный блок в гибкой сетке частот
- S — число спектральных слотов, соответствующих ширине блока

4) Энергетические параметры и QoT

- P_i — мощность на поднесущую, а также спектральный наклон
- QoT-метрики: OSNR, BER, Q-factor

Важно подчеркнуть, что ортогональность поднесущих в физической реализации достигается при согласовании частотного шага Δf со скоростью передачи символов R_s и при минимизации межканальных перекрёстных помех. Существенную роль в поддержании ортогональности играет выравнивание задержек в параллельных ветвях модуляторов, позволяя избежать временного рассогласования, которое приводит к росту интерференции между поднесущими и ухудшению QoT [95, 107].

В Таблице 3.1 показано, как значения ключевых управляемых параметров адаптивного оптического транспондера непосредственно ограничены свойствами оптических компонентов. В совокупности перечисленные параметры определяют область допустимых режимов для заданного оптического тракта и конфигурации транспондера. Следовательно, аппаратная архитектура адаптивного оптического транспондера является не только средством

формирования суперканала, но и источником ограничений, которые должны быть явно учтены в алгоритмах интеллектуального управления и в процедурах верификации QoT.

Таблица 3.1 Управляемые параметры адаптивного оптического транспондера

Управляемый параметр	Компонент транспондера	Аппаратные ограничения	QoT-метрика
Центральная длина волны λ_0	Перестраиваемый лазер / оптическая частотная гребёнка	Диапазон перестройки лазера, дрейф частоты, температурная нестабильность, требования к совмещению с частотной сеткой	Изменение частоты Δf_0 , штраф по OSNR
Шаг поднесущих Δf	Электрический СВЧ-генератор, модулятор Маха–Цендера	Фазовый шум и стабильность генератора, точность генерации частоты, согласование с символьной скоростью R_s	EVM, ICI, BER, Q-factor
Число поднесущих N	DSP контроллер	Полоса модуляторов и фотоприёмников, полоса AWGR, спектральный блок, рост PAPR и нелинейных искажений при увеличении количества N	OSNR, BER/Q по худшей поднесущей
Символьная скорость R_s поднесущей	DSP контроллер	Электрическая полоса драйвера, оптическая полоса модуляторов, требования к синхронизации, требования к Δf и форме импульса	EVM, BER/Q, штраф за дисперсию
Формат модуляции M	DSP контроллер	Требуемый OSNR для выбранного M , нелинейность тракта, фазовый шум лазера, ограничения по DSP-ресурсам	OSNR, BER до/после FEC, Q-factor, EVM
Мощность на поднесущую P_i , суммарная мощность P	VOA, EDFA	Динамический диапазон усилителей/аттенюаторов, насыщение EDFA, нелинейные эффекты в волокне, ограничения по безопасной мощности	OSNR; нелинейный штраф (NLI) по ухудшению Q и BER
Спектральный наклон	Эквалайзер спектра, настройки MZM, VOA по линиям	Неравномерность спектра оптической частотной гребёнки, ограниченная точность выравнивания, зависимость от температуры и дрейфа частоты	Разброс OSNR по поднесущим, BER и Q худшей поднесущей
Положение спектрального блока $[f_1, f_2]$ в гибкой сетке частот	T-SDN-контроллер, AWGR	Плотность сетки, требования спектральной непрерывности/целостности, каскадирование фильтров ROADM	Штраф по Q из-за фильтрации, OSNR по тракту
Номер порта AWGR	AWGR	Вносимые потери, межканальные перекрёстные помехи между портами, температурный дрейф центральной длины волны, полоса отдельного AWGR-канала	OSNR, штраф по Q из-за межканальных перекрёстных помех, мониторинг

			мощности по портам
--	--	--	--------------------

В рассматриваемой архитектуре адаптивного оптического транспондера суперканал формируется как набор частотно-ортогональных оптических поднесущих, получаемых от оптической частотной гребёнки с фиксированным шагом 25 ГГц. Каждая поднесущая несёт отдельный компонент суперканала, а их оптическое объединение выполняется частотно-селективным элементом AWGR, обеспечивающим мультиплексирование/демультиплексирование поднесущих и формирование единого спектрального блока (OFDM-суперканала) на выходе транспондера.

Клиентские сигналы поступают на адаптивный транспондер через интерфейсы (SFP) и агрегируются в коммутационном модуле (SoC), где выполняются фреймирование, мультиплексирование и кодирование. Далее полезная нагрузка распределяется по компонентам суперканала (поднесущим) в виде набора параллельных потоков. В базовой реализации предполагается, что поднесущие формируют однородный суперканал: на всех активных поднесущих используется единый формат модуляции и единый профиль символьной скорости. Такой подход существенно упрощает управление и верификацию QoT.

Оптическая частотная гребёнка формирует набор оптических линий с шагом 25 ГГц. Для заданной конфигурации суперканала выбирается непрерывная группа из N_{sc} соседних линий гребёнки. Каждая выбранная линия подаётся на свой модулятор, где оптическая несущая модулируется электрическим сигналом, сформированным DSP согласно выбранному режиму передачи. После модуляторов активные поднесущие объединяются в оптической области с помощью AWGR, в результате чего на выходе формируется единый суперканал, занимающий заданный спектральный блок. Неиспользуемые линии гребёнки подавляются аппаратно посредством VOA, что предотвращает попадание лишних спектральных компонентов в канал и позволяет формировать суперканал заданной ширины.

Из набора линий гребёнки выбирается нужное число соседних линий, соответствующее требуемой ширине суперканала. Перестройка выполняется включением/отключением линий гребёнки (VOA) и, при необходимости, изменением распределения нагрузки по активным поднесущим в SoC/DSP.

Регулировка мощности выполняется комбинацией: нормировки/масштабирования сигнала в DSP, изменения уровней драйвера модулятора и оптического уровня через VOA. Практически это задаётся как целевой уровень выходной мощности для активных поднесущих.

Ширина суперканала задаётся числом активных поднесущих N_{sc} . Спектральный блок является сетевым параметром: он определяется алгоритмом спектрального назначения и конфигурируется на частотно-селективных элементах сети (ROADM/WSS). Транспондер

обеспечивает соответствие сигнала выделенному блоку за счёт выбора числа поднесущих и их частотного положения.

Таблица 3.2 Аппаратные механизмы изменения параметров режима передачи транспондера

Параметр режима передачи	Элемент транспондер	Аппаратный механизм	Влияние на QoT
Формат модуляции	DSP, SoC	Переключение DSP-профиля (mapper/demapper, FEC, фильтрация, синхронизация)	Высокий риск при недостаточном запасе QoT, возможна временная деградация при перестройке
Число активных поднесущих	DSP, VOA	Включение/выключение линий гребёнки через VOA и MZM	Меняет ширину суперканала, переключения могут требовать верификации QoT, крайние линии чувствительнее к фильтрации и ICI
Мощность передачи	OFC, VOA, EDFA	Управление уровнем драйвера	Изменяет QoT, при резких изменениях возможен всплеск BER/EVM
Скорость передачи	DSP, ЦАП/АЦП	Переключение профиля скорости: частота дискретизации DAC/ADC, набор коэффициентов DSP	Ограничено полосой электрического тракта и полосой пропускания модуляторов
Полоса суперканала	DSP, VOA, T-SDN контроллер	Включение/выключение линий гребёнки через VOA и MZM	Неправильное согласование с фильтрами ведёт к росту ICI
Число слотов в гибкой сетке частот	T-SDN контроллер	RSA/RMSA назначение спектрального блока, настройка ROADM/WSS на пропуск нужной полосы	Ошибка в назначении окна приводит к блокировке запроса
Положение блока в спектре	DSP, VOA, T-SDN контроллер	В сети выбор слотов, в транспондере выбор индекса группы линий гребёнки	Слот должен совпадать с доступными линиями

3.3. Передающая часть адаптивного оптического транспондера

Передающая часть транспондера (рис. 3.1) предназначена для преобразования клиентского информационного потока в суперканал заданной структуры [78, 79, 122]. Её работа начинается с обработки поступающих цифровых данных, которые в дальнейшем распределяются по поднесущим, кодируются, модулируются и преобразуются в оптический суперканал.

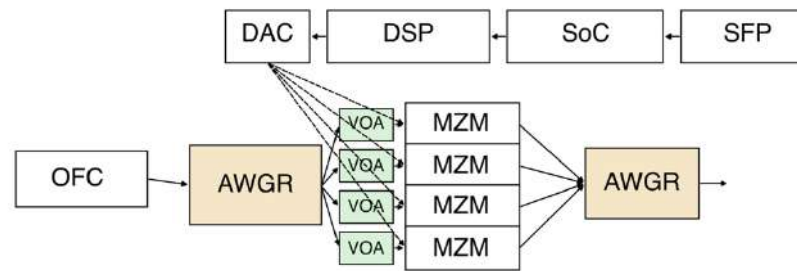


Рисунок 3.1 Структурная схема передающей части адаптивного транспондера

Передающая часть транспондера предназначена для преобразования входного клиентского трафика в оптический суперканал с заданными параметрами модуляции, спектральной ширины и числа поднесущих. Работа передающей части осуществляется последовательно.

Описание передающей части транспондера:

1. **SFP** (Small Form-factor Pluggable) – оптический трансиверный модуль, выполняющий роль клиентского интерфейса. Обеспечивает физический прием агрегированных потоков данных от внешних маршрутизаторов или коммутаторов (например, IP/Ethernet трафик) для их последующей передачи во внутреннюю цифровую архитектуру транспондера.

2. **SoC** (System-on-a-Chip) – интегрированный вычислительный комплекс, объединяющий программируемую логику, процессорные ядра и аппаратные ускорители. В передающей части SoC реализует функции первичной цифровой обработки, включая кадрирование (фрейминг), маппинг клиентских сигналов в транспортные контейнеры (например, OTN), применение алгоритмов упреждающей коррекции ошибок (FEC), а также высокоуровневое взаимодействие с T-SDN контроллером и маршрутизация потоков между поднесущими перед их подачей на DSP.

3. **DSP** (Digital Signal Processor) – процессор цифровой обработки сигналов, выполняющий ключевые операции по формированию поднесущих суперканала. На передающей стороне DSP осуществляет маппинг битовых последовательностей в символы выбранного формата модуляции, предсказание сигнала для компенсации неидеальностей оптического тракта и распределение информационных потоков по модуляторам.

4. **DAC** (Digital-to-Analog Converter) – высокоскоростной цифро-аналоговый преобразователь, осуществляющий перевод сформированных в DSP цифровых отсчетов I/Q-компонент в непрерывные аналоговые электрические радиочастотные сигналы. Полоса пропускания и частота дискретизации DAC напрямую определяют максимально достижимую символьную скорость на каждой оптической поднесущей.

5. **OFC** (Optical Frequency Comb) – выступает в роли многоволнового оптического источника. Формирует набор когерентных оптических линий с заданным шагом Δf , что

позволяет использовать один лазерный источник для генерации всех поднесущих суперканала [123, 124].

6. **VOA** (Variable Optical Attenuator) – блок поканальной эквализации. Применяется для предварительного выравнивания оптической мощности отдельных спектральных линий гребенки перед их модуляцией, минимизируя начальный разброс OSNR по поднесущим.

7. **AWGR** (Arrayed Waveguide Grating Router) – в передающей части работает в двух режимах. Первый AWGR (демультиплексор) разделяет сгенерированную оптическую гребенку на отдельные поднесущие для их независимой модуляции. Второй AWGR (мультиплексор) объединяет промодулированные поднесущие в единый суперканал.

8. **MZM** (Mach-Zehnder Modulator) – электрооптический квадратурный модулятор (IQ-MZM). Осуществляет наложение электрических I/Q-компонент на соответствующую оптическую поднесущую, перенося цифровое сигнальное созвездие в оптическую область.

На первом этапе клиентский трафик поступает через интерфейсы SFP в цифровую часть устройства SoC. Интерфейсы SFP обеспечивают приём внешних пользовательских потоков и их передачу во внутреннюю архитектуру транспондера для последующей обработки.

На втором этапе в блоке SoC выполняется первичная цифровая обработка входных данных. На этом уровне осуществляется агрегация входных потоков, формирование внутренней структуры кадров, добавление служебной информации, управление режимами помехоустойчивого кодирования FEC, а также взаимодействие с системой управления и T-SDN контроллером. Таким образом, блок SoC подготавливает данные к дальнейшему преобразованию в высокоскоростной сигнал.

На третьем этапе данные поступают в блок DSP, где выполняется основная цифровая обработка сигнала. В DSP реализуются выбор и настройка формата модуляции, цифровое формирование сигнала для оптической модуляции, цифровое предискажение и подготовка электрических I/Q-компонент. На этом же этапе задаются основные параметры будущего суперканала, включая количество поднесущих и режим передачи.

Далее сформированные цифровые сигналы поступают в блок DAC, где выполняется цифро-аналоговое преобразование. В результате на выходе DAC формируются аналоговые электрические сигналы, соответствующие I/Q-компонентам, необходимым для управления оптическими модуляторами MZM.

На следующем этапе аналоговые электрические сигналы подаются на модуляционные ветви, содержащие IQ-MZM. В этих узлах выполняется модуляция оптических несущих, то есть наложение подготовленного электрического сигнала на оптическое излучение. При необходимости в каждой ветви используются блоки VOA, обеспечивающие регулировку уровня оптической мощности и согласование параметров отдельных спектральных компонентов.

Оптические несущие для модуляции формируются оптической частотной гребёнкой (OFC). Далее с помощью AWGR выполняется спектральное распределение отдельных линий гребёнки по соответствующим модуляционным ветвям. Это обеспечивает подачу на каждый модулятор собственной оптической несущей с требуемой частотной позицией.

После модуляции отдельные оптические каналы поступают на AWGR, где выполняется их спектральное объединение в единый суперканал. В результате формируется оптический суперканал, представляющий собой совокупность спектрально согласованных модулированных поднесущих. Сформированный суперканал далее передаётся в волоконно-оптическую линию связи.

Таким образом, передающая часть адаптивного транспондера реализует полный цикл преобразования клиентского трафика в реконфигурируемый оптический суперканал: от цифровой агрегации и цифровой обработки до модуляции оптических несущих и их объединения в общий спектральный блок.

3.4. Приёмная часть адаптивного оптического транспондера

Приёмная часть транспондера (рис. 3.2) предназначена для выделения принятого суперканала, разделения его на составляющие спектральные компоненты, восстановления информационного сигнала и оценки качества передачи [78, 79, 122].

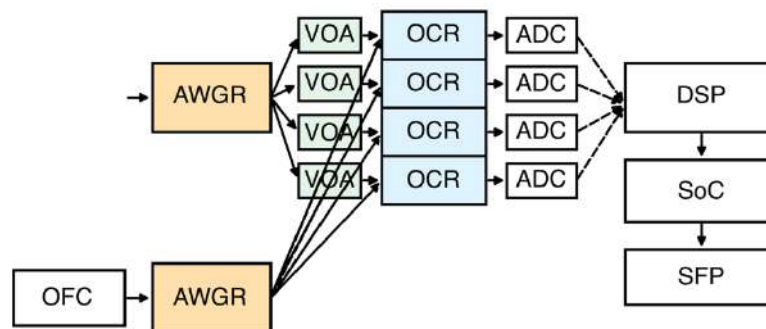


Рисунок 3.2 Структурная схема приемной части адаптивного транспондера

Приёмник выполняет не только функцию восстановления данных, но и функцию измерительного узла, поставляющего информацию для дальнейшей реконфигурации режима передачи.

Описание приёмной части адаптивного оптического транспондера

1. **OFC (Optical Frequency Comb)** – выступает в роли многоволнового локального гетеродина. Формирует набор когерентных опорных оптических несущих с высокостабильным частотным шагом Δf , строго согласованным с сеткой частот принимаемого суперканала. Это обеспечивает параллельное когерентное детектирование всех поднесущих без необходимости использования множества независимых перестраиваемых лазеров.

2. **AWGR (Arrayed Waveguide Grating Router)** – выполняет функцию оптического демультиплексора. В приемном тракте используется два таких элемента: первый осуществляет спектральное разделение широкополосного оптического суперканала на отдельные информационные поднесущие, а второй разделяет опорную оптическую частотную гребенку (локальный гетеродин) на соответствующие спектральные линии для подачи на блоки когерентного приема.

3. **VOA (Variable Optical Attenuator)** – блок поканальной эквализации оптической мощности. Применяется для компенсации спектрального наклона суперканала, возникшего в волоконно-оптическом тракте, и выравнивания разброса вносимых потерь по портам AWGR. Точная регулировка мощности позволяет оптимизировать оптическое отношение сигнал/шум (OSNR) перед когерентным детектированием и предотвратить перегрузку АЦП.

4. **OCR (Optical Coherent Receiver)** – устройство оптоэлектронного преобразования, реализующее оптическое смешение выделенной информационной поднесущей с соответствующей спектральной линией опорной гребенки. OCR извлекает амплитудную и фазовую информацию, формируя на выходе аналоговых электрических сигнала (синфазные и квадратурные I/Q-компоненты).

5. **ADC (Analog-to-Digital Converter)** – высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь, осуществляющий дискретизацию электрических I/Q-компонент, поступающих от OCR. Частота дискретизации АЦП должна быть достаточной для корректного восстановления сигнального созвездия и цифровой компенсации искажений.

6. **DSP (Digital Signal Processor)** – выполняет компенсацию хроматической дисперсии, компенсацию фазового шума и эквализацию. Важнейшей функцией DSP на стороне приема является непрерывный расчет метрик качества (EVM, BER, Q-factor, OSNR) для каждой поднесущей. Эта телеметрия передается в систему управления для инициации процессов реконфигурации.

7. **SoC (System-on-a-Chip)** – многоядерный вычислительный блок, выполняющий высокоуровневые транспортные операции на стороне приема: декодирование FEC, извлечение полезной нагрузки из транспортных фреймов и восстановление исходной структуры клиентских потоков после их обработки в DSP. Кроме того, процессорная подсистема SoC обеспечивает сбор телеметрии от аппаратных узлов и передачу агрегированных данных о качестве передачи (QoT) в централизованную систему управления сетью.

8. **SFP (Small Form-factor Pluggable)** – выходные клиентские интерфейсы, обеспечивающие передачу восстановленного информационного трафика в стандартных протоколах конечным потребителям или смежному сетевому оборудованию.

Приёмная часть транспондера предназначена для выделения входного оптического суперканала, разделения его на отдельные спектральные компоненты, преобразования оптического сигнала в электрическую форму, цифровой обработки и восстановления исходного клиентского трафика.

На первом этапе входной оптический суперканал поступает в оптическую часть приёмника, где с помощью AWGR выполняется его спектральное разделение на отдельные поднесущие. Такой подход позволяет выделить составляющие суперканала для их независимой обработки в соответствующих когерентных приемниках.

Одновременно с этим в приёмную часть подаётся оптическая частотная гребёнка, которая с помощью второго AWGR распределяется по каналам и используется как набор локальных опорных оптических несущих. Наличие согласованных опорных линий необходимо для реализации когерентного приёма и последующего восстановления фазовой и амплитудной информации сигнала.

После спектрального разделения сигнальные компоненты суперканала и соответствующие опорные оптические несущие поступают в линейку блоков когерентного оптического приёма (OCR). В этих узлах выполняется оптическое смешение принятого сигнала с локальной опорной несущей, в результате чего происходит преобразование оптического сигнала в электрическую форму. На этом этапе восстанавливаются электрические I/Q-компоненты, несущие информацию об амплитуде и фазе принятого сигнала. При необходимости перед когерентным приёмником используются блоки VOA, обеспечивающие выравнивание уровня мощности по отдельным каналам и согласование динамического диапазона приёмной части.

Далее полученные аналоговые электрические сигналы поступают в блоки ADC, где выполняется их аналого-цифровое преобразование. В результате формируются цифровые отсчёты I/Q-компонент, пригодные для последующей цифровой обработки.

На следующем этапе оцифрованные сигналы передаются в блок DSP, где выполняется основная обработка принятого суперканала. В DSP реализуются синхронизация сигнала; компенсация фазовых, амплитудных и частотных искажений; компенсация искажений канала и межсимвольных/межподнесущих влияний; оценка показателей качества передачи, включая BER, Q-factor, OSNR и другие QoT-метрики; демодуляция сигнала; восстановление переданных символьных и битовых последовательностей.

Таким образом, DSP не только обеспечивает восстановление полезной информации, но и формирует данные телеметрии о состоянии суперканала, которая может использоваться системой управления для последующей адаптации режима передачи.

После цифровой обработки данные передаются в блок SoC, где выполняются завершающие операции над информационным потоком. На этом уровне осуществляется декодирование FEC, восстановление структуры клиентских потоков, их агрегация или разделение в соответствии с внутренним форматом устройства, а также подготовка данных к выдаче во внешние интерфейсы.

На заключительном этапе восстановленный клиентский трафик передаётся через интерфейсы SFP внешним потребителям или в смежные телекоммуникационные устройства.

Таким образом, приёмная часть адаптивного транспондера реализует полный цикл обработки входного суперканала от спектрального разделения и когерентного оптического приёма до цифрового восстановления данных и выдачи клиентского трафика. При этом архитектура приёмной части обеспечивает не только демодуляцию сигнала, но и получение информации о качестве передачи, необходимой для контроля состояния суперканала и последующей реконфигурации режима передачи транспондера.

3.5. Метод формирования оптической частотной гребенки

Устройства и схемы генерации сетки оптических частот принято обозначать как оптические частотные гребёнки (OFC). Оптические поднесущие частоты, как правило, формируются от высокостабильного когерентного источника с узкой спектральной линией. Для генерации множества когерентных линий применяются различные схемы с использованием фазовых модуляторов, нелинейных оптических сред, микрорезонаторов кольцевого типа, комбинаций лазеров и т.д. [104, 123, 124].

В большинстве схем генерации от одного оптического генератора в некоторой линейной или нелинейной оптической среде формируются оптические поднесущие частоты [114, 125]. В варианте, ориентированном на физическую реализацию с маршрутизацией поднесущих, после формирования оптических поднесущих выполняется их разделение (например, с использованием сплиттера или демультиплексора), а затем параллельная модуляция информационными сигналами и последующее объединение промодулированных поднесущих частот оптическим маршрутизатором на основе дифракционной волноводной решётки (AWGR) [119, 126]. Сформированные таким образом суперканалы далее могут объединяться в линейный групповой сигнал и передаваться в тракт. Поднесущие могут быть полностью ортогональными при согласовании частотного шага с символьной скоростью каждого канала и при выполнении требований к полосе пропускания модуляторов в части выравнивания задержек в параллельных ветвях [67, 76]. Минимизация перекрёстных помех достигается настройкой частотного интервала поднесущих таким образом, чтобы он соответствовал скорости передачи символов, а также калибровкой временных задержек между интервалами модуляции.

Вместе с тем для практического формирования управляемого числа поднесущих (от 2 до 20–30) в диапазонах S/C/L при высокой стабильности частот, мощности и спектров наибольшее распространение получили схемы на базе амплитудных и фазовых модуляторов Маха—Цендера (MZM), поскольку они обеспечивают детерминированный частотный шаг, задаваемый СВЧ-генератором; высокую повторяемость параметров линий при аппаратной реализации; возможность управления числом и амплитудным распределением линий путём изменения электрических параметров возбуждения и режимов смещения MZM; технологическую совместимость с интегральными платформами (включая InP и кремниевую фотонику) [126].

Под ортогональностью поднесущих в контексте формирования суперканала понимается выполнение условий, при которых межканальные перекрёстные помехи (ICI) минимальны, а выделение и демодуляция поднесущих обеспечивают заданный уровень BER. На практике для реализации этого требуется:

- Единый опорный источник и когерентность линий. Поднесущие должны быть взаимно когерентны или, по меньшей мере, обладать высокой относительной стабильностью частот, что достигается генерацией от одного лазера.
- Согласование частотного шага Δf с символьной скоростью R_s . Ключевым фактором является согласование Δf и R_s , при котором спектральное перекрытие поднесущих не приводит к потере ортогональности после демодуляции сигналов.
- Равномерность амплитуд и допустимый наклон спектра. Для суперканалов нежелательны большие перепады по мощности между поднесущими, поскольку они повышают требования к динамическому диапазону приёмника и приводят к ухудшению OSNR.
- Временное выравнивание параллельных ветвей. При параллельной модуляции поднесущих необходимо выравнивание задержек, иначе временное рассогласование вызывает рост межканальной интерференции и ухудшение качества сигнального созвездия.

Таким образом, метод генерации ортогональных поднесущих должен обеспечивать управляемость по Δf , числу поднесущих N , амплитудному распределению и энергетическим параметрам, а также быть совместимым по частотному спектру с другими оптическими компонентами транспондера.

В качестве возможной реализации оптическая частотная гребёнка рассмотрим линейную схему формирования набора оптических поднесущих на основе модуляторов Маха—Цендера. В общем случае на вход подаётся когерентное оптическое поле от лазера:

$$E_{in}(t) = E_0 e^{j\omega_0 t}, \quad (3.4)$$

где ω_0 — угловая частота оптической несущей.

При воздействии гармонического СВЧ-сигнала частоты Ω на модулятор формируются боковые полосы на частотах $\omega_0 \pm k\Omega$, создавая гребёнку линий с шагом:

$$\Delta f = \frac{\Omega}{2\pi}, \quad (3.5)$$

Для фазовой модуляции с индексом модуляции β выходное поле можно представить в виде:

$$E_{out}(t) = E_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\beta \sin(\Omega t)} = E_0 e^{j\omega_0 t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta) e^{jk\Omega t}, \quad (3.6)$$

где $J_k(\beta)$ — функции Бесселя первого рода.

Из данного представления следует, что амплитуды линий определяются $J_k(\beta)$, а существенное число значимых линий растёт при увеличении β .

Для практической оценки числа формируемых поднесущих удобно использовать приближённую зависимость вида:

$$N \approx 2K + 1, \quad K \sim \beta, \quad (3.7)$$

то есть число линий порядка $2\beta + 1$ для спектра, симметричного относительно опорной частоты, где β определяется параметрами модулятора. Для схем на базе MZM, в зависимости от конкретной конфигурации и режима смещения, индекс модуляции связан с полуволновым напряжением V_π и размахом управляющего напряжения V_{p-p} . Для оценки часто используют соотношение порядка:

$$\beta \propto \frac{V_{p-p}}{V_\pi}, \quad (3.8)$$

что отражает ключевой физический смысл: увеличение размаха управляющего напряжения при фиксированном V_π увеличивает индекс модуляции, расширяя количество линий гребёнки.

Для формирования гребёнки с более равномерным распределением линий и для управления спектральной линией применяются композиции модуляторов, например, каскад MZM в сочетании с фазовым модулятором, и режимы с независимой настройкой смещения плеч интерферометра и фазовых задержек. Управляемыми параметрами схемы являются:

- частота СВЧ-генератора Ω , которая задаёт Δf ;
- амплитуды управляющих напряжений, которые задают β и число линий;
- рабочие точки смещения MZM, влияют на подавление несущей, симметрию боковых полос и равномерность спектра;
- фазовые задержки, влияют на интерференцию.

Таким образом, предлагаемая методика генерации ортогональных оптических несущих для формирования суперканалов основана на управляемом формировании частотной гребёнки от

одного лазерного источника в линейной оптоэлектронной среде, с дальнейшим выделением требуемого спектрального диапазона для использования совместно с AWGR.

Количество формируемых оптических несущих (линий частотной гребёнки), а также их амплитудное распределение определяются глубиной модуляции и рабочими точками модуляторов. Для оценки удобно использовать представление выходного оптического поля при фазовой модуляции гармоническим сигналом частоты Ω :

$$E_{out}(t) = E_0 e^{j\omega_0 t} \exp(j\beta \sin(\Omega t)) = E_0 e^{j\omega_0 t} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(\beta) e^{jk\Omega t}, \quad (3.9)$$

где ω_0 — угловая частота лазера, $J_k(\beta)$ — функции Бесселя первого рода, β — индекс фазовой модуляции. Из выражения следует, что амплитуда k -й линии пропорциональна $J_k(\beta)$, а значимыми становятся линии с порядком $|k|$ примерно до величины β . В приближении число линий, имеющих заметную мощность выше заданного порога относительно максимума, можно оценить как

$$N \approx 2K + 1, K \sim \beta, \quad (3.10)$$

то есть N возрастает практически линейно с ростом β .

Индекс модуляции β определяется отношением размаха управляющего напряжения к полуволновому напряжению. Для фазового модулятора или эквивалентного по фазовому отклику плеча MZM в первом приближении используется оценка:

$$\beta \approx \pi \cdot \frac{V_{p-p}}{V_\pi}, \quad (3.11)$$

где V_{p-p} — размах СВЧ-напряжения на электроде, V_π — полуволновое напряжение. Тогда оценка числа «полезных» несущих может быть записана в виде

$$N \approx 2 \left\lceil c \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_{p-p}}{V_\pi} \right\rceil + 1, \quad (3.12)$$

где c — коэффициент, учитывающий критерий отсечки по уровню линий (например, $-10 \dots -20$ дБ относительно пика) и конкретную конфигурацию каскада модуляторов (один MZM, MZM+PM, двухкаскадная схема и т.д.). На практике параметр сопределяется калибровкой по измеренному спектру на оптическом анализаторе.

Следует отметить, что помимо роста числа линий при увеличении V_{p-p}/V_π существенную роль играет выбор рабочей точки смещения MZM и фазовые задержки в плечах. Смещение определяет степень подавления опорной несущей и симметрию боковых полос, а фазовые настройки — форму амплитудного распределения гребёнки. Таким образом, управляемость генератора поднесущих реализуется через тройку параметров: Ω задаёт шаг Δf , V_{p-p}/V_π задаёт β и число линий и фазовые задержки задают распределение мощности и подавление несущей.

После получения оптической гребёнки, следующим этапом является разделение линий на отдельные поднесущие каналы. В традиционных оптических схемах это достигается с помощью пространственного демультиплексора с требуемым шагом Δf . В аппаратной архитектуре, ориентированной на масштабирование числа поднесущих и на интеграцию с элементами оптической маршрутизации, функцию демультиплексирования целесообразно выполнять с использованием AWGR, который:

- обеспечивает многоканальное разложение по длинам волн с высокой селективностью;
- позволяет реализовать компактное оптическое объединение и разъединение поднесущих;
- естественным образом согласуется с концепцией многопортовой коммутации оптических сигналов.

Каждая выделенная поднесущая поступает на свой модулятор данных. Параллельная модуляция обеспечивает формирование набора промодулированных поднесущих, которые затем объединяются на AWGR в общий спектр суперканала. Важнейшими условиями минимизации перекрёстных помех являются:

- соответствие шага Δf символьной скорости R_s ;
- эквивалентность задержек в параллельных ветвях;
- достаточная полоса MZM и согласование их АЧХ с AWGR.

Таким образом, суперканал формируется как аппаратно-управляемая совокупность поднесущих, при этом число активных линий N может изменяться динамически, что обеспечивает адаптацию полосы пропускания к условиям в линии передачи.

Формирование оптических поднесущих осуществляется под воздействием управляемых электрических параметров: напряжений в каналах возбуждения модулятора и фазовых задержек (в частности, во втором канале). Данные параметры определяют индекс модуляции и амплитудное распределение линий частотной гребёнки, что, в свою очередь, влияет на число формируемых поднесущих и энергетические характеристики каждой несущей.

Практическая реализация генератора гребёнки на базе MZM включает узлы, которые ограничивают спектр и влияют на распределение мощности по линиям. В рассматриваемой схеме оптический источник может генерировать излучение в диапазоне порядка 1500 – 1600 нм, а последующая фильтрация (в том числе фильтрующее действие интерферометрической структуры MZM и вспомогательных оптических фильтров) задаёт ширину спектрального окна, в пределах которого используются линии гребёнки [105].

В инженерных экспериментах и моделировании спектральный «срез» может задаваться, например, эквивалентной шириной окна 1 нм, 3 нм, 6 нм и 8 нм. Изменение ширины окна приводит к характерному компромиссу:

- при меньшем «срезе» (например, 1 нм) наблюдается более «чистое» созвездие (для QPSK) за счёт ограниченного числа линий и меньших требований к выравниванию/динамическому диапазону, однако доступная оптическая мощность на линию ниже;
- при расширении окна (например, 3 нм и 6 нм) увеличивается число используемых линий и суммарная мощность, доступная на поднесущую/суперканал, но возрастают требования к равномерности и к стабилизации амплитуд, а также проявляется рост шума/искажений, что ухудшает качество созвездия;
- при ещё более широком окне (например, 8 нм) может быть достигнута большая мощность на выходе, но повышаются риски деградации качества в результате неравномерности спектра, влияния нелинейных эффектов и ограничений полосы последующих элементов (AWGR, фильтры, модуляторы).

Таким образом, ширина спектрального окна является одним из ключевых параметров настройки метода генерации: она определяет одновременно: число доступных линий, мощность на линию и требования к последующей эквализации спектра [106]. С практической точки зрения для повышения уровня мощности на выходе передатчика при экспериментальной оценке целесообразно применение оптического усилителя EDFA, что, однако, требует учёта роста ASE-шума и влияния на OSNR.

Поскольку расширение спектрального окна и увеличение числа линий требуют усиления сигнала, мониторинг QoT становится необходимым элементом данного метода. На уровне аппаратной методики задаются пороги качества для поддерживаемых модуляций (QPSK–64QAM), а режимы N и M выбираются с учётом запаса по мощности [83, 84, 107].

В результате разработанный метод генерации ортогональных оптических несущих представляет собой совокупность аппаратных и параметрических решений: генерация частотной гребёнки на базе MZM от одного лазера, ограничение/выбор спектрального окна, эквализация амплитуд линий, демультиплексирование и маршрутизация линий на AWGR с последующей параллельной модуляцией. Управляемыми параметрами выступают Δf , β (через V_{p-p} и V_π), рабочие точки смещения и фазовые задержки, ширина спектрального окна («срез»), а также параметры усиления (EDFA) и спектрального выравнивания [126].

В данном разделе разработан метод формирования набора взаимно согласованных оптических поднесущих для формирования суперканалов на базе генерации оптической частотной гребёнки от одного когерентного источника в линейной среде. Показано, что число

линий и их амплитудное распределение управляются параметрами возбуждения и режимами смещения модулятора, а частотный шаг задаётся стабильностью СВЧ-генератора. Установлено, что выбор ширины спектрального окна («среза») определяет компромисс между мощностью на линию и качеством (чистотой созвездий), что обосновывает необходимость усиления (EDFA) при экспериментальной оценке и необходимость контроля QoT. Полученные положения являются аппаратной основой для последующих разделов, посвящённых формированию суперканалов на базе AWGR и интеграции разработанного транспондера в контур управления T-SDN.

3.6. Формирование суперканалов с использованием маршрутизатора на основе дифракционной волноводной решётки

В системах полностью оптического мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов маршрутизатор на основе массива волноводных решеток (Arrayed Waveguide Grating Router, AWGR) играет ключевую роль. Он выполняет функции оптического быстрого преобразования Фурье на приемнике и обратного преобразования Фурье на передатчике, позволяя упростить DSP и снизить требования к его производительности [78, 79].

AWGR может использоваться как ключевой аппаратный элемент для формирования суперканалов, поскольку он обеспечивает пространственно-спектральное преобразование, эквивалентное дисперсионному разложению по длинам волн. В контексте формирования суперканалов AWGR выполняет две взаимосвязанные функции:

1. **Мультиплексирование.** Объединение оптических поднесущих/каналов от множества модуляторов в единый спектральный блок суперканала;
2. **Демультиплексирование.** Разделение спектрального блока суперканала по выходным портам на демодуляторы с заданным шагом частотной сетки.

Поскольку прямое и обратное преобразования Фурье топологически эквивалентны, один и тот же AWGR, будучи двунаправленным, может применяться как в передающей части в качестве мультиплексора ортогональных поднесущих, так и в приёмной части в качестве демультиплексора.

Классический AWGR является пассивным планарным устройством, которое состоит из следующих элементов: входные волноводы, которые служат для подачи оптического сигнала в устройство; входной ответвитель, где свет из входного волновода дифрагирует и расширяется: массив волноводных решеток, который состоит из набора изогнутых волноводов, каждый из которых длиннее предыдущего на строго заданную величину ΔL , выходной звездный ответвитель является второй областью свободного распространения, где свет собирается и интерферирует; выходные волноводы фокусируют и выводят разделенные по длинам волн сигналы [127].

Свет, попадая во входную область, рассеивается и равномерно распределяется по всем волноводам массива. Поскольку волноводы имеют разную длину, оптический сигнал в каждом из них приобретает зависящую от длины волны фазовую задержку. Когда свет покидает массив и попадает в выходную область, множество световых пучков интерферируют друг с другом. За счет разницы фаз конструктивная интерференция для каждой конкретной длины волны (или частоты) происходит в своей уникальной фокусной точке, где располагаются выходные волноводы. Кроме того, AWGR обладает свойством циклической маршрутизации, что позволяет перенаправлять сетки частот WDM по кругу в конфигурациях $N \times N$ [71].

AWGR состоит из массива волноводов с постоянной разностью хода ΔL , двух областей свободного распространения сигнала и входных/выходных волноводов (рис. 3.3).

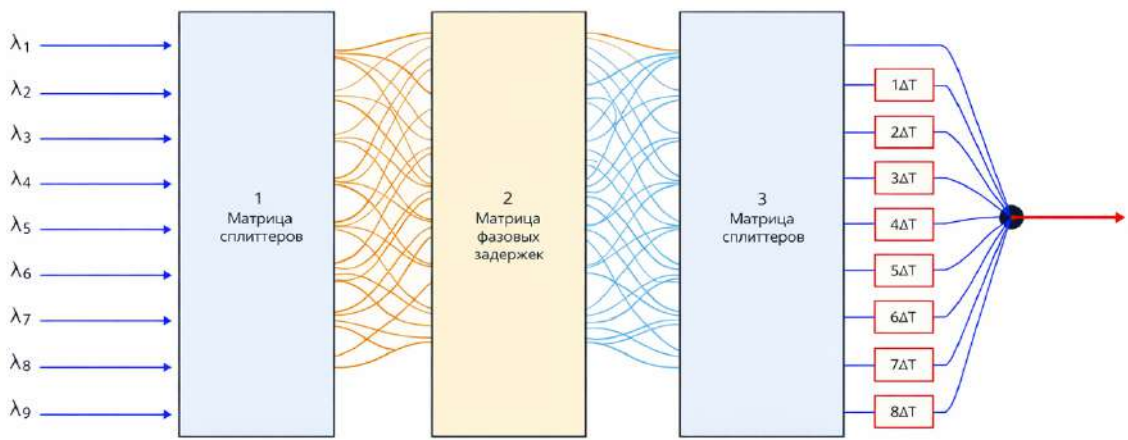


Рисунок 3.3 Структурная схема AWGR

Фазовые соотношения, описывающие работу AWGR, учитывают интерференцию в областях свободного распространения, фазовые набег в массиве волноводов и выражаются соотношением вида:

$$n_s d_1 \sin \theta_1 + n_c \Delta L + n_s d_2 \sin \theta_2 = m \lambda, \quad (3.13)$$

а центральная длина волны, соответствующая порядку дифракции m , определяется как

$$\lambda_0 = \frac{n_c \Delta L}{m}, \quad (3.14)$$

где n_s — эффективный показатель преломления в областях свободного распространения сигнала (пластинах), n_c — эффективный показатель преломления в волноводах массива, d_1 и d_2 — расстояния между двумя входными/выходными волноводами, $\theta_{1,2}$ — углы, под которыми сигнал подается на решетки во входной и выходной областях, ΔL — постоянная разность хода между соседними волноводами массива, λ — длина волны, m — целое число, порядок интерференции.

Соотношения выше показывают, что выбор ΔL задаёт спектральную дисперсию решётки и фиксирует распределение спектральных компонент по выходным портам. Любое отклонение λ от λ_0 приводит к изменению фазы и смещению максимума интерференции, что проявляется как

конечная полоса пропускания канала AWG и рост межканальных утечек при приближении спектральных компонент к скатам АЧХ.

Разность хода ΔL выбирается так, чтобы для заданных длин волн выполнялось условие конструктивной интерференции в требуемом выходном порту. Благодаря этому AWG обеспечивает селективное распределение спектральных компонентов по портам и может выступать базовым аппаратным элементом оптического мультиплексирования/демультиплексирования ортогональных поднесущих. При выполнении условия, что разность хода кратна длине волны с учётом эффективного показателя преломления, достигается точное фазовое выравнивание вкладов всех волноводов массива для данной λ , и энергия концентрируется в одном выходном канале. Это и является физической основой мультиплексирования/демультиплексирования частотно-ортогональных оптических сигналов на базе AWG.

Для дальнейшего сопоставления с дискретным преобразованием Фурье удобно представить AWG в виде матричного преобразования, где второй функциональный уровень реализует набор фазовых задержек, зависящих от номера входа m и номера выхода n . Фазовый множитель коэффициента передачи можно записать как

$$H_{m,n} \propto \exp(j\theta_{m,n}), \quad (3.15)$$

где фаза $\theta_{m,n}$ задаётся геометрией решётки. В распространённой приближённой записи, через параметры выходной апертуры и фокусировки, фазовый набег может быть выражен как

$$\theta_{m,n} = 2\pi m n \frac{n_s d d_0}{\lambda R}, \quad (3.16)$$

где n_s — эффективный показатель преломления в области свободного распространения (пластине), d — расстояние между волноводами массива (период решётки), d_0 — расстояние между волноводами на выходе, R — фокусное расстояние, λ — центральная длина волны, m и n — целочисленные индексы (номер входного и выходного канала).

Формула (3.16) отражает ключевой факт, что фаза коэффициента передачи пропорциональна произведению индексов m и n , что является характерным признаком Фурье-подобных преобразований.

При интерпретации AWG как устройства, реализующего дискретное преобразование по выборкам, важным является соответствие разности длин волн временным задержкам. Разность хода ΔL между двумя оптическими путями связана с временным интервалом ΔT соотношением

$$\Delta T \approx \frac{n_g \Delta L}{c}, \quad (3.17)$$

где c — скорость света, n_g — групповой показатель преломления волновода. Соотношение (3.17) задаёт масштаб временных задержек, которые определяют корректность выделения поднесущих в пределах одного OFDM-символа.

При реализации демультимплексора OFDM-сигнала выход k -й поднесущей может быть представлен как дискретное преобразование Фурье по набору N выборок входного сигнала:

$$V_{sc,k} = \sum_{m=0}^{N-1} V_{in}(m) \exp(-j \frac{2\pi km}{N}), \quad (3.18)$$

где $V_{in}(m)$ — комплексные значения входного сигнала в моменты выборки m , N — число поднесущих, k — индекс выделяемой поднесущей. В данной трактовке матрица фазовых задержек реализует экспоненциальный множитель в (3.18), а выходная матрица суммирования формирует результирующие выходы поднесущих по каждому порту.

Следует подчеркнуть, что на входе и выходе AWGR используются непрерывные сигналы, тогда как выражение (3.18) определено для дискретных выборок. Поэтому выходные сигналы будут физически корректно соответствовать поднесущим только при условии, что набор выборок $V_{in}(m)$ относится к одному и тому же OFDM-символу. Это требует согласования параметров задержек (3.17), временного выравнивания параллельных трактов и/или применения процедур синхронизации и эквализации в блоке цифровой обработки сигнала.

Отличительной особенностью применения AWGR является то, что качество суперканала определяется не только параметрами модуляции и линейного тракта, но и оптическими характеристиками AWGR: полосой пропускания каналов, межканальными перекрёстными помехами, неравномерностью амплитудно-фазового отклика и температурным дрейфом. В идеальном случае AWGR может рассматриваться как устройство, реализующее Фурье-подобное преобразование: интерференция множества вкладов с заданными фазовыми сдвигами приводит к пространственному разделению спектральных компонентов. Это соответствует физической интерпретации разложения сигнала по частотным базисным функциям.

При реализации транспондера важно учитывать, что ортогональность поднесущих достигается не только самим фактом применения AWGR, а также выполнением комплекса условий:

- согласование шага поднесущих Δf и символьной скорости R_s ;
- временное выравнивание сигналов на параллельных ветвях модуляции;
- достаточная полоса модуляторов и приёмника;
- контроль амплитудно-фазовой неравномерности.

Иными словами, AWGR обеспечивает аппаратную базу для мультиплексирования и демультимплексирования, однако сохранение ортогональности задаётся совместной настройкой генератора поднесущих, модуляторов, параметров DSP и требований к фильтрации.

При практической реализации AWGR ключевыми являются следующие ограничения:

Полоса пропускания канала AWGR и форма АЧХ. Каждый выходной порт AWGR имеет конечную полосу пропускания, которая определяет допустимую ширину спектра поднесущей (или группы поднесущих). Невыполнение условия полосы приводит к частичному срезу спектра, росту межсимвольной и межподнесущей интерференции и ухудшению качества сигнальных созвездий. Для высоких порядков модуляции влияние частотно-селективных искажений проявляется особенно существенно.

Межканальные перекрёстные помехи и утечки спектра. Несовершенная селективность AWGR приводит к утечкам энергии соседних спектральных компонентов. Для плотной сетки при малых Δf и при неравномерности спектра оптической частотной гребёнки этот фактор может стать ограничивающим для QoT. Эффект усиливается при каскадировании нескольких оптических устройств [79, 95].

Вносимые потери и неравномерность потерь по портам. AWGR вносит оптические потери, которые снижают мощность на входе приёмника и увеличивают требования к усилению. Неравномерность потерь по портам приводит к разбросу OSNR по поднесущим и ухудшению QoT [71].

Фазовая/групповая задержка и дисперсионные искажения. AWGR может вносить фазовые искажения и неравномерность групповой задержки, что особенно критично для широкополосных многонесущих сигналов. Это приводит к частотно-селективной фазовой ошибке и требует компенсации на уровне DSP либо аппаратной оптимизации конструкции [121].

Температурная чувствительность и дрейф центральных длин волн. Изменение температуры приводит к сдвигу спектральной характеристики AWGR (центральных частот каналов), что вызывает рассогласование с частотной сеткой суперканала и ухудшение селективности. Для устойчивой работы требуется либо термостабилизация, либо периодическая калибровка.

Согласование частотной сетки AWGR и требуемого Δf . С практической точки зрения важен вопрос согласования шага AWGR и шага поднесущих OFDM. Если шаг AWGR существенно больше шага поднесущих, то AWGR не выделяет каждую поднесущую отдельно, а работает с группами поднесущих в одном канале. В этом случае поднесущие разделяются на уровне DSP/электрической обработки, а AWGR выполняет роль агрегатора по спектральным блокам. Если же AWGR проектируется под малый шаг (например, 12,5–25 ГГц), то возможно аппаратное разложение на поднесущие, но возрастают требования к точности изготовления, к температурной стабилизации и уровню межканальных перекрёстных помех.

В диссертационной работе рассматривается реализация мультиплексирования и демупльтиплексирования суперканалов на основе AWGR с количеством портов $N_p = 10$ и

частотным шагом $\Delta f_{\text{AWGR}} = 25$ ГГц. Данная конфигурация обеспечивает аппаратное разложение/суммирование десяти спектральных поднесущих в пределах одного суперканала.

При использовании всех портов AWGR суммарная занимаемая полоса спектрального блока оценивается как

$$B_{\text{SC}} \approx N_p \cdot \Delta f_{\text{AWGR}} = 10 \cdot 25 = 250 \text{ ГГц}, \quad (3.19)$$

где B_{SC} — ширина суперканала (без учёта дополнительных защитных полос и запаса на фильтрацию). В терминах гибкой сетки частот это соответствует спектральному блоку порядка 20 слотов по 12,5 ГГц или 40 слотов по 6,25 ГГц, причём фактически необходимое число слотов определяется не только B_{SC} , но и требованиями к защитным полосам, фильтрации ROADMs/WSS и допусками на дрейф центральных частот.

Выбор конфигурации AWGR с 10 портами и шагом 25 ГГц обусловлен следующими факторами: шаг 25 ГГц является наименьшим стандартизованным шагом, при котором коммерчески доступные AWGR обеспечивают уровень межканальных перекрёстных помех ≤ -25 дБ [121]; 10 портов позволяют формировать суперканалы шириной до 250 ГГц, что покрывает диапазон скоростей от 100 до 800 Гбит/с при использовании форматов модуляции от QPSK до 64QAM; при уменьшении шага до 12,5 ГГц уровень перекрёстных помех возрастает до $-18 \dots -20$ дБ, что делает невозможным использование форматов модуляции выше 16QAM [11]. Таким образом, выбранная конфигурация представляет компромисс между спектральной плотностью и допустимым уровнем межканальной интерференции.

Шаг 25 ГГц задаёт частотный интервал между центрами соседних каналов/портов. При этом каждый канал AWGR имеет конечную полосу пропускания $\Delta f_{-3\text{dB}}$ и конечную крутизну скатов. Для реализации суперканалов критично, чтобы спектр каждой выделяемой компоненты не испытывал существенного среза на скатах АЧХ AWGR, иначе появляется частотно-селективное искажение, приводящее к росту EVM и BER. Практически это задаёт такое требование, что занимаемая полоса каждой поднесущей/группы поднесущих должна укладываться в эффективную полосу канала AWGR с запасом.

При уменьшении шага до 25 ГГц возрастает чувствительность к межканальным утечкам: энергия соседних каналов через конечную селективность AWGR создаёт интерференционную составляющую, которая особенно критична для высоких порядков модуляции и для портов по краям. Межканальные перекрёстные помехи становятся ограничителем QoT при высокой спектральной плотности и при неравномерности мощности линий оптической частотной гребёнки.

Необходимо отметить, что использование частотного шага 25 ГГц при полосе пропускания фильтра AWGR в 23 ГГц оставляет защитный межканальный интервал шириной около 2 ГГц. Данное значение является минимально допустимым для предотвращения

межканальной интерференции при использовании фильтрации. В разработанном алгоритме выбора рационального режима предусмотрено динамическое управление шириной защитного интервала между соседними суперканалами (не менее 12,5 ГГц) для обеспечения устойчивости к каскадным фильтрационным искажениям.

AWGR вносит потери IL и обладает неравномерностью NU . Неравномерность потерь напрямую превращается в разброс OSNR по компонентам и формирует худший канал, который ограничивает допустимый формат модуляции для всего суперканала при единой настройке M . Это требует либо спектральной эквализации, либо политики адаптации по худшему каналу.

В результате данная конфигурация AWGR обеспечивает аппаратную основу для формирования суперканала шириной порядка 250 ГГц, при этом основные аппаратные ограничения, влияющие на QoT, связаны с селективностью и полосой каналов AWGR, межканальными перекрёстными помехами при плотной сетке, разбросом потерь по портам и температурной стабильностью. Перечисленные факторы должны быть учтены при выборе режима адаптации и при интеграции AWGR в архитектуру адаптивного оптического транспондера.

При построении демультиплексора поднесущих для OFDM-сигнала важным является соблюдение условий корректности дискретного преобразования: выходные значения поднесущих должны соответствовать выборкам, относящимся к одному и тому же OFDM-символу. При практической реализации это означает необходимость согласования временных задержек, частоты дискретизации и механизмов синхронизации, поскольку входные и выходные сигналы являются непрерывными, а математическая модель DFT/IDFT предполагает дискретные отсчёты. Поэтому в аппаратно-программной реализации корректность демультиплексирования обеспечивается либо на уровне оптической/электрической дискретизации и синхронизации, либо на уровне DSP-оценки канала и восстановления символов, при этом AWGR задаёт спектральную селективность и пространственное разнесение каналов.

3.7. Выводы по третьей главе

Представленные данные и анализ результатов моделирования показывает, что AWGR является двунаправленным спектральным устройством, позволяющим реализовать аппаратное мультиплексирование/демультиплексирование ортогональных поднесущих суперканала за счёт интерференционного разделения спектральных компонент. Для практического применения в составе адаптивного оптического транспондера критичны аппаратные ограничения AWGR: полоса и форма АЧХ каналов, уровень межканальных перекрёстных помех, неравномерность распределения потерь, фазо-частотные и температурные эффекты. Указанные ограничения напрямую влияют на QoT и должны учитываться при выборе режима передачи и параметров спектрального блока.

Глава 4. Исследование влияния параметров транспондера на показатели качества передачи

4.1. Постановка задачи исследования

В главах 1, 2 и 3 диссертации было отмечено, что переход к гибким оптическим сетям и использованию адаптивных транспондеров требует рассмотрения режима передачи не как фиксированного профиля, а как результата согласованного выбора параметров суперканала, определяемых одновременно сетевыми требованиями и аппаратными возможностями устройства. При этом для практического применения предложенной математической модели необходимо установить количественные зависимости между параметрами формируемого суперканала и показателями качества передачи, а также определить, в каких диапазонах перестройки достигается выигрыш по спектральной эффективности и пропускной способности по сравнению с фиксированными режимами.

Будут установлены зависимости между параметрами формирования суперканала в адаптивном оптическом транспондере и показателями качества передачи, а также выполнена оценка преимуществ использования переменной конфигурации суперканала по сравнению с фиксированными режимами передачи по критериям спектральной эффективности, пропускной способности и допустимости по QoT.

При исследовании адаптивного оптического транспондера необходимо определить режимы его работы, при которых обеспечивается требуемое качество передачи информации для заданного оптического тракта. В отличие от устройств с фиксированными параметрами, адаптивный транспондер допускает изменение характеристик формируемого суперканала, что позволяет подстраивать режим передачи информации под условия оптического тракта (длина маршрута, OSNR, накопление шумов, доступный спектральный блок). Такая адаптация требует установления того, каким образом параметры устройства влияют на показатели качества передачи информации.

Во второй главе диссертации качество передачи информации было формализовано как функция параметров транспондера, а также введены понятия допустимого и оптимального режимов передачи. В этой главе диссертации будет проведено исследование влияния параметров адаптивного транспондера (число активных поднесущих, набор поддерживаемых форматов модуляции, диапазон мощности передачи, параметры модулятора, характеристики AWGR) на показатели качества передачи (BER, Q-factor, EVM) и установлено каким образом эти параметры влияют на значения QoT и определяются границы области допустимых режимов передачи.

Для этого решаются следующие задачи:

1. Исследовать влияние мощности передачи на показатели QoT,
2. Исследовать влияние длины тракта на допустимые режимы передачи,

3. Определить границы применения различных форматов модуляции,
4. Исследовать влияние числа поднесущих на показатели QoT,
5. Оценить различия между центральными и краевыми поднесущими.

Основная гипотеза исследования состоит в том, что показатели качества передачи информации зависят от параметров аппаратной структуры транспондера нелинейно, а допустимость режима определяется не отдельным параметром, а их согласованным сочетанием. Поэтому задачей исследований будет не только получение зависимостей QoT от каждого отдельного параметра, но и построение областей допустимых режимов в пространстве параметров транспондера.

4.2. Формальная постановка параметрического исследования

Для проведения моделирования (вычислений) необходимо формализовать набор параметров, определяющих режим передачи адаптивного транспондера при формировании суперканала.

Режим передачи адаптивного транспондера в рамках настоящего исследования задаётся вектором параметров

$$x = \{M, N, \Delta f, P_{tx}, B_{el}, B_{AWGR}\}, \quad (4.1)$$

где:

- M — формат модуляции;
- N — число активных поднесущих;
- Δf — шаг поднесущих;
- P_{tx} — мощность передачи;
- B_{el} — электрическая полоса;
- B_{AWGR} — эффективная полоса канала AWGR.

Качество передачи будем рассматривать как функцию от указанных выше параметров:

$$QoT = f(\mathbf{x}). \quad (4.2)$$

При наличии нескольких допустимых конфигураций оптимальный режим должен выбираться по критериям, введённым в главе 2, с учётом спектральной эффективности и запаса по качеству передачи.

Введённая постановка позволяет перейти от простого анализа отдельных графиков к построению области допустимых режимов в пространстве параметров. По сути, задача сводится в определении множества

$$\Omega_{adm} = \{\mathbf{x}: QoT(\mathbf{x}) \geq QoT_{thr}\}, \quad (4.3)$$

и выделении внутри него подмножества оптимальных режимов, обеспечивающих лучший компромисс между качеством передачи, спектральной эффективностью и устойчивостью к аппаратным ограничениям. Таким образом, аппаратные ограничения рассматриваются не

изолированно, а как факторы, формирующие геометрию области допустимых режимов транспондера.

Особое значение в рассматриваемой архитектуре имеет тот факт, что суперканал формируется на базе AWGR, а его допустимые режимы ограничиваются полосой каналов, внутренними потерями, неравномерностью по портам и уровнем межканальных перекрёстных помех. При этом влияние этих факторов усиливается при переходе к более высоким порядкам модуляции и при увеличении числа одновременно используемых поднесущих. Следовательно, выбор режима передачи транспондера должен проводиться не по номинальным параметрам одного канала, а по худшему сочетанию параметров в пределах формируемой конфигурации транспондера.

4.3. Методика исследования и параметры модели

Исследование влияния параметров адаптивного оптического транспондера на характеристики суперканала требует использования методики, позволяющей одновременно учитывать цифровое формирование сигнала, частотно-селективные свойства аппаратной реализации, воздействие на суперканал оптического тракта и вариативность режимов передачи. В связи с этим в работе применяется комбинированный подход, объединяющий имитационное моделирование адаптивного транспондера с анализом выходных метрик качества передачи.

Основой исследования является модель адаптивного оптического транспондера, включающая блоки формирования суперканала, модуляции, оптической передачи, частотно-селективной обработки и приёма. В передающей части формируется многонесущий поток, структура которого задаётся числом активных поднесущих, форматом модуляции, символьной скоростью и межподнесущим шагом. На уровне аппаратной реализации учитываются ограничения полосы электрического тракта, спектральные свойства модуляционного узла и частотно-селективного элемента AWGR. В приёмной части реализуются операции оптического приёма, цифровой обработки, демодуляции и расчёта показателей качества передачи.

Исследование строится по принципу серий вычислительных экспериментов, в каждой из которых изменяется одна или несколько групп параметров при фиксированных остальных условиях. Такой подход позволяет установить количественную зависимость качества передачи к конкретным факторам и выявить допустимые области конфигураций транспондера.

В моделируемой системе рассматривался адаптивный оптический транспондер, формирующий и принимающий суперканал при заданных параметрах электрической и оптической частей. Исследование проводилось в режиме параметрического моделирования, при котором для фиксированных условий оптического тракта последовательно изменялись отдельные параметры устройства, а на выходе вычислялись значения QoT. Такая постановка позволяет рассматривать транспондер не только как физическую реализацию передающего

устройства, но и как объект параметрической настройки, для которого могут быть выделены допустимые и оптимальные режимы передачи.

Общая логика исследования включает три этапа. На первом этапе выполняется верификация работы прежде всего спектрально-селективного элемента AWGR, включая анализ полосы канала, формы амплитудно-частотной характеристики, вносимых потерь и различий между портами. На втором этапе исследуется влияние параметров остальных частей транспондера на показатели качества передачи. На третьем этапе по совокупности полученных зависимостей строится область допустимых режимов и формулируются правила выбора режима передачи транспондера в контуре реконфигурации.

Параметрическое моделирование проводилось в программной среде OptiSystem, предназначенной для системного моделирования волоконно-оптических систем передачи и оптических устройств. Данный программный пакет позволяет выполнять имитационное исследование оптических систем от уровня отдельных компонентов до уровня законченного оптического тракта передачи, объединяя в рамках одной схемы источники излучения, модуляторы, спектрально-селективные устройства, усилители, волоконные участки, приёмные блоки цифровой обработки и средства анализа результатов. Среда предоставляет графический интерфейс построения схемы, библиотеку типовых компонентов и набор встроенных средств визуализации и постобработки результатов моделирования [129].

Результаты параметрического моделирования, полученные в среде OptiSystem, являются основой для формирования области допустимых режимов передачи. Однако использование единственной среды моделирования создаёт риск систематической погрешности, связанной с особенностями внутренних алгоритмов конкретного программного продукта. Для устранения этого риска выполнена независимая верификация результатов с использованием программной библиотеки OptiCommPy, который является открытым инструментом для моделирования когерентных оптических систем передачи на языке Python.

Библиотека OptiCommPy реализует полный цикл формирования, передачи и приёма оптических сигналов на программном уровне и включает генерацию QAM- и OFDM-сигналов произвольного формата модуляции, модели оптических усилителей EDFA, когерентный оптический приёмник и цифровую обработку сигнала, включая компенсацию хроматической дисперсии, восстановление тактовой синхронизации и фазы несущей, а также расчёт показателей качества передачи BER, EVM и Q-factor.

Для обеспечения сопоставимости результатов часть параметров модели фиксировалась на уровне, соответствующем разработанной архитектуре транспондера. В модели использовались: рабочий диапазон 1530-1565 нм, центральная частота 1552 нм, ширина линии лазера 100 кГц, шаг линий оптической гребёнки 25 ГГц, число используемых линий 10, тип модулятора IQ-MZM,

электрическая полоса модуляторов 25 ГГц, шаг каналов AWGR 25 ГГц, полоса канала AWGR по уровню -3 дБ порядка 23 ГГц, внутренние потери около 4 дБ, неравномерность потерь по портам порядка 1 дБ, перекрёстные помехи соседнего канала порядка -25 дБ. Для оценки допустимости режимов также использовались пороговые значения OSNR для различных форматов модуляции и запас по качеству передачи [130-131].

Фиксация части параметров необходима для того, чтобы исключить влияние посторонних факторов и сосредоточить анализ на целевых характеристиках самого транспондера. При этом выбранные значения соответствуют архитектурным особенностям и позволяют рассматривать результаты моделирования как репрезентативные для исследуемой конфигурации адаптивного транспондера [133].

Для воспроизведения спектрально-селективных свойств AWGR в модели OptiCommPy реализован набор из N гауссовых полосовых фильтров с параметрами, соответствующими характеристикам AWGR из таблицы 4.1: шаг каналов 25 ГГц, вносимые потери 4 дБ, неравномерность потерь по портам 1 дБ и перекрёстные помехи соседнего канала -25 дБ. Каждый фильтр моделировался функцией передачи вида:

$$H_k(f) = \sqrt{10^{-\frac{IL}{10}}} \cdot \exp\left(-\frac{(f-f_k)^2}{2\sigma_{AWGR}^2}\right), \quad (4.4)$$

где f_k — центральная частота k -го порта AWGR, IL — вносимые потери (дБ), σ_{AWGR} — параметр, определяемый из условия $\Delta f_{-3\text{дБ}} = 2\sqrt{2\ln 2} \sigma_{AWGR} \approx 23$ ГГц. Межканальные перекрёстные помехи моделировались добавлением к сигналу на k -м порте спектральных компонентов с соседних портов, ослабленных на величину XT_{adj} .

Параметры волоконно-оптического тракта в модели OptiCommPy были идентичны параметрам OptiSystem: волокно SMF G.652.D с коэффициентом затухания $\alpha = 0,2$ дБ/км, хроматической дисперсией $D = 17$ пс/(нм·км), длиной оптических трактов от 10 до 120 км, усилением EDFA 15 дБ и коэффициентом шума $NF = 5$ дБ.

Кросс-валидация выполнялась на контрольной выборке из 500 конфигураций, охватывающей все комбинации форматов модуляции (QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM), числа поднесущих от 2 до 10, мощностей передачи от -6 до $+2$ дБм и длин оптического тракта от 10 до 120 км. Данные конфигурации были специально отобраны из пространства параметров таким образом, чтобы покрыть как внутреннюю область допустимых режимов, так и предельную область, где показатели качества передачи приближаются к пороговым значениям.

Особенно важным является совместное рассмотрение двух параметров — электрической полосы B_e и полосы каналов AWGR B_{AWGR} . Электрическая полоса определяет спектральную ширину модулированного сигнала и точность формирования поднесущих, тогда как AWGR задаёт допустимое окно прохождения спектральных компонентов. При недостаточной

согласованности этих параметров часть спектра сигнала попадает на скаты АЧХ канала AWGR, что приводит к фильтрационному штрафу, росту EVM, ухудшению Q-factor и увеличению BER. Следовательно, одним из центральных объектов исследования в настоящей главе является именно совместное влияние B_e и B_{AWGR} на допустимость режима передачи.

Не менее значимыми являются формат модуляции и число активных поднесущих. Формат модуляции определяет спектральную эффективность и требуемый уровень QoT, а число поднесущих — ширину суперканала и его чувствительность к неравномерности АЧХ, межканальным помехам и разбросу потерь по портам AWGR. При увеличении порядка модуляции область допустимых параметров сужается, а влияние аппаратных ограничений становится более выраженным. По этой причине исследование должно показать не только общий характер изменения Q-factor и BER, но и тот факт, какой именно параметр становится лимитирующим для разных классов режимов [128].

Отдельное значение в методике исследования имеет статистическая обработка результатов. Поскольку BER, EVM и другие метрики чувствительны к случайным флуктуациям шума, фазовым ошибкам и особенностям отдельных реализаций, использование единичного прогона модели недостаточно для получения достоверных выводов. Поэтому каждая экспериментальная точка рассчитывается как результат серии независимых прогонов.

Для каждой комбинации параметров выполняется серия независимых расчётов, где количество выбирается исходя из требуемой статистической устойчивости результатов. На практике целесообразно использовать не менее 30 прогонов для каждой точки, а для наиболее чувствительных режимов — 50 и более прогонов.

Использование доверительных интервалов позволяет отделить устойчивые закономерности от случайных флуктуаций и обеспечивает корректность сравнения разных конфигураций суперканала. Это особенно важно при близких значениях BER или Q-factor, когда визуальное различие на графике может быть статистически незначимым.

Результаты этих исследования далее представлены в диссертации. Необходимо отметить, что для каждой серии вычислительных экспериментов (моделирований) приводится пояснение о числе прогонов, типе усреднения и используемом доверительном интервале. Такой формат представления данных необходим для корректной интерпретации полученных закономерностей и дальнейшего использования результатов в задачах оптимизации и реконфигурации адаптивных транспондеров.

Кроме того, методика оценки результатов дополняется принципиально важным положением: анализ проводится не только по средним значениям метрик, но и по наихудшему порту или наихудшей поднесущей в составе суперканала. Это связано с тем, что неравномерность потерь по портам AWGR и различия в форме АЧХ могут приводить к ситуации, когда среднее

качество передачи остаётся приемлемым, но один из каналов становится ограничивающим фактором. Следовательно, при определении допустимости использования выбранного режима передачи адаптивного транспондера критерием должно выступать выполнение пороговых условий по качеству для всего суперканала, а не только для усреднённых параметров. Такой подход особенно важен при использовании высоких порядков форматов модуляции и большого количества поднесущих.

Следует отдельно отметить выбранный в настоящей работе подход к подтверждению практической применимости результатов. Создание натурального экспериментального стенда, воспроизводящего всю архитектуру адаптивного оптического транспондера с OFDM-суперканалом на 10 поднесущих, требует набора когерентных оптических компонентов (модуляторов, оптического частотного генератора, AWGR, EDFA, когерентных приёмников с DSP), стоимость которого выходит далеко за рамки возможностей отдельного исследования. Вместе с тем современная практика разработки телекоммуникационных систем и рекомендации ITU-T допускают верификацию системных решений через имитационное моделирование при условии, что параметры модели калиброваны по паспортным данным промышленных компонентов и подтверждены независимой программной реализацией. Именно такая схема применена в настоящей работе: параметры модели соответствуют характеристикам серийно выпускаемых компонентов, результаты проверены независимой реализацией в среде OptiCommPy, а выводы по допустимым режимам сопоставлены с характеристиками промышленных транспондеров — T8 «Волга», Nokia PSE-Vs, Huawei OptiX. Такой комбинированный подход позволяет получить практически применимые результаты при ограничениях на натурное оборудование и соответствует современной концепции разработки устройств используя цифровые двойники.

Таблица 4.1 Численные параметры модели адаптивного оптического транспондера

Часть	Параметр	Обозначение	Значение	Влияние на характеристики
Оптический источник	Рабочий диапазон	—	C-band (1530 – 1565 нм)	Ограничение доступного спектра канала связи
	Центральная частота	f_0	193,1 ТГц	Привязка сетки частот, согласование с AWGR
	Ширина линии лазера	$\Delta\nu$	100 кГц	Ограничивает фазовый шум
Оптическая частотная гребенка	Шаг линий	Δf_c	25 ТГц	Согласование с шагом AWGR, спектральная плотность мощности

	Число используемых линий	N_c	10	Соответствует числу портов AWGR, задаёт B_{SC}
	Неравномерность спектра до эквалайзинга	ΔP_{pre}	5 дБ	Разброса OSNR по линиям, рост BER на крайних линиях
	Неравномерность спектра после эквалайзинга	ΔP_{post}	$\leq 0,9$ дБ	Влияет на худшую поднесущую/порт
Суперканал	Число активных поднесущих	N	2...10	Управление ёмкостью и шириной спектра
	Формат модуляции	M	QPSK/8/16/32/64QAM	Управление спектральной эффективностью, ограничение QoT
	Мощность поднесущей	P_k	-6...+2 дБм	Управление OSNR; влияет на BER/Q
	Максимальная полоса суперканала	B_{SC}	250 ГГц	Требования гибкой сетки частот к блоку и защитному интервалу
Модуляция	Тип модулятора	—	IQ-MZM	Реализация квадратурной модуляции
	Электрическая полоса модулятора	B_{MZM}	15 - 25 ГГц	Ограничивает R_s и форму спектра, влияет на EVM
	Полуволновое напряжение	V_π	3,5 В	Оценка глубины модуляции
	Размах управляющего сигнала СВЧ	V_{p-p}	4 В	Совместно с V_π определяет число линий
	Коэффициент экстинкции	ER	20 дБ	Паразитные компоненты
DSP	Частота дискретизации	f_s	64 Гвыб/с	Корректность восстановления созвездия и эквализации
AWGR	Шаг каналов	Δf_{AWGR}	25 ГГц	Формирование суперканала, частотная сетка
	Полоса канала по уровню -3 дБ	Δf_{-3dB}	23 ГГц	Срез спектра и фильтрация
	Внутренние потери	IL	4 дБ	Уменьшение OSNR
	Неравномерность потерь по портам	NU	1 дБ	Разброс OSNR по портам
	Перекрытые помехи соседнего канала	XT_{adj}	-25 дБ	Интерференция между каналами, рост BER

	Перекры́стные помехи несосе́дного канала	XT_{non}	–30 дБ	Фоновые утечки мощности
Усиление	Усиление EDFA	G	15 дБ	Компенсация потерь
	Коэффициент шума EDFA	NF	5 дБ	OSNR на приёмнике
QoT	Порог OSNR для QPSK	$OSNR_{th}$	12 дБ	Критерий допустимости использования выбранного формата модуляции
	Порог OSNR для 8QAM	$OSNR_{th}$	14 дБ	
	Порог OSNR для 16QAM	$OSNR_{th}$	16 дБ	
	Порог OSNR для 32QAM	$OSNR_{th}$	20 дБ	
	Порог OSNR для 64QAM	$OSNR_{th}$	24 дБ	
	Запас по QoT	Δ_m	1,5 дБ	Запас по OSNR, риск увеличения BER

4.4. Верификация модели транспондера

Перед проведением параметрического анализа необходимо подтвердить, что используемая модель корректно отражает основные свойства адаптивного оптического транспондера. В рассматриваемой архитектуре таким ключевым элементом является AWGR, выполняющий функции спектрального мультиплексирования и демультимплексирования ортогональных поднесущих суперканала. Поскольку именно характеристики AWGR формируют ограничения по полосе, потерям, неравномерности и межканальным помехам, достоверность последующего анализа QoT напрямую зависит от адекватности его модельного описания.

Поэтому верификация включает в себя анализ формирования оптической частотной гребёнки и распределения мощности поднесущих по портам AWGR, исследование спектральных характеристик AWGR, а также проверку корректности мультиплексирования и демультимплексирования при формировании суперканала в передающей части транспондера и проходящего через оптический тракт, включающий AWGR как частотно-селективный элемент. Для такой архитектуры принципиально важно, чтобы модель воспроизводила следующие свойства:

1. неравномерность характеристик поднесущих на спектре,
2. ухудшение параметров краевых поднесущих,
3. влияние межподнесущей интерференции.

Методика верификации включает два последовательных этапа:

1. Верификация спектральной селективности AWGR. Определение полосы канала по уровню -3 дБ, анализ формы АЧХ, оценка внутренних потерь и неравномерности распределения энергии сигнала по портам.

2. Верификация корректности мультиплексирования спектральных компонентов. Анализ спектра оптической частотной гребенки, распределения мощности по портам после демультиплексирования и спектра сформированного суперканала после мультиплексирования.

4.4.1. Формирование оптической гребёнки и распределение мощности поднесущих по портам AWGR

Для формирования суперканала в исследуемой архитектуре используется набор ортогональных оптических поднесущих, частотный шаг которых согласован с шагом каналов AWGR. Такая организация спектра обеспечивает возможность пространственно-спектрального разложения поднесущих по портам демультиплексора и последующего обратного мультиплексирования в суперканал.

На спектре оптической частотной гребёнки до входа AWGR должны наблюдаться выраженные спектральные линии, соответствующие отдельным оптическим поднесущим, при этом ключевыми признаками корректного формирования являются регулярный частотный шаг, наличие требуемого числа линий и приемлемая равномерность их амплитуд. Для рассматриваемой конфигурации число используемых линий достигает 10, что соответствует количеству задействуемых портов AWGR и позволяет формировать суперканал в рамках фиксированной частотной сетки. При этом до эквализации допустима неравномерность спектра, тогда как после эквализации разброс уровней должен быть снижен до величин, не приводящих к резкой деградации качества сигнала на крайних поднесущих. В модели такие параметры уже присутствуют в явном виде, включая неравномерность спектра до и после эквализации.

На рисунке 4.1 показан спектр оптической частотной гребёнки до AWGR в виде спектрограммы, соответствующей измерениям на оптическом анализаторе спектра. Наличие выраженных спектральных линий на фоне шумового пьедестала подтверждает корректное формирование гребёнки и позволяет оценить равномерность линий и уровень паразитных компонентов.

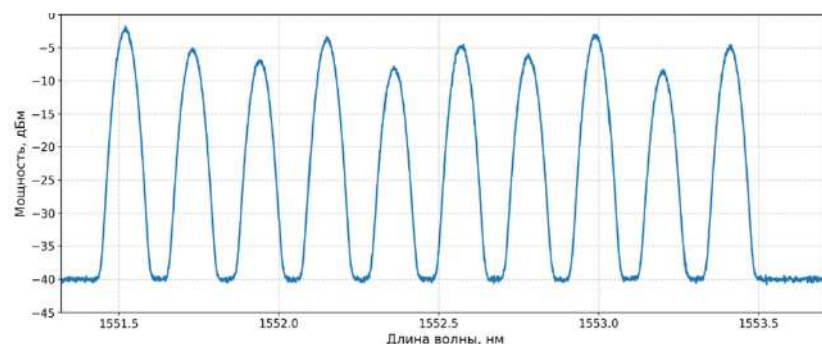


Рисунок 4.1 Спектр на выходе оптической частотной гребенки до эквализации

До выполнения процедуры эквализации в спектре оптической частотной гребёнки наблюдается неравномерность уровней отдельных спектральных линий. Разброс амплитуд между поднесущими обусловлен особенностями формирования частотной гребёнки и неидеальностью распределения мощности по спектральным компонентам. Такая неравномерность приводит к различному энергетическому запасу у отдельных поднесущих и, как следствие, может вызывать неоднородность значений OSNR, BER и Q-factor после прохождения спектрально-селективных элементов. Поэтому выполнение эквализации является необходимым этапом подготовки суперканала, обеспечивающим выравнивание мощности спектральных линий для всех поднесущих.

На рисунке 4.2 представлена оптическая частотная гребёнка суперканала с числом спектральных линий $N = 10$ и межканальным интервалом $\Delta f = 25$ ГГц. В спектре наблюдаются десять отчётливо выраженных максимумов, равномерно распределённых по длине волны, что подтверждает корректное формирование оптической частотной гребёнки. Уровень мощности спектральных линий составляет около $-5...-4$ дБм при фоновом уровне порядка -40 дБм, что соответствует динамическому диапазону около 35 дБ. Разброс амплитуд между отдельными линиями невелик, что свидетельствует о хорошей равномерности распределения мощности по поднесущим.

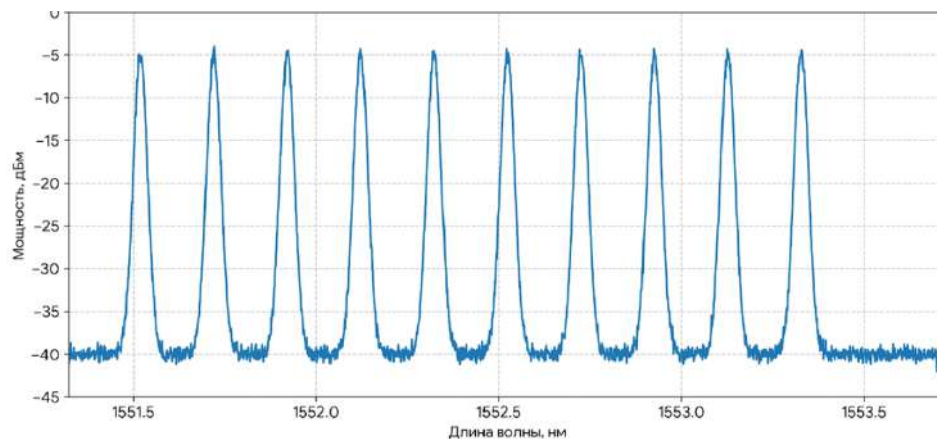


Рисунок 4.2 Спектр на выходе оптической частотной гребенки после эквализации

Существенного снижения уровня крайних спектральных компонент не наблюдается, следовательно, сформированная гребёнка может использоваться для построения суперканала с последующим мультиплексированием и передачей в гибкой оптической сети.

С физической точки зрения распределение мощности по линиям гребёнки имеет принципиальное значение, поскольку именно оно определяет, насколько равномерным будет запас по OSNR у отдельных поднесущих после прохождения спектрально-селективных элементов транспондера. Если распределение мощности по линиям не выровнено, то даже при

приемлемом среднем уровне мощности отдельные поднесущие, как правило крайние, будут иметь меньший энергетический запас и первыми достигнут порога BER. Следовательно, уже на стадии анализа оптической частотной гребёнки необходимо учитывать не только факт наличия требуемого числа спектральных компонентов, но и возможное появление в будущем худшей поднесущей, которая будет определять допустимость использования выбранного режима транспондера в целом.

После демультимплексирования оптической частотной гребёнки в AWGR мощность отдельных поднесущих распределяется по выходным портам. Для корректной работы транспондера необходимо, чтобы каждая поднесущая попадала в рабочую полосу соответствующего канала AWGR и испытывала допустимые потери и ограниченный уровень паразитных примесей от соседних каналов. В рассматриваемой модели шаг каналов AWGR составляет 25 ГГц, а ширина канала по уровню -3 дБ находится на уровне около 23 ГГц, что означает наличие конечного фильтрационного окна и, следовательно, чувствительность системы к спектральному рассогласованию. Внутренние потери порядка 4 дБ и неравномерность потерь по портам порядка 1 дБ дополнительно приводят к разбросу OSNR между отдельными поднесущими даже при изначально одинаковых уровнях мощности на входе. На рисунке 4.3 приведено распределение мощности поднесущих по портам до и после эквализации.

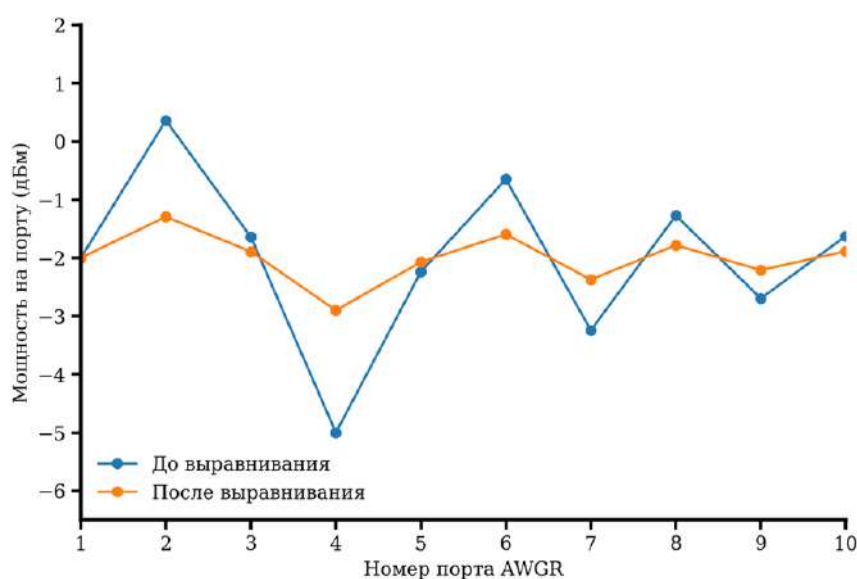


Рисунок 4.3 Распределение оптической мощности поднесущих по портам AWGR

До выравнивания наблюдается разброс мощности по портам, обусловленный неоднородностью спектральных линий гребёнки и неравномерностью внутренних потерь AWGR. После применения процедуры выравнивания разброс по мощности уменьшается, что непосредственно повышает OSNR худших портов и снижает вероятность необходимости

перехода на более низкоэффективные форматы модуляции и, как следствие, повышает устойчивость при выборе более высоких форматов модуляции при заданном QoT.

Установленная после процедуры эквализации неравномерность спектра $\Delta P_{post} \leq 0,9$ дБ является допустимым компромиссом для оптических частотных гребенок в интегральном исполнении. Учитывая, что алгоритм выбора рационального режима в T-SDN контроллере ориентируется на показатели "худшей поднесущей", данный разброс мощности не приводит к ошибкам прогнозирования, так как запас по QoT рассчитывается исходя из энергетического бюджета наиболее уязвимого спектрального компонента суперканала.

Таким образом, анализ формирования оптической частотной гребёнки и распределения мощности по портам AWGR выполняет двойную функцию. С одной стороны, он подтверждает корректность работы модели адаптивного транспондера и возможность формирования суперканала. С другой стороны, уже на этом этапе выявляется важная закономерность: равномерность распределения мощности и разброс характеристик по портам непосредственно влияют на будущую область допустимых режимов, поскольку допустимость всей конфигурации в дальнейшем определяется не средними параметрами системы, а худшей поднесущей или худшим портом AWGR. Именно поэтому полученные результаты должны далее использоваться не как самостоятельная верификация AWGR, а как основание для анализа QoT-ограничений транспондера.

4.4.2. Спектральные характеристики AWGR и их влияние на формирование QoT-ограничений

Следующим этапом верификации является исследование спектральных характеристик AWGR как элемента, задающего основные ограничения для формируемого суперканала. В рамках рассматриваемой архитектуры AWGR определяют ширину спектрального блока, ширину пропускания поднесущих, уровень внутренних потерь и величину межканальных помех, а значит именно через его характеристики физические ограничения проецируются на системные показатели качества передачи.

С точки зрения дальнейшего анализа QoT центральное значение имеет не просто форма АЧХ канала AWGR, а то, каким образом эта форма ограничивает допустимую ширину и расположение спектра поднесущей. Если значительная часть спектральных компонент поднесущей располагается в пределах центральной области канала AWGR, влияние фильтрации будет умеренным. Однако при приближении спектральных компонент к скатам АЧХ усиливается неравномерное ослабление боковых составляющих, появляются амплитудно-фазовые искажения, растёт EVM и, как следствие, ухудшаются Q-factor и BER. Поэтому реальный смысл анализа полосы канала AWGR состоит в определении не только номинальной пропускной способности канала, но и допустимого окна согласованного прохождения спектра поднесущей.

Корректность работы AWGR как спектрального мультиплексора определяется прежде всего формой передаточной функции. На рисунке 4.4 приведена нормированная амплитудно-частотная характеристика одного канала AWGR.

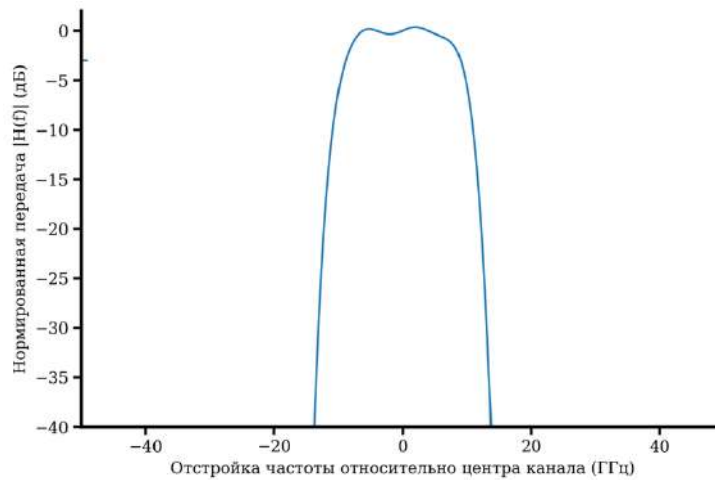


Рисунок 4.4 АЧХ одного канала AWGR

По уровню -3 дБ определяется эффективная полоса пропускания Δf_{-3dB} , которая является основным физическим ограничением для спектрального уплотнения каналов. При формировании суперканалов конечная ширина канала AWGR приводит к фильтрационному штрафу, что проявляется ростом BER и EVM и может ограничивать допустимый формат модуляции. Полоса пропускания и форма АЧХ AWGR ограничивают предельное число поднесущих и допустимый спектральный наклон внутри суперканала, а также задают уровень межканальных перекрёстных помех. Это непосредственно влияет на требуемый запас OSNR и допустимый порядок модуляции.

На рисунке 4.5 представлено семейство АЧХ для нескольких портов.

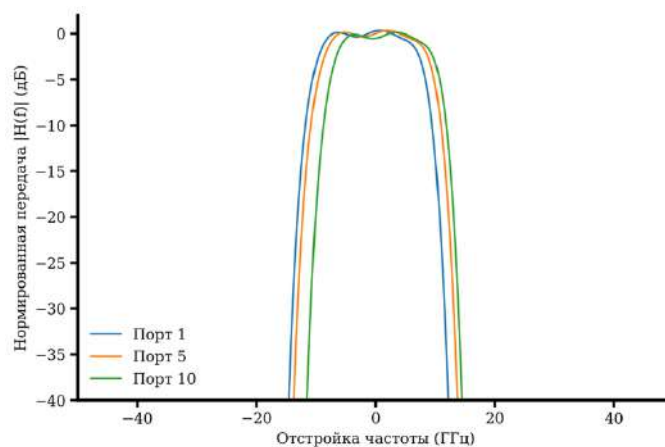


Рисунок 4.5 АЧХ для нескольких каналов AWGR

Представленные АЧХ демонстрируют, что AWGR-канал является частотно-селективным фильтром с полосой по уровню -3 дБ порядка 23 ГГц и заметной вариабельностью, что приводит к неравномерному ослаблению спектральных компонент суперканала и деградации крайних поднесущих, повышая EVM, BER и тем самым ограничивая область допустимых режимов.

Наблюдаемые неоднородности по портам, такие как различия в максимуме передачи, небольшие смещения центральной частоты и вариации полосы канала, являются практическим эффектом для AWGR и должны учитываться при расчёте QoT: крайние порты, как правило, являются более чувствительными к межканальным перекрёстным помехам и фильтрационному штрафу.

Внутренние потери AWGR оказывают влияние прежде всего через уменьшение OSNR для выбранных форматов модуляции. Это особенно важно при использовании высоких порядков модуляции, для которых пороговые требования по OSNR заметно выше: в модели использованы ориентировочные пороговые значения около 12 дБ для QPSK, 16 дБ для 16QAM, 20 дБ для 32QAM и 24 дБ для 64QAM при запасе по QoT около 1,5 дБ. Следовательно, одна и та же конфигурация AWGR может быть приемлемой для низкого порядка модуляции и недопустимой для более спектрально-эффективного.

Внутренние потери AWGR определяют энергетический бюджет суперканала и уровень OSNR на входе приёмника. На рисунке 4.6 приведены внутренние потери по портам AWGR. Неравномерность вычисляется по формуле $NU = \max(IL_k) - \min(IL_k)$. Наличие $NU \neq 0$ означает, что даже при равных мощностях линий гребёнки на входе AWGR на выходных портах формируется разброс мощности и перекося спектра, а следовательно, и разброс OSNR по спектральным компонентам.

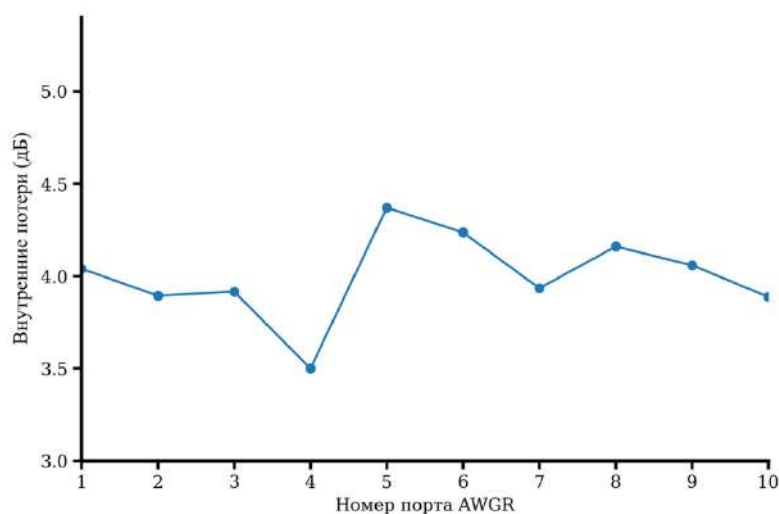


Рисунок 4.6 Распределение внутренних потерь по портам AWGR

В использовании формата модуляции 16QAM и выше такой эффект приводит к ситуации, когда характеристики худшего порта определяют максимально допустимый формат модуляции. Потери на AWGR повышают требования к усилению и увеличивают вклад ASE-шума, что уменьшает допустимую дальность при высоких порядках модуляции.

Отдельного внимания заслуживает неравномерность потерь по портам AWGR. Даже при небольшом разбросе порядка 1 дБ она приводит к тому, что разные поднесущие суперканала получают различный запас по OSNR. В результате область допустимых режимов формируется не только общей полосой пропускания и средним уровнем потерь, но и статистикой разброса по портам. Для формирования суперканалов это означает, что лимитирующим фактором становится наихудший порт, для которого сочетание потерь, фильтрационного штрафа и межканальных перекрёстных помех оказывается максимальным. Именно эта поднесущая первой пересекает порог BER и тем самым определяет границу допустимости всей конфигурации транспондера.

Межканальные перекрёстные помехи от соседних каналов являются второй ключевой характеристикой AWGR при использовании плотной сетки частот. На рисунке 4.7 показан уровень межканальных перекрёстных помех соседнего канала по портам. При шаге 25 ГГц межканальные утечки становятся существенным источником интерференционной составляющей и особенно критичны для высоких порядков модуляции, так как приводят к снижению эффективного OSNR и росту BER и EVM.

Таким образом, спектральные характеристики AWGR должны трактоваться не как набор второстепенных параметров отдельного оптического компонента, а как механизм формирования системных ограничений по QoT.

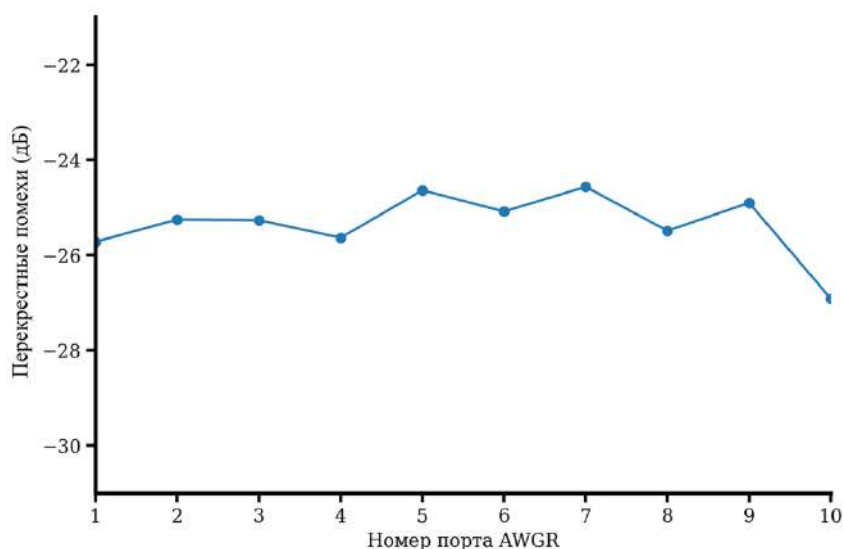


Рисунок 4.7 Перекрёстные помехи от соседнего канала по портам AWGR

Из этого следует важный вывод: при выборе режима передачи адаптивного транспондера необходимо учитывать не только целевой формат модуляции и требуемую ёмкость суперканала,

но и соответствие спектральной структуры сигнала реальному фильтрационному окну AWGR, а также запас по худшему порту. Именно это обстоятельство делает анализ AWGR центральным элементом перехода от модели к области допустимых режимов передачи.

Для подтверждения корректности работы AWGR как мультиплексора в передающей части анализируется спектр сформированного суперканала на выходе устройства. На рисунке 4.8 показан спектр суперканала после AWGR в режиме мультиплексирования поднесущих и формирования суперканала.

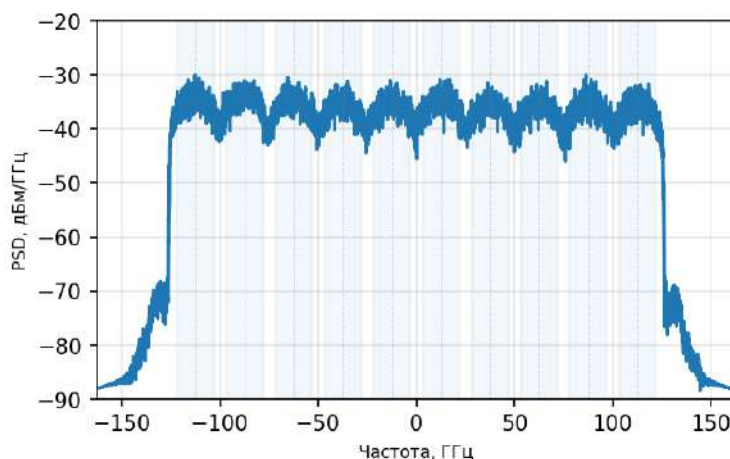


Рисунок 4.8 Спектр суперканала 250 ГГц после AWGR

Полученный спектр показывает, что сформированный суперканал содержит набор спектральных компонентов с заданным шагом, а суммарная занимаемая полоса соответствует величине

$$B_{SC} \approx N_p \cdot \Delta f_{AWGR} = 10 \cdot 25 = 250 \text{ ГГц},$$

что согласуется с выбранной конфигурацией AWGR. Данный результат является важным для последующей интеграции в требования гибкой сетки частот, так как позволяет непосредственно определить требуемый спектральный блок для размещения суперканала в канале связи.

В отличие от исходного спектра оптической частотной гребёнки, где отдельные спектральные линии анализировались как самостоятельные компоненты, на выходе AWGR формируется единый суперканал, состоящий из набора поднесущих. Спектральные компоненты объединены в общую структуру с достаточно равномерным распределением мощности по центральной части спектра. При этом на краях суперканала наблюдается небольшое снижение уровня, что может быть связано с конечной полосой пропускания AWGR, остаточной неравномерностью потерь по портам и фильтрационным воздействием спектрально-селективной части устройства. Полученный результат подтверждает корректность процесса мультиплексирования поднесущих и возможность формирования суперканала, пригодного для дальнейшего анализа QoT-параметров, включая BER, EVM и Q-factor.

4.4.3. Совместное влияние электрической полосы и полосы канала AWGR на показатели качества передачи

Для решения этой задачи были проведены исследования влияния полосы пропускания AWGR B_{AWGR} на QoT при различных значениях электрической полосы I/Q-сигнала B_e (рис. 4.9).

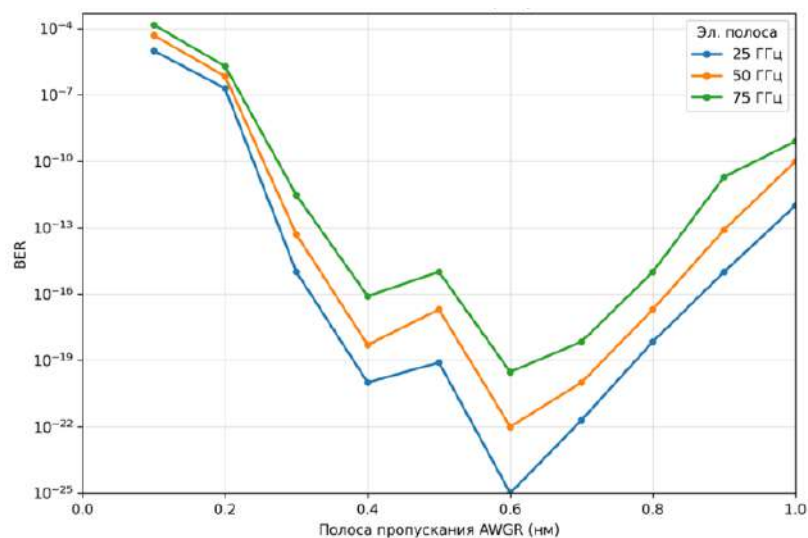


Рисунок 4.9 Зависимость BER от полосы пропускания AWGR при различных значениях электрической полосы I/Q-сигнала

Под электрической полосой I/Q-сигнала понимается ширина спектра модулирующего I/Q-сигнала, определяющая спектральную ширину формируемого оптического сигнала. Обычно полоса электрических сигналов управления MZM находится в диапазоне нескольких десятков гигагерц и определяется символьной скоростью. Для современных когерентных систем связи типичны значения порядка от 25 до 70 ГГц. Она определяет спектральную ширину формируемого оптического суперканала, поэтому при исследовании AWGR важно учитывать электрическую полосу: от её значения зависит согласование с полосой пропускания AWGR, а значит и параметры качества передачи.

Изменение электрической полосы приводит к изменению спектральной структуры оптического сигнала на выходе модулятора MZM, вследствие чего изменяется степень согласования с полосой пропускания AWGR. Это, в свою очередь, влияет на искажения сигнала, межканальные помехи и итоговые показатели качества передачи.

Электрическая полоса сигнала определяет ширину спектра, подаваемого на модулятор, и в конечном счёте формирует распределение энергии в оптическом спектре передаваемой поднесущей или группы поднесущих. При фиксированной полосе канала AWGR увеличение электрической полосы приводит к расширению спектра сигнала и повышает вероятность того, что его крайние спектральные компоненты окажутся на скатах АЧХ канала. В этой ситуации AWGR начинает выполнять не только функцию пространственно-спектрального

маршрутизатора, но и функцию ограничивающего фильтра, вносящего дополнительные искажения. Результатом становится рост искажений сигнального созвездия, увеличение EVM и BER. Следовательно, качество передачи определяется не абсолютной величиной электрической полосы, а её согласованием с полосой пропускания спектрально-селективного элемента.

В рассматриваемой архитектуре ограничивающее значение имеет то обстоятельство, что полоса канала AWGR по уровню -3 дБ составляет около 23 ГГц, тогда как электрическая полоса модулятора задаётся на уровне порядка 25 ГГц. Уже из этого соотношения следует, что предельные режимы широкополосной модуляции не могут анализироваться без учёта спектральной селективности AWGR. Если формируемый сигнал использует лишь часть доступной электрической полосы и его спектр остаётся хорошо согласованным с рабочим окном канала AWGR, система демонстрирует устойчивые значения QoT. Однако по мере роста электрической полосы и увеличения числа активных спектральных компонентов формируемый спектр начинает занимать всё большую часть полосы канала, после чего возникает режим частичного среза боковых компонентов, неравномерного ослабления поднесущих и роста межканальных искажений. Именно в этой зоне и формируется граница допустимых режимов передачи адаптивного транспондера.

С практической точки зрения удобно выделить три характерные области согласования параметров B_e и B_{AWGR} . Первая область соответствует режиму, при котором электрическая полоса заметно меньше эффективной полосы канала AWGR. В этой зоне деградация сигнала, обусловленная фильтрацией в AWGR, минимальна, однако спектральный ресурс используется не полностью, и транспондер может работать с избыточным запасом по качеству передачи ценой недоиспользования потенциальной ёмкости канала. Вторая область соответствует режиму рационального согласования, когда электрическая полоса достаточно велика для эффективного использования спектра, но при этом основные спектральные компоненты не попадают в область резких спадов АЧХ AWGR. Именно эта зона должна рассматриваться как область предпочтительных параметров. Третья область формируется при превышении рационального значения электрической полосы относительно полосы канала AWGR. Здесь становится заметным деградация сигнала, обусловленная фильтрацией в AWGR, возрастает BER и уменьшается запас по QoT.

Особенно наглядно совместное влияние B_e и B_{AWGR} проявляется при изменении формата модуляции. Для QPSK система сохраняет допустимость в более широком диапазоне сочетаний параметров, поскольку требования к OSNR и характеристикам оптического тракта остаются сравнительно низкими. По мере перехода к 16QAM, 32QAM и 64QAM зона допустимых сочетаний B_e и B_{AWGR} сужается, так как даже умеренная деградация сигнала вследствие

фильтрации и разброс потерь по портам начинают приводить к выходу EVM за допустимый уровень (рис. 4.10).

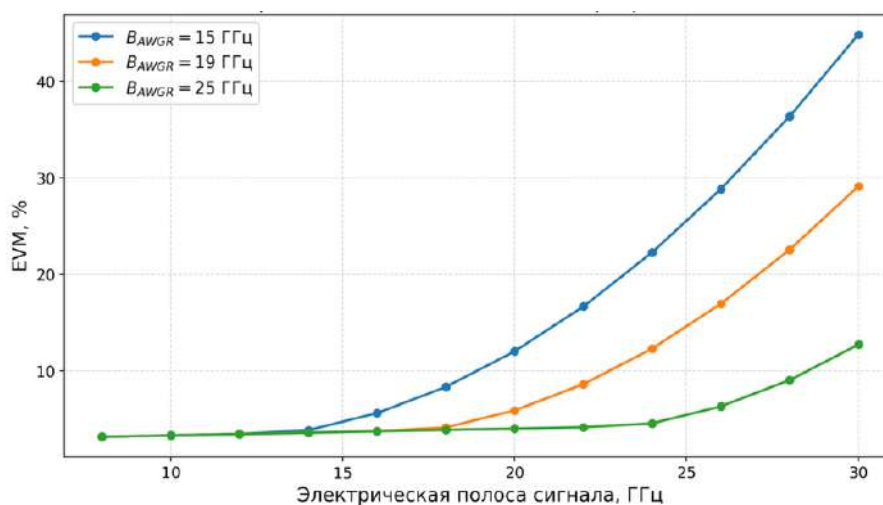


Рисунок 4.10 Зависимость EVM от B_e при разных B_{AWGR}

В этом смысле рост порядка модуляции не просто повышает спектральную эффективность, а меняет геометрию области допустимых режимов, делая систему чувствительной к тем аппаратным ограничениям, которые для низких порядков модуляции могли быть практически незаметны. На уровне модели этот вывод поддерживается как пороговыми требованиями по OSNR для разных форматов модуляции, так и уже учтёнными параметрами потерь и межканальных перекрёстных помех AWGR.

Ещё один результатом, полученным в ходе исследований, является то, что допустимость режима должна оцениваться не по усреднённому значению Q-factor или BER для всей конфигурации, а по худшей поднесущей либо по худшему порту AWGR. Критерием допустимости конфигурации является достижение целевого порога исправности ошибок BER для каждой отдельной поднесущей. Даже если среднее качество передачи остаётся приемлемым, крайние спектральные компоненты при большом B_e и ограниченной полосе B_{AWGR} оказываются более подвержены фильтрации и могут первыми пересечь порог недопустимости. Следовательно, область допустимых режимов в пространстве должна строиться по критерию выполнения QoT-условий для всей конфигурации суперканала, а не только в среднем по поднесущим. Такой подход логически подготавливает следующий шаг работы, связанный с построением карт допустимости режимов и выделение зоны оптимального выбора параметров транспондера, что будет представлено далее в других параграфах диссертации.

Таким образом, совместный анализ электрической полосы и полосы канала AWGR позволяет перейти от описания свойств отдельных оптических узлов к установлению границы между допустимыми и недопустимыми режимами передачи. По сути, именно согласование этих двух параметров определяет, будет ли формируемый режим устойчивым с точки зрения QoT или

приведёт к фильтрационным искажениям и недопустимому росту BER. Следовательно, при последующем выборе режима передачи адаптивного транспондера электрическая полоса не может задаваться изолированно от полосы спектрально-селективной оптической части. Их совместное рассмотрение является необходимым условием формирования корректной области допустимых и оптимальных режимов.

4.5. Исследование изменения спектральной структуры и параметров суперканала при реконфигурации

Интерес для передачи информации представляет исследование изменения спектральной структуры суперканала и показателей качества передачи при варьировании числа активных поднесущих, формата модуляции и ширины выделенного спектрального блока. Особое внимание уделяется конфигурациям суперканала, размещаемым в блоках шириной 50, 100 и 200 ГГц, что позволяет оценить компромисс между спектральной эффективностью, пропускной способностью и QoT-показателями в условиях аппаратных ограничений транспондера.

При ширине спектрального блока 50 ГГц суперканал содержит ограниченное число поднесущих, что уменьшает суммарную пропускную способность, но обеспечивает более высокий запас по качеству передачи и меньшую чувствительность к фильтрационным искажениям. Конфигурация 100 ГГц обеспечивает рациональный компромисс между спектральной эффективностью и QoT и может рассматриваться как предпочтительный рабочий режим. При расширении спектрального блока до 250 ГГц достигается увеличение ёмкости суперканала, однако возрастает чувствительность к неравномерности характеристик AWGR, фильтрационному сужению и разбросу QoT по крайним поднесущим, что может ограничивать использование высоких порядков модуляции.

4.5.1. Постановка задачи исследования реконфигурации суперканала

В адаптивном оптическом транспондере суперканал представляет собой совокупность ортогональных поднесущих, параметры которых могут изменяться в зависимости от доступного спектрального ресурса, требуемой ёмкости канала и ограничений по качеству передачи. В предыдущих разделах главы были рассмотрены базовые аппаратные ограничения, связанные с характеристиками AWGR, электрической полосой сигнала и энергетическими параметрами оптического тракта. Для практического применения адаптивного транспондера в гибкой оптической сети необходимо дополнительно установить, каким образом изменяется сама спектральная структура суперканала при реконфигурации режима передачи, то есть при изменении числа активных поднесущих, формата модуляции и ширины выделяемого спектрального блока.

В разработанной мною архитектуре к числу управляемых параметров уже отнесены число активных поднесущих, шаг поднесущих, суммарная полоса суперканала, защитная полоса между

поднесущими, формат модуляции, символьная скорость на поднесущей, ширина спектрального блока в гибкой сетке частот и мощность на поднесущую. Реконфигурация суперканала должна анализироваться как перестройка спектральной структуры сигнала, оказывающая прямое влияние на BER, Q-factor, EVM и устойчивость крайних поднесущих к фильтрационным искажениям.

С практической точки зрения рассматриваемая задача имеет двойное значение. Во-первых, она позволяет определить, какие конфигурации суперканала реально могут быть размещены в заданном спектральном блоке гибкой сетки частот без недопустимого роста BER и EVM. Во-вторых, она формирует основу для последующего алгоритма выбора режима передачи транспондера в замкнутом контуре T-SDN управления, где ширина доступного спектрального блока и допустимый формат модуляции задаются не произвольно, а с учётом аппаратных ограничений и текущего среднего запаса по QoT.

4.5.2. Общие закономерности изменения спектральной структуры суперканала

Спектральная структура суперканала определяется совокупностью трёх основных факторов: числом активных поднесущих, расстоянием между ними и форматом модуляции, который влияет на допустимую символьную скорость и требования к качеству передачи. При фиксированном шаге оптической частотной гребёнки и частотной сетке AWGR увеличение числа активных поднесущих приводит к расширению суммарной полосы суперканала и увеличению числа спектральных компонентов, которые должны быть переданы без недопустимого роста межканальных помех и фильтрационного штрафа.

При этом изменение формата модуляции не обязательно приводит к заметному изменению внешней ширины спектрального контура суперканала, но существенно влияет на требования к качеству спектральной формы сигнала, допустимому уровню шума, фазовых искажений и межканальных перекрёстных помех. Для форматов более высокого порядка, таких как 32QAM и 64QAM, даже умеренное ухудшение спектральной селективности или неравномерности по портам AWGR может оказаться критическим, хотя для QPSK или 16QAM тот же режим передачи ещё остаётся допустимым.

При размещении суперканала в узком спектральном блоке спектральные компоненты располагаются более компактно, и система, как правило, использует меньшее число поднесущих и более помехоустойчивые форматы модуляции. При расширении доступного спектрального блока появляется возможность увеличения числа поднесущих, повышения суммарной ёмкости и, в ряде случаев, перехода к более высокоэффективным форматам модуляции. Однако одновременно возрастает чувствительность крайних поднесущих к разбросу АЧХ, межканальным перекрёстным помехам, температурному дрейфу и остаточной неравномерности спектра после эквализации. Поскольку в модели уже учитываются неравномерность спектра до

и после выравнивания, межканальные перекрёстные помехи и разброс OSNR по портам, такой анализ является естественным продолжением ранее введённых аппаратных ограничений.

4.5.3. Сравнительный анализ конфигураций 50, 100 и 200 ГГц

Для сопоставления влияния ширины спектрального блока на характеристики режима передачи адаптивного транспондера рассмотрены три конфигурации суперканала при одинаковом формате модуляции 16QAM: суперканал шириной 50 ГГц с двумя активными поднесущими, суперканал шириной 100 ГГц с четырьмя активными поднесущими и суперканал шириной 200 ГГц с восемью активными поднесущими. Во всех случаях шаг частотной гребёнки и шаг каналов AWGR составляют 25 ГГц, полоса канала AWGR по уровню -3 дБ равна 23 ГГц, электрическая полоса модулятора составляет 25 ГГц, а для формата 16QAM порог допустимости по OSNR принят равным 16 дБ при запасе по QoT 1,5 дБ.

Таблица 4.2 Сравнение конфигураций суперканалов

Характеристика	Суперканал 50 ГГц	Суперканал 100 ГГц	Суперканал 200 ГГц
Количество поднесущих	2	4	8
Суммарная скорость (Гбит/с)	200	400	800
Порог OSNR (дБ)	$\sim 16,5$	$\sim 17,3$	$\sim 18,2$
BER (post-FEC)	10^{-12}	10^{-12}	10^{-11}
EVM (%)	9,5	11,3	14,2
Длина линии (км)	~ 180	~ 150	~ 120

С точки зрения пропускной способности рассмотренные конфигурации образуют последовательность с линейным ростом суммарной скорости передачи при увеличении числа активных поднесущих. При практическом допущении порядка 25 ГБод на поднесущую это соответствует приблизительно 200, 400 и 800 Гбит/с на суперканал соответственно без учёта служебных накладных расходов и FEC. При этом увеличение ёмкости достигается ценой роста требований к параметрам оптического тракта и к стабильности аппаратных характеристик адаптивного транспондера.

Конфигурация суперканала 50 ГГц с двумя поднесущими является наиболее компактной (рис. 4.11). В пределах такого спектрального блока поднесущие размещаются в узком частотном окне и занимают значительную часть доступной полосы, поэтому даже небольшое рассогласование между центральными частотами поднесущих и максимумами каналов AWGR, а также остаточная неравномерность мощности по ветвям заметно влияют на качество крайних поднесущих. Вместе с тем при числе поднесущих, равном двум, структура суперканала остаётся наиболее устойчивой к деградации, связанной с фильтрацией и неравномерностью по портам AWGR. Поэтому режим 50 ГГц можно рассматривать как наиболее устойчивый по BER и EVM среди трёх сравниваемых конфигураций, но одновременно как наименее ёмкий (рис. 4.12). Для него допустимая область по длине линии оказывается наибольшей, а требования к OSNR наименее жёсткими.

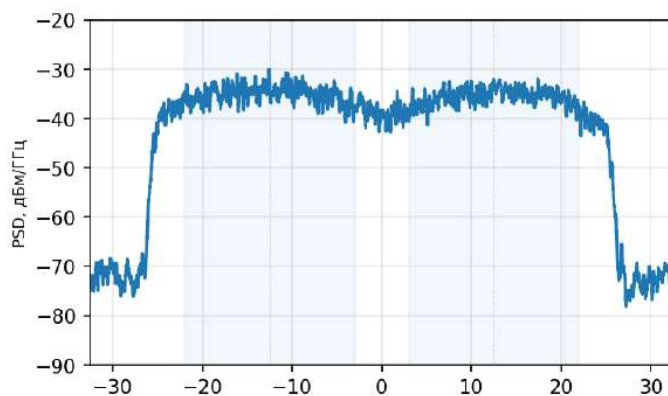


Рисунок 4.11 Спектр суперканала 50 ГГц

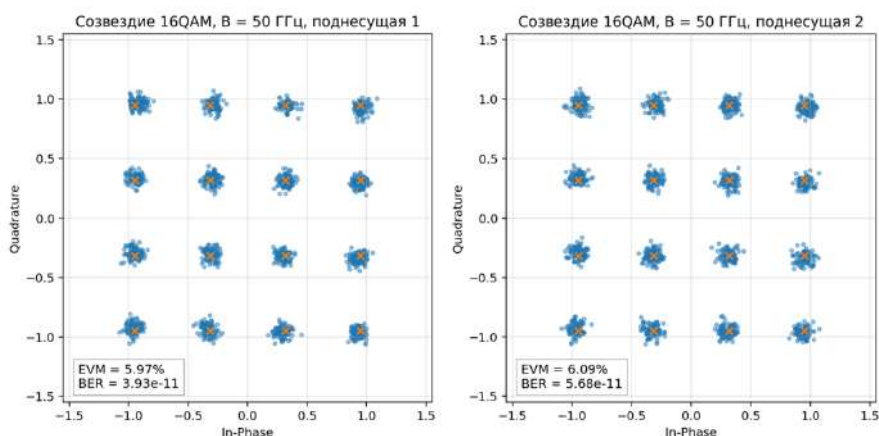


Рисунок 4.12 Сигнальные созвездия по поднесущим для суперканала 50 ГГц

Конфигурация суперканала 100 ГГц с четырьмя активными поднесущими представляет собой компромиссный вариант (рис. 4.13). Увеличение ширины спектрального блока позволяет задействовать большее число поднесущих без чрезмерного уплотнения спектральной структуры, что уменьшает вероятность того, что значительная часть энергии крайних поднесущих попадёт на скаты амплитудно-частотной характеристики AWGR. По сравнению с режимом 50 ГГц возрастает потенциальная пропускная способность, но одновременно усиливается зависимость BER и EVM от согласованного выбора мощности поднесущих (рис. 4.14).

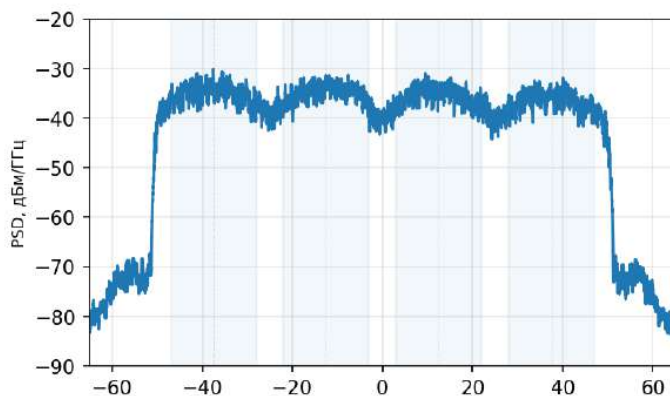


Рисунок 4.13 Спектр суперканала 100 ГГц

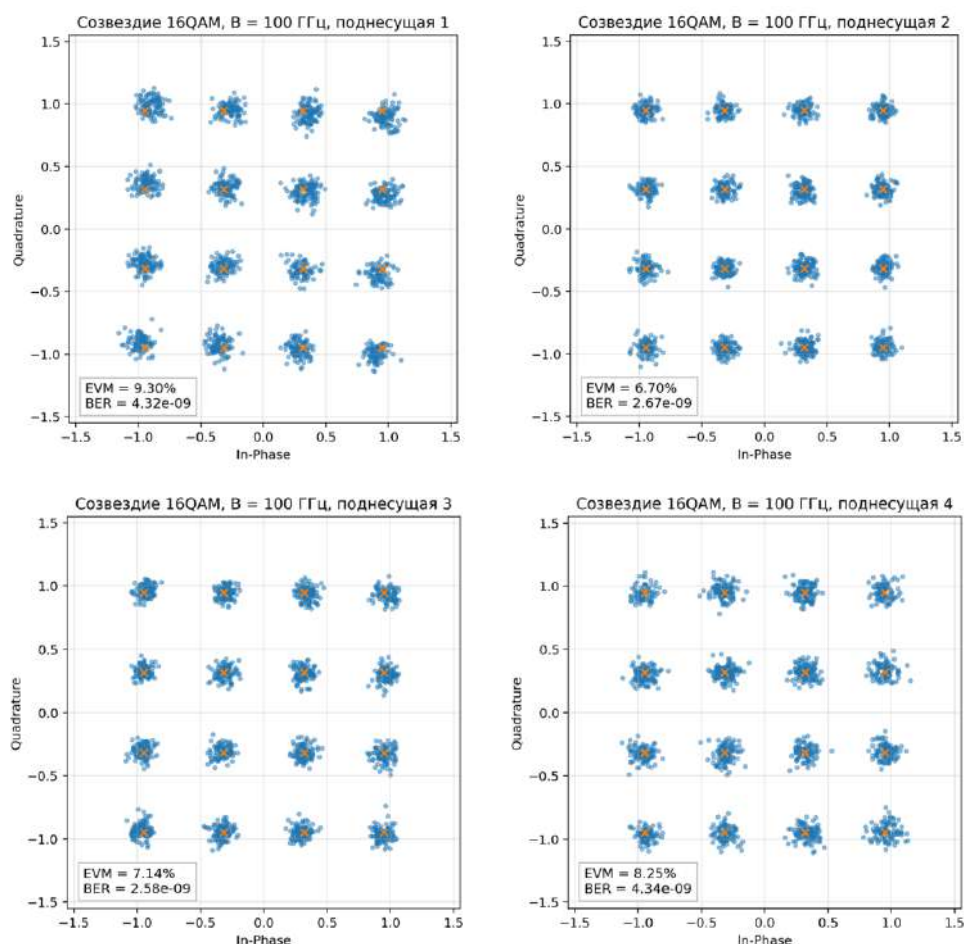


Рисунок 4.14 Созвездия по поднесущим для суперканала 100 ГГц

Конфигурация 200 ГГц с восемью активными поднесущими соответствует предельному высокоёмкому режиму (рис. 4.15). Расширение спектрального окна и рост числа поднесущих повышают полезную ёмкость суперканала, однако именно в этой конфигурации наиболее ярко проявляются аппаратные ограничения архитектуры: конечная полоса каналов AWGR, внутренние потери, разброс потерь по портам, перекрёстные помехи и остаточная неравномерность спектра после эквализации. В результате крайние поднесущие становятся наиболее уязвимыми с точки зрения BER и EVM, а оценка режима по усреднённым QoT-показателям оказывается недостаточной (рис. 4.16). Для конфигурации 200 ГГц требуется наилучший запас QoT линии, а допустимая область по длине маршрута сужается сильнее всего. Поэтому данный режим целесообразен только для сравнительно коротких или качественных трактов, обеспечивающих требуемый OSNR, тогда как при ухудшении условий передачи система должна либо уменьшать число активных поднесущих, либо переходить к менее плотной конфигурации.

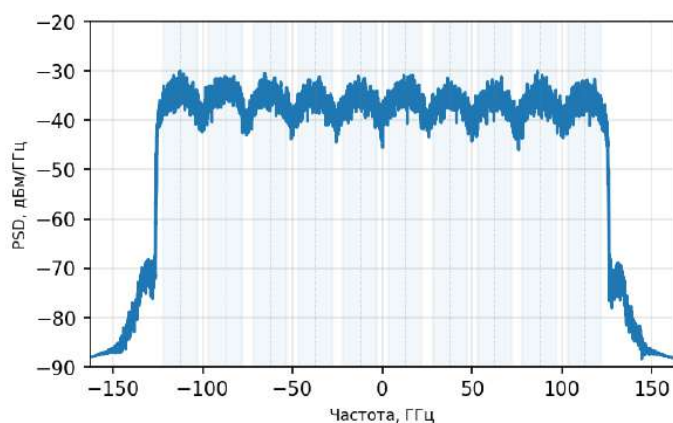


Рисунок 4.15 Спектр суперканала 200 ГГц

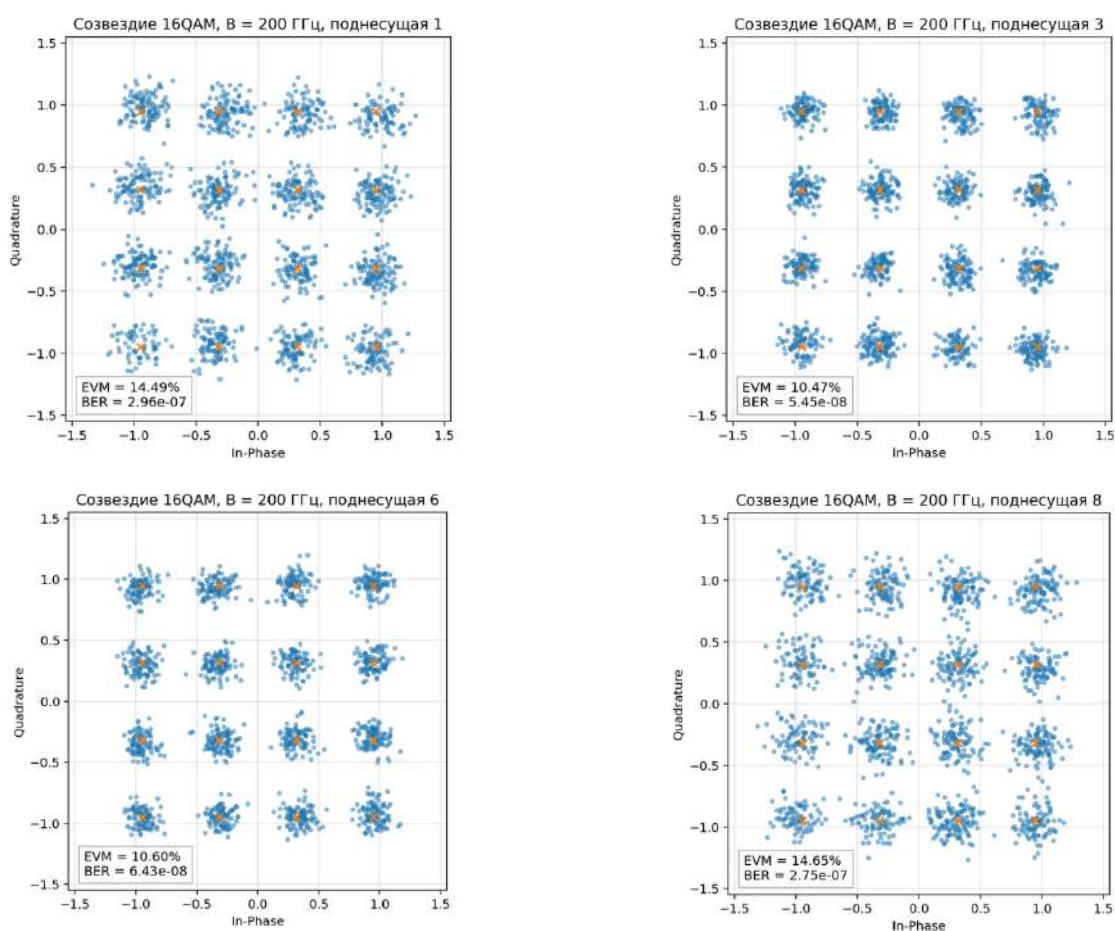


Рисунок 4.16 Созвездия по поднесущим для суперканала 200 ГГц

Таким образом, при одинаковом формате модуляции 16QAM увеличение ширины спектрального блока от 50 до 250 ГГц приводит к линейному росту потенциальной скорости передачи, но одновременно уменьшает устойчивость режима по BER и EVM, повышает чувствительность краевых поднесущих и сужает допустимую область режимов передачи по длине оптического тракта.

4.6. Исследование влияния мощности передачи на показатели качества суперканала

Одним из базовых параметров, определяющих качество передачи в адаптивном оптическом транспондере, является оптическая мощность передачи P_{tx} . Для OFDM-суперканала данный параметр оказывает влияние не только на отношение сигнал/шум, но и на устойчивость структуры суперканала в целом, поскольку изменение мощности по-разному проявляется для поднесущих, занимающих различные области спектрального блока. В связи с этим анализ зависимости BER, EVM и Q-factor от P_{tx} позволяет определить рабочие области режима передачи и установить диапазоны мощности, в которых обеспечивается работа допустимого режима передачи.

В диссертационной работе влияние мощности передачи анализировалось для набора конфигураций, различающихся числом активных поднесущих, форматом модуляции и параметрами спектрального блока. Для каждой конфигурации рассчитывались усреднённые по серии прогонов значения BER и EVM, а также отдельно определялись характеристики центральных, краевых и наихудших поднесущих. Такой подход позволил оценить как общее влияние мощности на качество передачи, так и неравномерность этого влияния на спектр суперканала.

Результаты моделирования показали (рис. 4.17 и 4.18), что в области малых значений P_{tx} качество передачи ограничивается недостаточным энергетическим запасом. Для всех исследованных конфигураций при низкой мощности наблюдалось увеличение BER, рост EVM и снижение Q-factor. Это связано с тем, что мощность полезного сигнала становится недостаточной для обеспечения требуемого уровня отношения сигнал/шум в приёмнике, а случайные шумовые флуктуации приводят к заметному ухудшению характеристик сигнального созвездия.

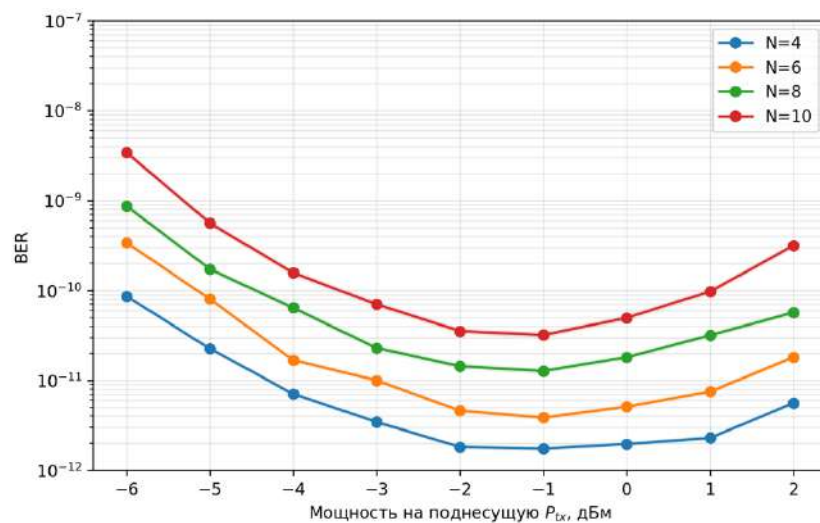


Рисунок 4.17 Зависимость BER от мощности при разном количестве поднесущих

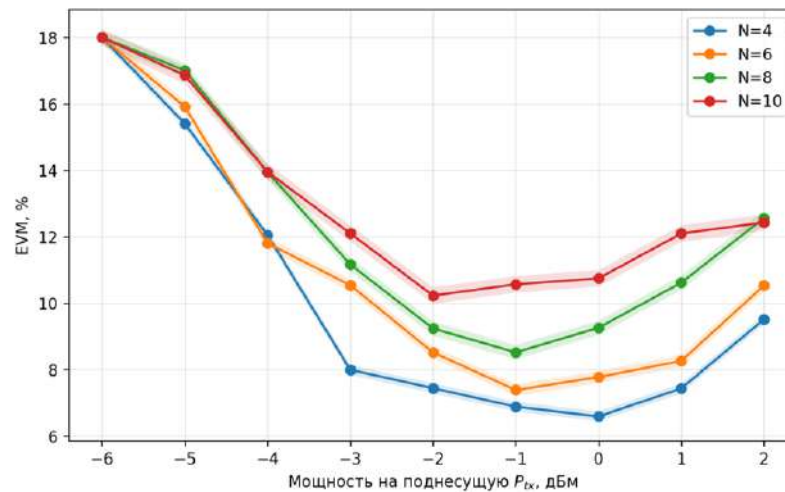


Рисунок 4.18 Зависимость EVM от мощности при разном количестве поднесущих

При увеличении мощности передачи вначале наблюдается улучшение всех рассматриваемых показателей. BER и EVM уменьшаются, что соответствует увеличению запаса по качеству передачи. Однако степень этого улучшения существенно зависит от структуры суперканала. Для конфигураций с меньшим числом поднесущих и более широким межподнесущим шагом положительный эффект повышения мощности выражен более устойчиво, чем для плотных многонесущих конфигураций. Это объясняется тем, что при более плотной спектральной упаковке суперканал оказывается чувствительнее к неидеальностям частотно-селективного тракта и к дополнительным искажениям, возникающим в оптических узлах.

Анализ распределения параметров по спектру показал, что центральные и краевые поднесущие по-разному реагируют на изменение мощности передачи. Центральные поднесущие в большинстве случаев демонстрируют более плавное и предсказуемое улучшение качества при росте P_{tx} , тогда как для краевых поднесущих положительный эффект ограничивается воздействием частотно-селективного тракта. Стоит отметить, что даже при увеличении мощности крайние спектральные компоненты продолжают испытывать повышенную деградацию из-за фильтрационного сужения и неравномерности характеристик AWGR. В результате допустимый диапазон P_{tx} , определяемый по наихудшей поднесущей, оказывается более узким, чем диапазон, рассчитанный по среднему значению QoT по всему суперканалу.

Для более высоких форматов модуляции зависимость качества от мощности проявляется ещё более жёстко. Если для QPSK-суперканалов повышение мощности даёт сравнительно большой запас устойчивости, то для 16QAM, 32QAM и, особенно, 64QAM диапазон мощностей, в котором одновременно обеспечиваются допустимые BER и EVM, становится заметно уже. Это связано с меньшей устойчивостью плотных сигнальных созвездий к амплитудным и фазовым искажениям, а также к частотной неравномерности по поднесущим. Следовательно, выбор

мощности передачи не может рассматриваться отдельно от выбранного формата модуляции и числа активных поднесущих.

С точки зрения режима передачи полученные результаты имеют принципиальное значение. Они показывают, что мощность должна рассматриваться как один из параметров совместной оптимизации конфигурации суперканала, а не как внешний фиксированный коэффициент. Для коротких трактов и конфигураций с умеренным числом поднесущих допустимо использование более компактной спектральной упаковки при условии выбора рабочей области мощности, обеспечивающей приемлемые BER и EVM. Для более плотных конфигураций увеличение P_{tx} само по себе не решает проблему деградации качества передачи, поскольку лимитирующим фактором становится не только энергетический запас, но и нарушение целостности структуры суперканала.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в адаптивном транспондере мощность передачи должна быть включена в состав управляемых параметров суперканала. Полученные зависимости создают основу для дальнейшего выбора допустимых режимов передачи и построения алгоритма реконфигурации, в котором изменение мощности рассматривается совместно с перестройкой числа поднесущих и структуры спектрального блока.

4.7. Исследование влияния длины маршрута на допустимые режимы передачи

Наряду с мощностью передачи одним из определяющих факторов выбора режима передачи адаптивного транспондера является длина оптического тракта, или, в более общем виде, эквивалентная протяжённость оптического тракта, учитывающая накопление шумов по мере прохождения сигнала через оптический тракт. Для гибких оптических сетей этот фактор имеет принципиальное значение, поскольку одна и та же требуемая скорость передачи может быть реализована различными конфигурациями суперканала, однако допустимость конкретного режима существенно зависит от протяжённости маршрута.

Результаты моделирования показали, что при увеличении длины маршрута наблюдается закономерное ухудшение показателей качества передачи. Для всех рассмотренных конфигураций суперканала с ростом длины оптического тракта увеличивается BER, возрастает EVM и снижается Q-factor. Это связано с накоплением шума усилителей, увеличением чувствительности к спектральным искажениям, а также с постепенным уменьшением энергетического и качественного запаса на приёме. При этом скорость деградации существенно зависит от выбранного режима передачи.

Наиболее устойчивыми к увеличению длины маршрута оказываются конфигурации с низким порядком модуляции, прежде всего QPSK, а также режимы с менее плотной спектральной упаковкой. Для таких конфигураций допустимая область по длине маршрута оказывается существенно шире, поскольку сигнал сохраняет приемлемые значения BER даже

при значительном увеличении протяжённости линии. В то же время суперканалы, использующие 16QAM, 32QAM и 64QAM, демонстрируют более высокую чувствительность к увеличению длины маршрута: их качество деградирует быстрее, а максимально допустимая протяжённость для заданного QoT оказывается меньше (рис. 4.19).

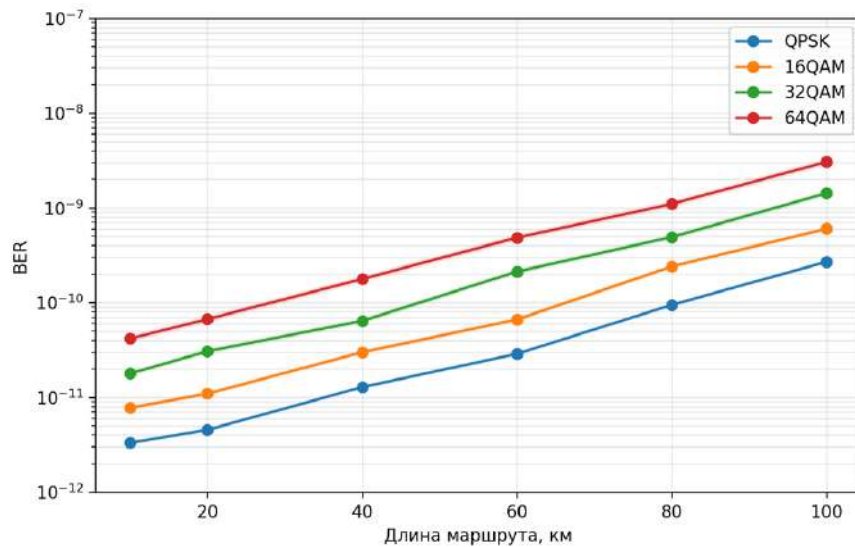


Рисунок 4.19 Зависимость BER от длины маршрута при разных форматах модуляции

Особое значение имеет влияние длины маршрута на различие между краевыми и центральными поднесущими. Если на коротких трассах деградация краевых поднесущих может оставаться умеренной, то при увеличении длины оптического тракта именно они чаще всего становятся лимитирующим фактором целостности суперканала. Это проявляется в том, что минимальный Q-factor и максимальный BER по поднесущим определяются, как правило, краевыми спектральными компонентами, тогда как среднее качество по всему суперканалу может ещё оставаться на приемлемом уровне. Следовательно, при оценке допустимости режима передачи по длинному маршруту нельзя опираться только на усреднённые показатели; необходимо учитывать качество наихудшей поднесущей.

Полученные результаты позволяют сформулировать важный вывод: допустимый режим передачи в адаптивном транспондере является функцией длины маршрута не только через выбор формата модуляции, но и через выбор структуры самого суперканала. Для коротких и средних трасс могут использоваться более высокие форматы модуляции и более плотная спектральная упаковка, что обеспечивает повышение спектральной эффективности. Для длинных маршрутов требуется переход к более устойчивым режимам: снижение порядка модуляции, увеличение межподнесущего шага, а в ряде случаев — уменьшение числа активных поднесущих в фиксированной полосе или расширение спектрального блока.

В ходе исследования установлено, что при увеличении длины маршрута область допустимых режимов сужается. Прежде всего из неё исключаются режимы с высокими

форматами модуляции и плотной спектральной упаковке. Затем критичными становятся конфигурации с большим числом поднесущих и узким межподнесущим шагом. В предельном случае допустимыми остаются только более устойчивые режимы, характеризующиеся относительно низкой спектральной эффективностью, но обеспечивающие устойчивую передачу по длинному тракту.

4.8. Анализ различий между краевыми и центральными поднесущими суперканала

При анализе суперканала как объекта адаптивного управления недостаточно рассматривать только усреднённые показатели качества передачи по всему спектральному блоку. Практика моделирования и экспериментальных исследований [79] показывает, что многонесущая структура деградирует по спектру неравномерно, а качество отдельных поднесущих может существенно различаться в зависимости от их положения внутри суперканала. Для OFDM-ориентированной архитектуры данное различие особенно важно, поскольку именно краевые спектральные компоненты оказываются наиболее чувствительными к аппаратным ограничениям частотно-селективного тракта транспондера [111, 112].

В диссертационной работе под центральными поднесущими понимаются спектральные компоненты, расположенные в средней части суперканала и испытывающие наименьшее влияние краевых фильтрационных эффектов. Под краевыми поднесущими понимаются спектральные компоненты, расположенные у границ спектрального блока и поэтому в наибольшей степени подверженные воздействию сужения полосы, частотной неравномерности AWGR и нарушению симметрии спектральной структуры.

Проведённое моделирование показало, что во всех исследованных режимах центральные поднесущие характеризуются более благоприятными значениями BER, EVM и Q-factor по сравнению с краевыми поднесущими (рис. 4.20).

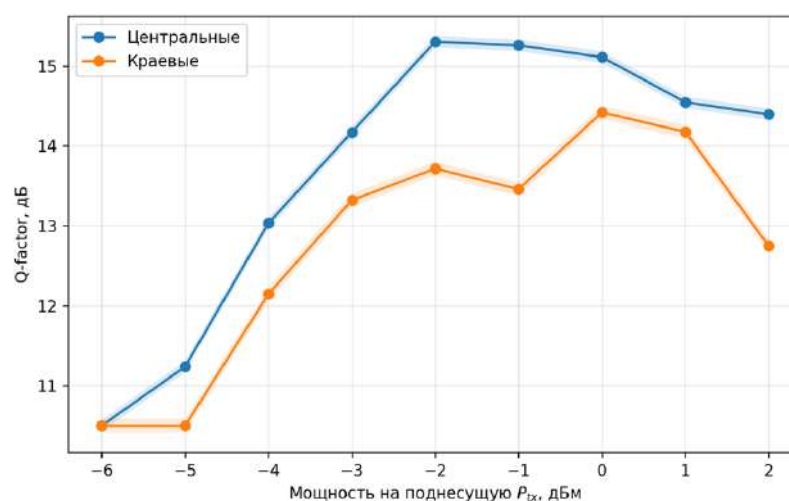


Рисунок 4.20 Сравнение Q-factor для центральных и краевых поднесущих

Данное различие усиливается при: увеличении числа активных поднесущих; уменьшении межподнесущего шага; повышении порядка модуляции; увеличении длины маршрута; усилении частотных ограничений в оптическом тракте.

Наиболее выраженным эффект является для конфигураций суперканала, когда суммарная полоса сигнала близка к границе эффективной полосы частотно-селективного компонента. В этом случае центральные поднесущие ещё сохраняют приемлемый запас по качеству, тогда как краевые уже демонстрируют рост BER и EVM (рис. 4.21, 4.22). Тем самым именно краевые компоненты начинают определять допустимость режима передачи.

С физической точки зрения указанная неравномерность обусловлена совокупностью нескольких факторов. Во-первых, частотно-селективный тракт, включающий AWGR, обладает неидеальной амплитудно-частотной характеристикой, вследствие чего поднесущие, расположенные ближе к краям рабочего диапазона, испытывают большее ослабление и искажение формы сигнала. Во-вторых, при уменьшении межподнесущего шага влияние соседних спектральных компонент на крайние поднесущие становится более заметным, так как они одновременно испытывают эффект ограниченной полосы и роста ICI. В-третьих, при высокой плотности модуляции даже сравнительно небольшие отклонения амплитуды и фазы приводят к существенному ухудшению характеристик созвездия именно на краях спектрального блока.

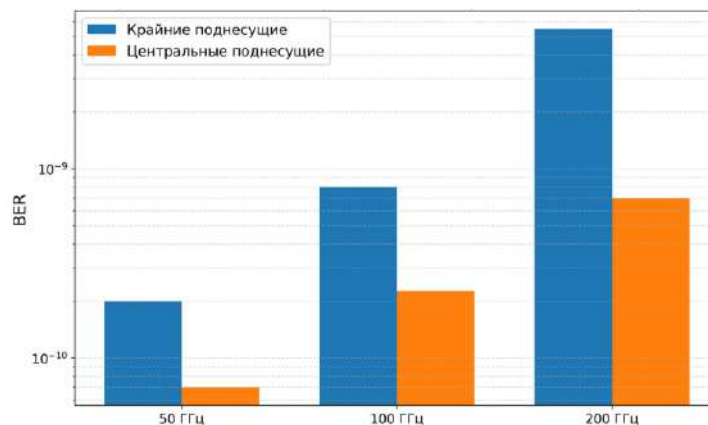


Рисунок 4.21 Сравнение BER для крайних и центральных поднесущих

Особо важно то, что различие между центральными и краевыми поднесущими не является второстепенным эффектом, который можно игнорировать при построении алгоритма управления. Напротив, в ряде случаев среднее значение BER или Q-factor по суперканалу может оставаться в пределах допустимого диапазона, тогда как одна или две краевые поднесущие уже выходят за пределы QoT-требований. Если решение о выборе режима принимается только по усреднённым метрикам, такая конфигурация будет ошибочно признана допустимой. В реальной сети это приведёт к нестабильной работе транспондера.

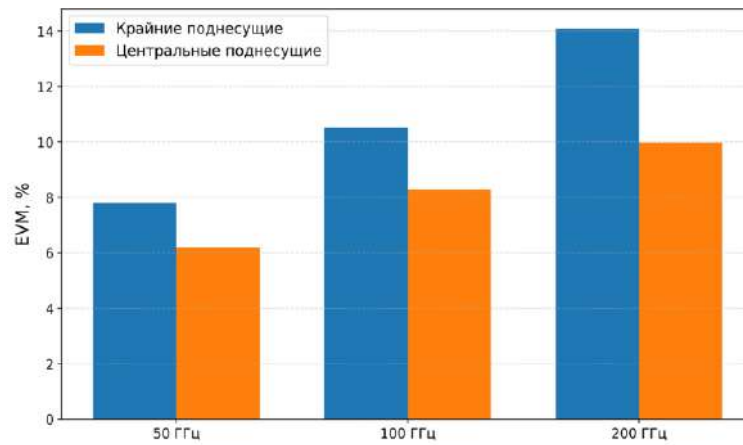


Рисунок 4.22 Сравнение EVM для крайних и центральных поднесущих

Полученные зависимости показывают, что качество передачи по поднесущим распределено неравномерно: наихудшие значения Q-factor и BER соответствуют крайним поднесущим суперканала, тогда как центральные поднесущие работают в более благоприятных условиях. Это связано с тем, что крайние спектральные компоненты сильнее подвержены влиянию скатов амплитудно-частотной характеристики AWGR, фильтрационному штрафу, неравномерности потерь по портам и остаточным межканальным помехам. При увеличении ширины суперканала и числа поднесущих различие между крайними и центральными поднесущими возрастает, что подтверждает необходимость оценки допустимости режима по худшей поднесущей, а не по усреднённым характеристикам.

Проведённый анализ позволяет сделать важный вывод для дальнейшей оптимизации режимов передачи адаптивного транспондера. Выбор числа поднесущих, межподнесущего шага и ширины спектрального блока должен выполняться с учётом того, что краевые поднесущие являются наиболее уязвимыми элементами суперканала. Следовательно, для OFDM-архитектуры критерий оптимальности не может опираться только на максимизацию суммарной пропускной способности. Он обязательно должен включать ограничение на допустимую краевую деградацию и на спектральную неравномерность качества передачи.

4.9. Влияние формата модуляции и числа активных поднесущих на область допустимых режимов

Следующим этапом исследования является анализ влияния формата модуляции и числа активных поднесущих на область допустимых режимов передачи адаптивного транспондера. Формат модуляции определяет плотность размещения информационных посылок в сигнальном созвездии и задаёт требования к допустимому уровню искажений и запасу по OSNR [113]. При переходе от QPSK к многоуровневым форматам 16QAM, 32QAM и 64QAM спектральная эффективность возрастает, однако одновременно уменьшается расстояние между соседними состояниями в сигнальном созвездии и повышается чувствительность к шумам, фильтрационным

искажениям, фазовым ошибкам и межканальным помехам. Поэтому рост порядка модуляции неизбежно приводит к сужению области допустимых режимов по всем остальным параметрам системы. В частности, конфигурация, остающаяся приемлемой по BER для QPSK, может оказаться недопустимой уже для 32QAM или 64QAM при тех же характеристиках оптического тракта. Такой вывод прямо поддерживается используемыми в модели пороговыми требованиями по OSNR для различных форматов модуляции.

В используемой модели рассматриваются форматы QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM и 64QAM, для которых приняты пороговые значения OSNR порядка 12, 14, 16, 20 и 24 дБ соответственно, а также дополнительный запас по качеству передачи около 1,5 дБ. Уже из этих исходных данных следует, что при переходе к более высокому порядку модуляции область допустимых режимов должна последовательно сужаться, поскольку одна и та же аппаратная конфигурация транспондера обеспечивает различный запас по качеству для разных форматов модуляции. На рисунке 4.23 приведена зависимость EVM от номера порта AWGR при различных форматах модуляции.

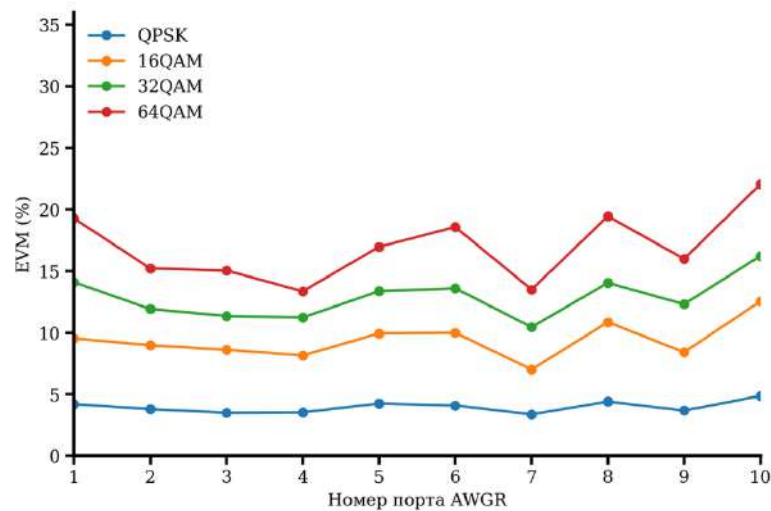


Рисунок 4.23 Зависимость EVM от номера порта AWGR при различных форматах модуляции

Наблюдается закономерный рост EVM при увеличении порядка модуляции, что обусловлено уменьшением минимального расстояния между точками сигнального созвездия и, как следствие, повышенной чувствительностью к шумам и интерференционным компонентам.

Анализ зависимостей EVM показывает, что увеличение числа поднесущих и расширение спектра суперканала сопровождаются ростом векторной ошибки модуляции для всех рассмотренных форматов сигнала (рис. 4.24). Наименьшие значения EVM соответствуют режиму QPSK, тогда как для 16QAM, 32QAM и особенно 64QAM наблюдается более выраженное ухудшение качества. Это связано с ростом чувствительности высоких порядков модуляции к фильтрационным искажениям, неравномерности характеристик AWGR, межканальным помехам

и снижению энергетического запаса на крайних поднесущих. Полученные зависимости подтверждают, что EVM может использоваться как дополнительный индикатор границы между допустимыми, предельными и недопустимыми режимами работы адаптивного транспондера.

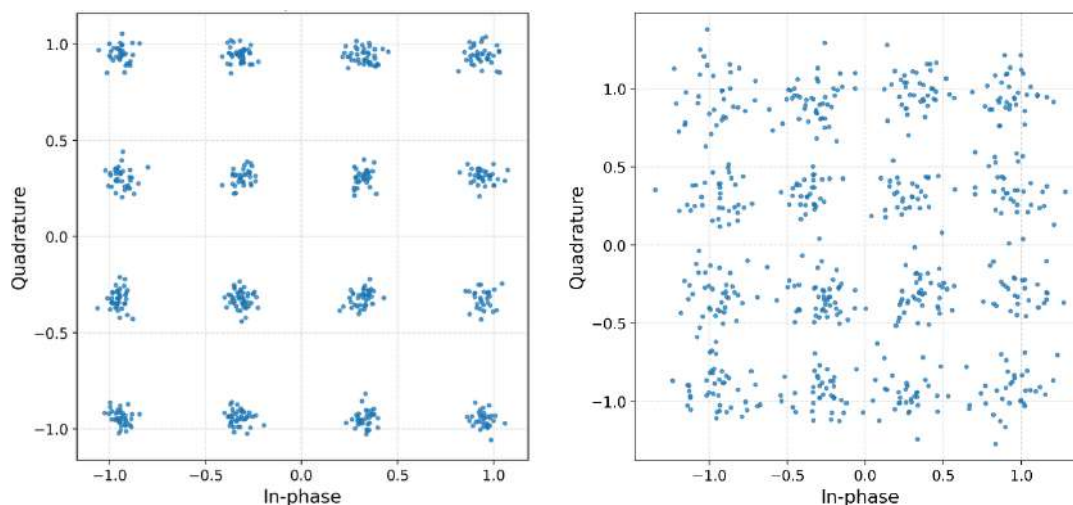


Рисунок 4.24 Сигнальные созвездия 16QAM при разном количестве поднесущих

Для верификации QoT-порогов, используемых в алгоритмах адаптивного управления, анализируется зависимость BER от OSNR для нескольких форматов модуляции (рис. 4.25). Переход от низких порядков модуляции к более высоким сопровождается ростом требуемого OSNR для достижения заданного уровня BER, что согласуется с принципами когерентных оптических систем и обосновывает необходимость адаптации формата модуляции в зависимости от состояния канала.

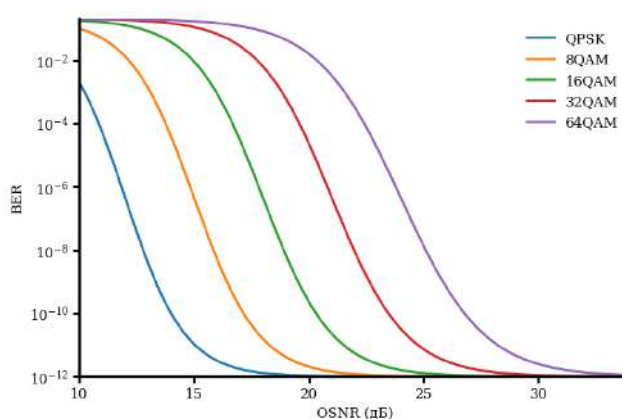


Рисунок 4.25 Зависимость BER от OSNR для разных форматов модуляции

Для количественной оценки включения AWGR-блока в архитектуру адаптивного транспондера построена зависимость BER от OSNR в двух сценариях: без AWGR и с AWGR (рис. 4.26). Наблюдаемый эквивалентный штраф по OSNR отражает совокупное влияние фильтрации и межканальных утечек, а также энергетических потерь. Выявлено, что интеграция AWGR в состав адаптивного транспондера вносит эквивалентный штраф порядка 1,6 дБ по OSNR для

высокоуровневых форматов модуляции (64QAM), что формирует жесткие границы области допустимых режимов. Данный результат необходим для корректной настройки запаса по качеству передачи и для предотвращения работы системы в режиме, близком к границе допустимости.

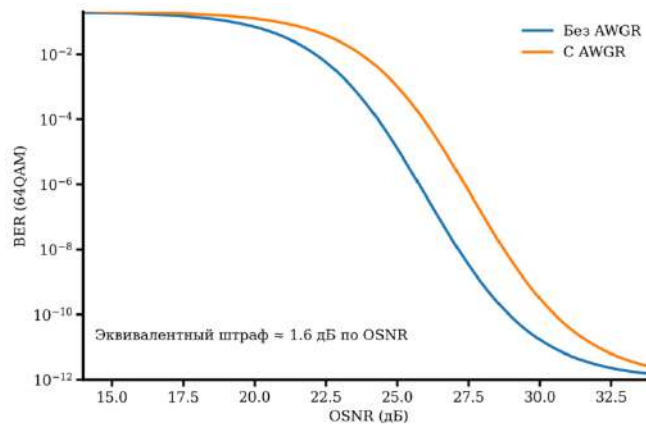


Рисунок 4.26 Зависимость BER от OSNR при наличии и отсутствии AWGR

Число активных поднесущих оказывает влияние на качество передачи иначе. Его рост, с одной стороны, увеличивает суммарную ёмкость формируемого суперканала и позволяет эффективнее использовать спектральный ресурс. С другой стороны, расширяется занимаемая полоса суперканала, усиливается влияние неравномерности АЧХ AWGR и потерь по портам, а также возрастает вероятность того, что крайние поднесущие окажутся в наименее благоприятных условиях. Кроме того, при увеличении числа поднесущих повышаются требования к равномерности распределения мощности, точности эквализации и устойчивости всей конфигурации транспондера к межканальным перекрёстным помехам и фильтрационным искажениям. Именно поэтому параметр числа поднесущих должен рассматриваться не только как средство масштабирования пропускной способности, но и как фактор, непосредственно изменяющий количество допустимых режимов.

В модели предусмотрено изменение этого параметра в диапазоне от 2 до 10, что соответствует управлению ёмкостью и суммарной шириной спектра суперканала. При увеличении числа поднесущих возрастает суммарная занимаемая полоса, усложняются требования к равномерности амплитудного распределения по линиям гребёнки, усиливается влияние неравномерности спектра, а также возрастает чувствительность к разбросу параметров каналов AWGR. В частности, при числе используемых линий до 10 и остаточной неравномерности спектра после эквализации до 1 дБ допустимость режима начинает в большей степени определяться худшей поднесущей, а не средним качеством суперканала.

При малом числе активных поднесущих суперканал занимает меньший спектральный блок и оказывается менее чувствительным к неоднородности АЧХ AWGR, поэтому область

допустимых режимов оказывается шире. По мере увеличения числа поднесущих растёт вероятность того, что крайние спектральные компоненты будут передаваться в менее благоприятных условиях: часть из них приближается к скатам АЧХ AWGR, а часть оказывается на портах с худшими потерями и меньшим запасом по OSNR. В результате при фиксированном формате модуляции существует предельное число поднесущих, начиная с которого режим становится недопустимым по критерию BER (рис. 4.27). Тем самым число поднесущих выступает не только параметром масштабирования пропускной способности, но и самостоятельным QoT-ограничением.

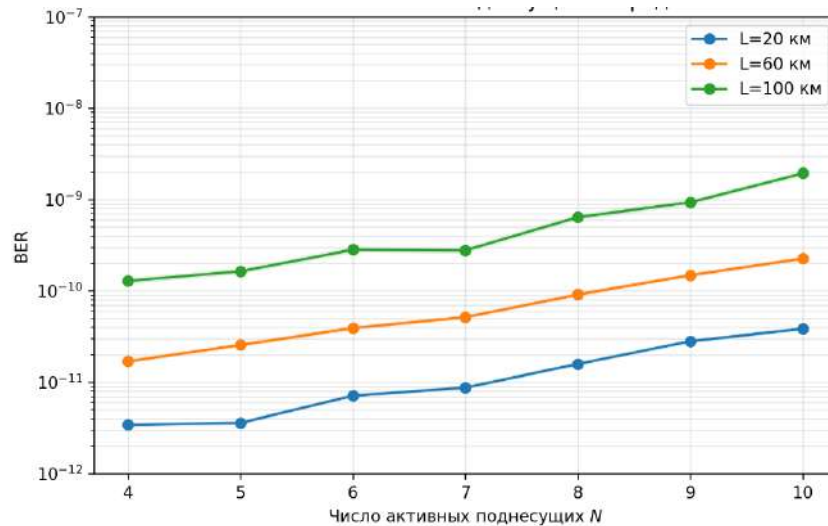


Рисунок 4.27 Зависимость BER от количества поднесущих

С точки зрения BER установлено, что увеличение числа поднесущих не даёт линейного улучшения или ухудшения качества передачи, а формирует компромиссную зависимость. При сравнительно небольшом числе поднесущих суперканал обладает более устойчивой структурой, так как каждая поднесущая располагается в более благоприятных условиях с точки зрения частотного разнесения и меньшей чувствительности к нарушению ортогональности. Однако в этом случае спектральный ресурс используется менее гибко, а требуемый битрейт иногда приходится обеспечивать за счёт более высоких форматов модуляции или расширения занимаемой полосы.

Аналогичный характер зависимости наблюдается и для EVM. При умеренном числе поднесущих и достаточном межподнесущем шаге векторная ошибка модуляции сохраняется в допустимых пределах, что свидетельствует о приемлемом качестве формирования и разделения многонесущего сигнала. Однако при переходе к более плотным конфигурациям наблюдается рост EVM, особенно для тех режимов, в которых плотность упаковки становится сопоставимой с полосовыми ограничениями электрического и оптического трактов. Это означает, что

суперканал начинает испытывать не только шумовое, но и структурное ухудшение, связанное с искажением взаимного расположения поднесущих.

Важным результатом исследования является вывод о том, что число поднесущих не может рассматриваться как параметр, который всегда желательно увеличивать для повышения гибкости суперканала. Напротив, при каждом конкретном сочетании длины маршрута, мощности передачи, формата модуляции и параметров частотно-селективного тракта существует оптимальный диапазон значений активного количества поднесущих, обеспечивающий компромисс между пропускной способностью, спектральной эффективностью и устойчивостью многонесущей передачи.

Таблица 4.3 Классификация режимов передачи транспондера

Класс режима	Условия	Физический смысл	Условия выбора
Помехоустойчивый	Большой запас по QoT, низкая чувствительность к температурным дрейфам; обычно низкоэффективная модуляция и/или меньше поднесущих, большие защитные интервалы	Режим устойчив к фильтрации AWGR, неравномерности по спектру, дрейфам частоты, вариациям OSNR и ошибкам настройки	Для восстановления после деградации/аварии, для низкокачественных трактов, для быстрых переключений, когда важнее стабильность чем эффективность
Рациональный	Удовлетворяет всем критериям допустимости и даёт лучший компромисс между высокой спектральной эффективностью при достаточном запасе по QoT	Рабочая область: режим максимально эффективен при сохранении целостности суперканала и допустимого BER	Основной выбор для эксплуатации, обеспечивает требуемую скорость при минимально необходимом спектре и приемлемом запасе по QoT
Предельный	Формально допустим, но запас по QoT минимален, высокая неравномерность по поднесущим; сильная краевая деградация, высокие требования к точности настройки	Работает на грани: малое изменение OSNR/фильтра/частоты/мощности может перевести режим в недопустимый	Использовать только при жёстком дефиците спектральных ресурсов или как временный режим, требует мониторинга и готовности к реконфигурации
Недопустимый	Нарушает хотя бы один критерий QoT, не проходит аппаратные ограничения или не помещается в спектральный блок	Либо QoT недостаточно, либо нарушена ортогональность/целостность суперканала, либо режим физически/спектрально нереализуем	Исключается из области допустимых; используется только как запрещённая зона при построении карт и при работе алгоритма выбора режима передачи

Наибольший интерес представляет совместный анализ двух параметров — формата модуляции и числа активных поднесущих. Для низких порядков модуляции увеличение числа

поднесущих может ещё не приводить к немедленной потере допустимости, поскольку система сохраняет достаточный запас по QoT. Для высоких порядков модуляции даже умеренное увеличение числа поднесущих способно перевести режим в область недопустимых из-за суммарного действия фильтрационного штрафа, разброса потерь и повышенных требований к OSNR. Следовательно, допустимость конфигурации должна определяться не отдельно по каждому параметру, а по их сочетанию.

С практической точки зрения это позволяет выделить три типовых класса режимов. К первому относятся устойчивые режимы с низким порядком модуляции и умеренным числом поднесущих, обладающие максимальным запасом по QoT, но меньшей спектральной эффективностью. Ко второму относятся рациональные режимы, обеспечивающие компромисс между ёмкостью канала и качеством передачи (именно они должны формировать область предпочтительных решений). К третьему относятся предельные режимы с высоким порядком модуляции и большим числом поднесущих, которые дают максимальную спектральную эффективность, но обладают минимальным запасом по качеству и потому наиболее чувствительны к аппаратным ограничениям транспондера. Выделение таких классов создаёт основу для последующего построения карт допустимых режимов и выбора оптимальной конфигурации транспондера.

4.10. Построение области допустимых и рациональных режимов передачи транспондера

Результаты, полученные в предыдущих разделах, позволяют перейти от анализа отдельных зависимостей BER, EVM, Q-factor и характеристик спектральной структуры суперканала к более общей задаче — построению области допустимых и рациональных режимов передачи. Если в разделах 4.5 – 4.9 были исследованы частные эффекты, связанные с изменением ширины суперканала, числа поднесущих, мощности передачи, длины маршрута и неравномерности качества по спектру, то в настоящем разделе эти результаты объединяются в единую систему критериев, позволяющую определить, какие конфигурации транспондера являются допустимыми, какие — рациональными, а какие должны быть исключены из дальнейшего рассмотрения.

В контексте диссертации под допустимым режимом понимается такая конфигурация транспондера, которая обеспечивает передачу с требуемым качеством на заданном оптическом тракте и при этом удовлетворяет аппаратным ограничениям устройства. Под рациональным режимом понимается допустимая конфигурация, которая, помимо выполнения пороговых требований по QoT, обеспечивает эффективное использование спектрального ресурса, достаточный запас по качеству передачи и устойчивость к изменениям параметров тракта. Следовательно, рациональная область является подмножеством области допустимых режимов.

Для построения области допустимых режимов необходимо ввести набор критериев, характеризующих не только сам факт работоспособности режима, но и степень его близости к границе недопустимости. В качестве базовых показателей используются BER, EVM, Q-factor и OSNR.

Одним из удобных способов интерпретации качества передачи является введение штрафов по QoT. В рамках настоящей работы под штрафом по QoT понимается ухудшение показателя качества передачи относительно номинального или эталонного режима. В зависимости от выбранной метрики такие штрафы могут описывать:

- увеличение BER по сравнению с базовой конфигурацией;
- снижение Q-factor;
- рост EVM;
- уменьшение запаса по OSNR;
- ухудшение состояния крайних поднесущих по отношению к центральным.

Наиболее существенными для рассматриваемой архитектуры являются:

1. искажения, обусловленные фильтрацией и связанные с ограниченной полосой AWGR и частотно-селективных элементов;
2. штраф за краевую деградацию, отражающий различие между центральными и крайними поднесущими;
3. штраф за уплотнение спектра, обусловленный ростом межподнесущей интерференции при увеличении числа поднесущих или уменьшении межподнесущего расстояния;
4. энергетический штраф, связанный с отклонением режима передачи от оптимальной области по мощности.

Использование штрафов по QoT позволяет перейти от чисто порогового подхода к более содержательной оценке устойчивости режима.

Вторым обязательным элементом являются пороговые требования по OSNR для различных форматов модуляции. Формат модуляции не может выбираться независимо от условий тракта, поскольку с ростом порядка модуляции возрастает требование к качеству сигнала и к энергетическому запасу. Поэтому для каждого формата модуляции M задаётся собственный порог $OSNR_{th}(M)$. Это означает, что режим с более высокой спектральной эффективностью может быть выбран только при условии, что текущий OSNR оптического тракта находится выше соответствующего порогового уровня. Иначе такой режим должен быть исключён из области допустимых конфигураций независимо от его потенциальной пропускной способности.

Для практического выбора рациональной конфигурации одного лишь бинарного признака «допустим/недопустим» недостаточно. Необходимо также различать режимы, которые работают с большим запасом, и режимы, находящиеся в непосредственной близости к границе недопустимости. Для этого вводится понятие риска QoT или, в более инженерной интерпретации, запаса по допустимости режима.

В рамках настоящей работы риск режима определяется близостью его параметров к граничным условиям по BER и OSNR. Если фактический BER приближается к пороговому значению, а текущий OSNR лишь незначительно превышает минимально допустимый уровень для выбранной модуляции, то такой режим должен рассматриваться как предельный. Напротив, если BER существенно лучше порога, а OSNR имеет достаточный запас, режим можно считать устойчивым.

Содержательно риск QoT позволяет:

- отделять устойчивые режимы от пограничных;
- учитывать не только текущее качество, но и вероятность выхода режима из допустимой области при небольших изменениях параметров тракта;
- ранжировать допустимые конфигурации по степени надёжности.

Особенно важно это для широких суперканалов, в которых среднее качество передачи может выглядеть приемлемым, тогда как краевые поднесущие уже работают на пределе допустимости. В этом случае использование только средней QoT-метрики приводит к завышенной оценке качества режима, тогда как введение риска или запаса по допустимости позволяет более корректно учесть неоднородность суперканала.

Во второй главе диссертации допустимый режим определяется выполнением ограничений по качеству передачи и аппаратным возможностям устройства, а оптимальный режим — выбором лучшей конфигурации внутри множества допустимых решений по критериям спектральной эффективности и запасу по качеству передачи.

Введём множество допустимых режимов в виде

$$\Omega_{adm} = \{\mathbf{x}: BER(\mathbf{x}) \leq BER_{thr}\}, \quad (4.5)$$

где $\mathbf{x}$ — вектор параметров режима, включающий полосу канала AWGR, электрическую полосу, формат модуляции, число активных поднесущих, мощность сигнала. Эквивалентно допустимость может быть задана через порог по Q-factor или через выполнение OSNR-условия с учётом требуемого запаса по качеству. В практическом смысле область допустимых режимов должна строиться по результатам параметрического моделирования как совокупность всех конфигураций, для которых качество передачи удовлетворяет требованиям не в среднем по системе, а для всей рассматриваемой конфигурации транспондера.

Таблица 4.4 Критерии допустимости режима передачи

Метрика	Порог	Физический смысл	Использование
BER	$\leq BER_{th}$	Гарантирует, что худшая поднесущая остаётся декодируемой	Основной фильтр допустимости режима
Q-factor	$\geq Q_{th}$	Интегральная оценка качества канала	Быстрый отсев плохих конфигураций, контроль при сравнении режимов одинакового BER
EVM	$\leq EVM_{th}$	Отражает амплитудно-фазовые искажения. Показывает деградацию сигнальных созвездий.	Проверка корректности формирования и приёма сигнала
OSNR	$\geq OSNR_{th}(M)$	Условие энергетической достаточности для выбранной модуляции. Порог зависит от выбранного формата модуляции	Предварительная фильтрация кандидатов по формату модуляции
ICI	$\leq ICI_{th}$	Фиксирует нарушение ортогональности и рост взаимного влияния поднесущих	Отсев режимов с чрезмерным уплотнением и деградацией ортогональности, особенно для широких спектральных блоков
Спектральная совместимость	$B_{sc} \leq B_{avail}$	Режим должен помещаться в доступный спектральный блок	Фильтр перед оценкой QoT

Конфигурация считается допустимой, если одновременно выполняются следующие условия:

- прогнозируемое значение BER не превышает допустимого порога;
- Q-factor не опускается ниже минимального допустимого уровня;
- OSNR не ниже порога для выбранного формата модуляции;
- режим реализуем аппаратно и помещается в доступный спектральный блок.

С инженерной точки зрения граница области допустимых режимов определяется множеством конфигураций, для которых хотя бы один из перечисленных критериев становится предельным. Именно поэтому область допустимости не может быть описана одним числом или одной линейной зависимостью. Она представляет собой область в пространстве параметров транспондера, форма которой определяется совместным действием физических, аппаратных и сигнальных ограничений.

Содержательно область допустимых режимов может быть представлена в виде набора двумерных и трёхмерных сечений многомерного пространства параметров. Наиболее показательной для рассматриваемой архитектуры является график зависимости BER и EVM от ширины суперканала и количества поднесущих, построенные отдельно для различных

параметров транспондера (рис. 4.28 и 4.29). Такие графики позволяют выделить область недоиспользования спектрального ресурса, где QoT высок, но спектральная эффективность невелика, область рационального согласования, где достигается наилучший компромисс между качеством передачи и использованием полосы и область недопустимых режимов, где потери и межканальные перекрёстные помехи приводят к превышению допустимого BER.

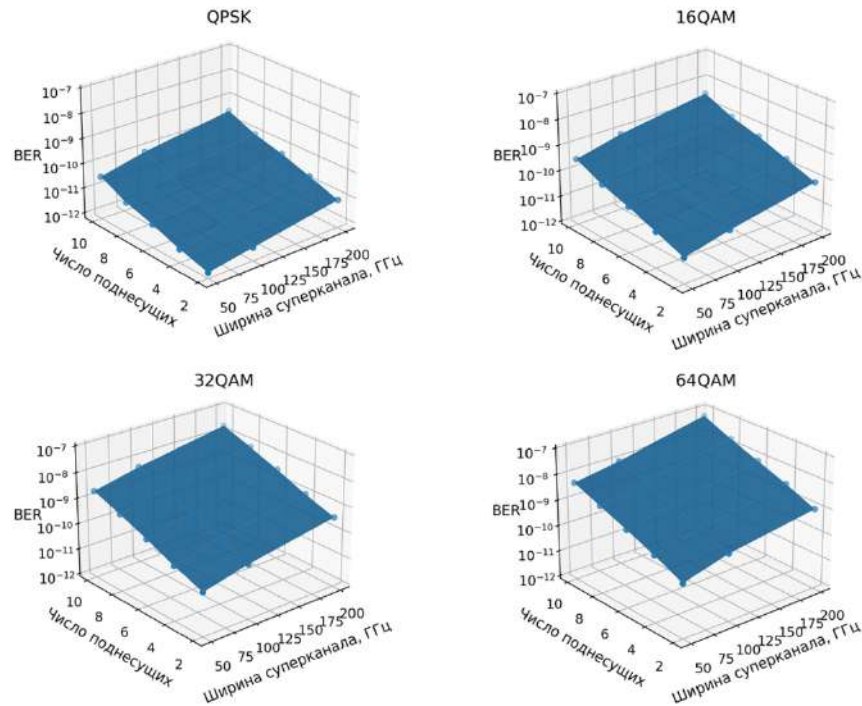


Рисунок 4.28 Зависимость BER от ширины суперканала и числа поднесущих

Аналогично может быть построено сечение, в котором отображается зависимость допустимости от числа поднесущих и формата модуляции (рис. 4.29). Основание для выбора именно таких сечений уже содержится в перечне основных параметров модели и в постановке задачи исследования.

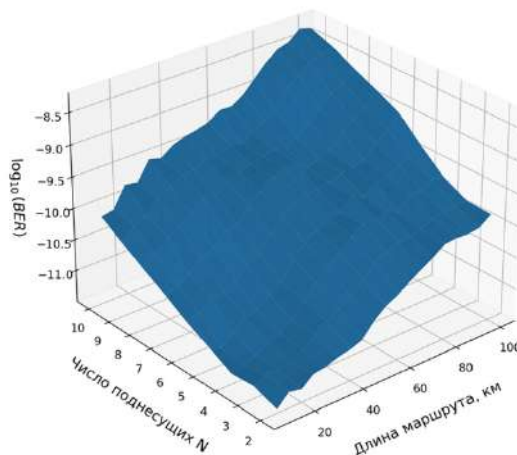


Рисунок 4.29 Зависимость BER от длины маршрута и числа поднесущих

Принципиально важным является то, что граница области допустимых режимов определяется не средними характеристиками AWGR, а худшим портом или худшей поднесущей в составе суперканала. Даже при удовлетворительном среднем уровне QoT одна крайняя поднесущая может выйти за допустимый порог вследствие сочетания большей фильтрации, повышенных потерь и меньшего энергетического запаса. Поэтому критерий допустимости следует формулировать в такой форме: конфигурация считается допустимой только в том случае, если порог QoT выполняется для всех поднесущих, входящих в выбранный суперканал. Такой критерий делает область допустимых режимов более узкой, но одновременно обеспечивает её инженерную состоятельность и пригодность для дальнейшего применения в алгоритме интеллектуальной реконфигурации. Его необходимость прямо вытекает из учтённых в модели параметров неравномерности по портам и остаточной неравномерности спектра.

На рис. 4.30 и 4.31 представлена зависимость BER от мощности передатчика и числа активных поднесущих и зависимость BER от мощности передатчика и ширины суперканала соответственно. Полученная поверхность показывает, что допустимость режима передачи определяется совместным влиянием энергетического запаса и спектральной структуры суперканала. При увеличении мощности передатчика значение BER, как правило, уменьшается, и с ростом числа активных поднесущих конфигурация становится более чувствительной к неравномерности спектра, влиянию AWGR и деградации крайних поднесущих. Следовательно, мощность передатчика не может рассматриваться изолированно, а должна выбираться совместно с числом активных поднесущих и шириной суперканала при формировании допустимого режима передачи.

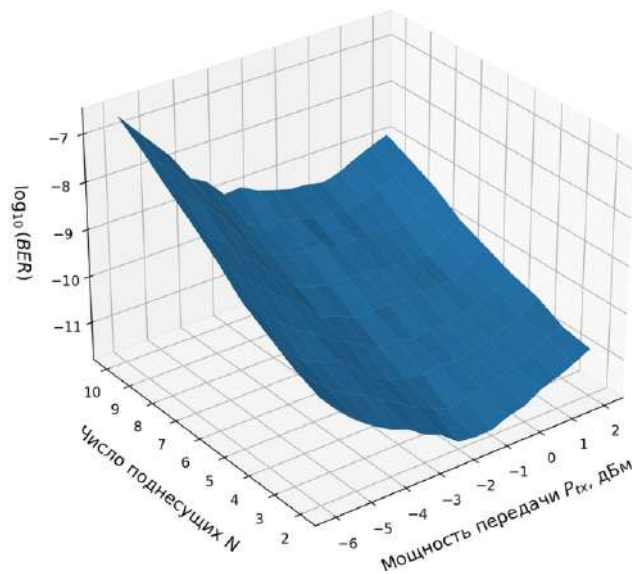


Рисунок 4.30 Зависимость BER от мощности передатчика и числа поднесущих

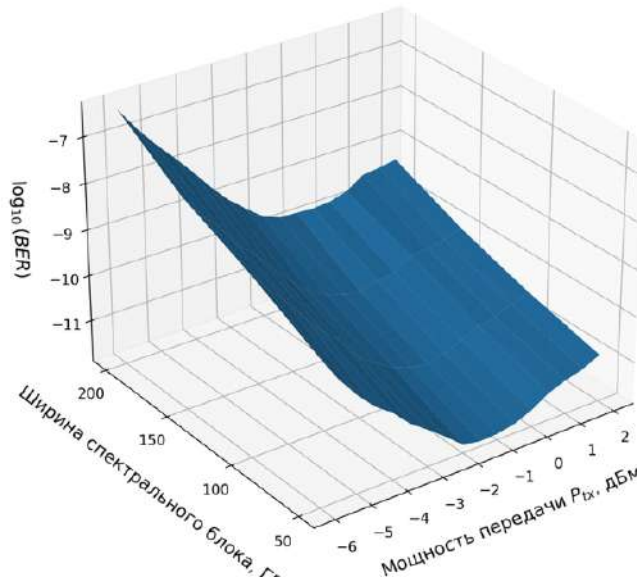


Рисунок 4.31 Зависимость BER от мощности передатчика и ширины спектрального блока

После выделения множества допустимых режимов внутри него должно быть определено подмножество оптимальных режимов. Оно формируется на основе интегрального критерия, включающего спектральную эффективность и запас по качеству передачи. С практической точки зрения это означает следующее: если для заданного оптического тракта и текущего состояния оборудования существует несколько допустимых конфигураций, то предпочтение должно отдаваться не просто наиболее устойчивой конфигурации, а той, которая обеспечивает максимальную полезную ёмкость или спектральную эффективность при сохранении достаточного запаса по QoT и приемлемой цены переключения режима. Тем самым результирующая методика выбора режима опирается одновременно на модели второй главы и количественные зависимости, полученные в четвертой главе.

Для практической реализации результатов целесообразно представить область допустимых и оптимальных режимов в виде таблицы или карты решений, где каждой комбинации параметров соответствует один из трёх статусов: режим недопустим, режим допустим и режим предпочтителен. Такая форма представления удобна для последующего использования в контуре T-SDN управления, поскольку позволяет быстро переходить от наблюдаемых QoT-метрик и аппаратных ограничений к выбору новой конфигурации транспондера без полного повторного перебора всех параметров в реальном времени (рис. 4.32).

По результатам исследования можно сделать следующий вывод. Область оптимальных режимов всегда уже области допустимых режимов (не каждый рабочий режим является рациональным). Это положение имеет принципиальное значение для последующей главы 5, где будет решаться обратная задача конфигурирования транспондера по параметрам тракта. Область допустимых и оптимальных режимов, построенная по результатам параметрического

моделирования, в дальнейшем станет основой для алгоритма выбора рациональной конфигурации адаптивного оптического транспондера на стороне T-SDN-контроллера. Таким образом, результаты текущего раздела формируют переход от анализа физических и аппаратных ограничений к практической задаче конфигурирования устройства.

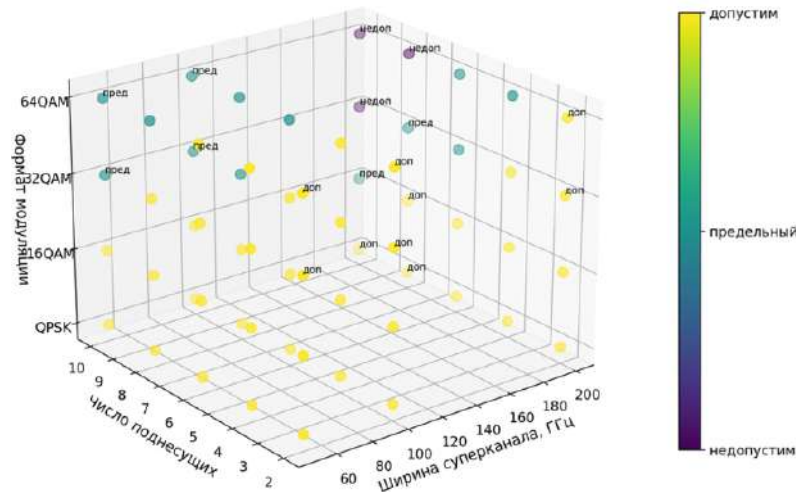


Рисунок 4.32 3D график допустимых режимов передачи транспондера

4.11. Сравнение с промышленными транспондерами

Современные промышленные оптические транспондеры, такие как решения Nokia Photonic Service Engine V, широко используют технологию вероятностного формирования созвездий (Probabilistic Constellation Shaping, PCS) для непрерывной адаптации скорости передачи данных. Это обеспечивает более точную адаптацию скорости передачи и повышение спектральной эффективности по сравнению с равновероятным использованием точек в стандартных QAM-созвездиях. В рамках данного диссертационного исследования технология PCS не рассматривается в качестве альтернативы или дополнения к предложенному подходу на базе ортогональных оптических поднесущих с фиксированными QAM-созвездиями. Это сужает область применимости прямого сравнения с такими решениями.

Семейство Nokia Photonic Service Engine V (PSE-V) представляет промышленную реализацию когерентных транспондеров, ориентированных на высокую спектральную эффективность, дальность и гибкость конфигурации за счёт использования DSP. В рамках PSE-V выделяются два характерных класса решений: PSE-Vs (Super-Coherent) и PSE-Vc (Compact). PSE-Vs работает на скоростях порядка 90 Гбод и включает PCS 2-го поколения, непрерывную регулировку скорости передачи данных и высокоэффективный FEC. PSE-Vc предназначен для более компактных и энергоэффективных модулей и pluggable-форм-факторов, поддерживает 60–69 Гбод, высокие порядки модуляции (в т.ч. 16QAM) и, по данным производителя, позволяет масштабироваться до 400 Гбит/с на длину волны на сотни километров.

С практической точки зрения PSE-V демонстрирует подход, где физическая адаптация достигается средствами встроенного DSP (формат модуляции, скорость передачи, FEC, PCS), а выбор конкретного профиля выполняется либо системой управления производителя, либо внешним контроллером через поддерживаемые интерфейсы (в т.ч. для pluggables у PSE-Vc заявлена совместимость с OIF 400ZR/OpenZR+/OpenROADM).

Промышленные оптические транспондеры линейки Huawei OptiX представляют собой решения на базе когерентной оптико-электрической технологии WDM, в том числе для сетей связи дата-центров (DCI). Сетевой контур управления в них реализован через платформу iMaster NCE-T, которая обеспечивает визуализацию ресурсов, автоматическое предоставление сервисов и автоматизированное обслуживание (O&M). Перестройка режимов передачи и гранулярность адаптации достигаются за счет выбора нужного профиля из поддерживаемых, конфигурации интерфейсов и работы встроенных механизмов автоматизированного предоставления ресурсов. Качество передачи поддерживается средствами когерентной обработки и мониторинга в процессе эксплуатации, при этом аппаратные особенности учитываются на уровне самой промышленной платформы, а не через формирование явного множества допустимых режимов. Стоит отметить, что в условиях динамического трафика транспондеры Huawei OptiX (как и ряд других существующих промышленных решений) часто не обладают достаточной гибкостью и скоростью реакции, чтобы в реальном времени адаптировать такие физические параметры, как формат модуляции, число поднесущих и полоса пропускания сигнала.

Для более детальной и предметной оценки целесообразно провести сопоставление предложенной архитектуры с передовым отечественным DWDM оборудованием компании ООО «Т8» платформой «Волга», в частности с высокоскоростными агрегирующими транспондерами M800 и M1200.

Блок агрегатора Т8 М800-1-8Q обеспечивает передачу до 800 Гбит/с на одной длине волны, а блок М1200-2-12Q поддерживает передачу до 1200 Гбит/с (2×600 Гбит/с на двух линейных интерфейсах). В диссертации моделируется суперканал суммарной скоростью до 800 Гбит/с, что совпадает по верхней границе с блоком М800. Однако достижение этой скорости реализуется принципиально иным способом: за счет мультиплексирования 10 оптических поднесущих, работающих на скорости 25 ГБод каждая, в то время как в решениях компании «Т8» используется передача на одной несущей.

Транспондер-мультиплексор серии М1200 поддерживают форматы DP-QPSK, DP-16QAM, DP-32QAM, DP-64QAM, а также промежуточные форматы (Fractional QAM) с нецелым значением спектральной эффективности, что позволяет гибко улучшать OSNR для частных сценариев. В диссертации рассматривается пересекающийся базовый набор форматов модуляции (QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM), но без использования Fractional QAM и PCS. При этом

линейный интерфейс T8 оперирует символьными скоростями 69–72 ГБод (для M1200) и 85–95 ГБод (для M800). Разница в символьной скорости в 3–4 раза (25 ГБод на поднесущую в диссертации) означает использование совершенно другого класса DSP-процессоров и формирует иные требования к полосе пропускания электрического тракта модуляторов.

Пороговые значения OSNR в промышленных транспондерах T8 существенно оптимизированы. Так, для блока M1200 в режиме $2 \times 100\text{G}$ (P-DP-QPSK) с использованием SD-FEC (избыточность 27 %) пороговый OSNR составляет 9,91 дБ. Для $2 \times 400\text{G}$ (DP-16QAM) этот показатель равен 20,19 дБ, а для $2 \times 600\text{G}$ — 29,75 дБ. В моделируемом в диссертации транспондере пороги OSNR заданы как 12/14/16/20/24 дБ для соответствующих форматов модуляции. Завышение порогов (например, 12 дБ против 9,91 дБ для QPSK) может объясняться применением в модели менее эффективного FEC, так как в диссертации не используется конкретный тип SD-FEC с избыточностью 27 %, применяемый в оборудовании компании «Т8».

Транспондеры компании «Т8» ориентированы на работу в магистральных сетях. Блок M1200 на скорости $2 \times 100\text{G}$ (DP-QPSK) имеет диапазон автоматической коррекции дисперсии до $\pm 320\,000$ пс/нм, что эквивалентно огромным дистанциям по волокну SMF-28 (до 18 000 км). На скорости $2 \times 600\text{G}$ коррекция составляет ± 10 нс/нм (~ 600 км). Модель, представленная в диссертации, ориентирована преимущественно на оптические тракты городских и региональных сетей протяженностью до 100 км. В реальных сетях на таких дистанциях чаще применяются компактные решения компании «Т8», например блоки агрегаторов MD200 или MD400 со сменными модулями CFP2.

Оборудование T8 M1200 поддерживает работу в сетках частот 50 ГГц, 100 ГГц, а также в гибкой сетке FlexGrid с шагом 6,25 ГГц. Блок M800 работает в сетке 100 ГГц (Flattop AWG) или 125 ГГц (FlexGrid при 95 ГБод). В диссертации моделируется гибкая сетка с шагом 25 ГГц и суперканалы шириной 50–250 ГГц. Хотя FlexGrid-совместимость присутствует в обоих случаях, реализация различается: у T8 ширина канала определяется бодрейтом одной несущей, а в диссертации — суммарным числом используемых поднесущих.

В части сетевого управления T8 использует централизованные системы NMS «Титан» и «Фрактал» с поддержкой протоколов NETCONF/YANG, обеспечивающие автоматический расчет маршрутов, создание сервисов через ROADM и мониторинг качества передачи (BER, OSNR). Реконфигурация режимов передачи на том же M1200 осуществляется программной сменой профиля DSP (смена формата модуляции, скорости, FEC). В диссертационном исследовании контур управления также интегрирован в T-SDN контроллер, использующий ML-предиктор QoT. Однако он оперирует иным пространством параметров (оптическая реконфигурация числа поднесущих, формата модуляции, мощности передачи), а не только профильной DSP-реконфигурацией одной несущей.

Научно-исследовательский центр компании «Т8» в 2018 году разработал собственные компоненты: модулятор 40 Гбит/с на LiNbO_3 и модуль MUX/DEMUX AAWG, а в 2024 году продемонстрировал узкополосные лазеры. Хотя компания производит технологически аналогичный компонент (AAWG), он применяется в качестве пассивного мультиплексора/демультиплексора на 40 или 48 каналов (с шагом 100 ГГц) на уровне всего оптического тракта. В предложенной же диссертационной архитектуре элемент AWGR встроен непосредственно внутрь транспондера для оптического формирования суперканала из набора ортогональных поднесущих.

Проведенный анализ показывает, что архитектура исследуемого в диссертации транспондера принципиально отличается от концепции, реализуемой в высокоскоростных промышленных решениях «Волга» компании «Т8». Транспондер на базе 10 поднесущих по 25 ГБод и промышленный блок на 95 ГБод с одной несущей — это разные классы устройств. Следовательно, корректнее позиционировать данную работу не как прямую альтернативу решениям компании «Т8», а как фундаментальное исследование концепции OFDM-суперканального оптического транспондера. Подобная архитектура может эффективно дополнить существующие профильные DSP-подходы в тех сценариях гибких оптических сетей (например, в сегменте metro), где требуется более гранулярное оптическое управление спектром каналов в условиях жестких ограничений оптической полосы пропускания компонентов.

Сравнение в таблице 4.5 выполнено не для позиционирования разработанной архитектуры как прямой альтернативы промышленным решениям, а для выявления конструктивных различий, определяющих область применимости каждого подхода. Промышленные транспондеры ориентированы на максимальную скорость одиночной несущей (до 95 ГБод) с адаптацией через DSP, тогда как исследуемая архитектура ориентирована на оптическое формирование суперканала с дискретной адаптацией через число поднесущих. Оба подхода дополняют друг друга: DSP-подход эффективен при наличии элементной базы, а OFDM-суперканальный подход — в сценариях с ограниченной полосой компонентов и высокими требованиями к гранулярности спектрального управления.

Таблица 4.5 Сравнение промышленных транспондеров с исследуемой архитектурой

Параметр сравнения	Nokia PSE-Vs	Huawei OptiX	Т8 «Волга»	Разработанный подход
Формирование сигнала	Высокоскоростной когерентный DSP, Nyquist-фильтрация, PCS, адаптация скорости передачи	Когерентная оптико-электрическая WDM, DCI	Одна высокоскоростная несущая, высокоскоростной когерентный DSP	OFDM-суперканал как набор оптических поднесущих, мультиплексирование на AWGR
Гранулярность и адаптация	Непрерывная регулировка	Профильная адаптация по поддерживаемым	Тонкая адаптация скорости за счет использования	Дискретная адаптация за счет изменения числа

скорости передачи	скорости передачи данных, PCS даёт тонкую адаптацию скорости	линейным скоростям и конфигурациям сервисов/интерфейсов	Fractional QAM и программного переключения профилей DSP	активных поднесущих и формата модуляции, согласование с гибкой сеткой частот и шагом гребёнки
QoT-критерии	В промышленной реализации QoT обеспечивается средствами DSP	QoT обеспечивается средствами когерентной обработки и эксплуатационного мониторинга	Непрерывный мониторинг качества передачи (pre-FEC, post-FEC BER) и оптических параметров в системе управления	QoT-оценка по BER/EVM в процессе выбора режима передачи, пост-верификация и откат реконфигурации
Учет аппаратных эффектов	Обычно рассматриваются как часть канала, без явного моделирования аппаратных ограничений	Аппаратные особенности учитываются на уровне промышленной платформы, но не задаются в виде явного множества допустимых режимов	Компенсация дисперсии и искажений на уровне DSP, расчет аппаратных допусков на этапе планирования сети	Явный учет аппаратных ограничений при формировании множества допустимых режимов передачи
Перестройка режима передачи	Встроенная (Скорость передачи, FEC, PCS, модуляция) через профили DSP	Через выбор сервисных и линейных профилей, автоматизированное предоставление ресурсов и встроенные механизмы платформы	Программное переключение профилей модуляции (DP-QPSK, 16QAM и др.) по команде оператора или системы управления.	Перестройка через выбор группы линий частотной гребёнки, изменения количества активных поднесущих и формата модуляции
Сетевой контур управления	NMS, SDN, для pluggables заявлены стандарты 400ZR, OpenZR+, OpenROADM	iMaster NCE-T: визуализация ресурсов, автоматическое предоставление сервисов	Система управления телекоммуникациями (NMS) «Титан» с интеграцией сетевых интерфейсов (NETCONF/YANG)	T-SDN pipeline с использованием ML-предиктора для прогнозирования QoT и оптической реконфигурации.

4.12. Выводы по четвертой главе

Было выполнено исследование влияния параметров адаптивного оптического транспондера на показатели качества передачи информации и установлено, что допустимость режима определяется не отдельным параметром устройства, а согласованным сочетанием характеристик оптической и электрической частей, параметров модуляции и конфигурации суперканала.

Подтверждена адекватность модели спектрального тракта на базе AWGR: показано, что шаг каналов 25 ГГц, полоса канала по уровню -3 дБ около 23 ГГц, внутренние потери порядка 4

дБ, неравномерность потерь по портам около 1 дБ и наличие межканальных перекрёстных помех формируют реальные аппаратные ограничения, непосредственно влияющие на QoT. Установлено, что эти ограничения не являются второстепенными особенностями отдельного оптического компонента, а определяют допустимое окно прохождения спектра и энергетический запас сигнала.

Установлено, что одним из главных лимитирующих факторов является согласование электрической полосы сигнала с полосой канала AWGR. При рациональном согласовании этих параметров обеспечивается приемлемый компромисс между эффективным использованием спектра и запасом по качеству передачи. При чрезмерном расширении электрической полосы относительно эффективной полосы AWGR возникает деградация сигнала вследствие фильтрации, усиливаются искажения крайних спектральных компонент и ухудшаются значения BER и Q-factor. Следовательно, электрическая полоса должна рассматриваться как настраиваемый параметр, жёстко связанный с характеристиками спектрально-селективной оптической части.

Показано, что увеличение порядка модуляции приводит к последовательному сужению области допустимых режимов, поскольку растут требования к OSNR и чувствительность системы к фильтрационным искажениям, разбросу потерь и межканальным перекрёстным помехам. Аналогично, увеличение числа активных поднесущих расширяет суммарную полосу суперканала и усиливает влияние худшей поднесущей, что также ограничивает допустимость режима. Тем самым формат модуляции и число поднесущих должны рассматриваться как совместно выбираемые параметры, определяющие компромисс между спектральной эффективностью и устойчивостью передачи.

Проведенный анализ дальности передачи показал значительную зависимость дистанции от конфигурации суперканала. Если для формата 16QAM при использовании 8 поднесущих и умеренной мощности допустимая дистанция достигает 120 км (при соблюдении порога $BER = 10^{-11}$), то для форматов 32QAM и 64QAM в условиях каскадирования ROADMs и сужения полосы пропускания эффективная дистанция резко сокращается. Ограничение в 50 км для данных форматов, упомянутое во введении, относится к сценариям с максимальным числом поднесущих $N = 10$ и минимальными защитными интервалами, где межканальные помехи и фильтрационный срез становятся доминирующими факторами деградации сигнала.

На основе полученных зависимостей обоснована необходимость определения допустимости режима по наихудшему порту AWGR или худшей поднесущей суперканала, а не по среднему значению QoT. Такой подход позволяет корректно учитывать неравномерность потерь по портам, остаточную неравномерность спектра и локальные фильтрационные штрафы, которые в предельных режимах становятся определяющими. В результате построена

концептуальная область допустимых режимов передачи адаптивного транспондера и показано, что внутри неё может быть выделено подмножество рациональных конфигураций, оптимальных по критериям спектральной эффективности и запасу по качеству передачи.

Практическим итогом является формирование основы для методики выбора режима передачи адаптивного транспондера в контуре интеллектуальной управления гибкой оптической сети. Полученные результаты связывают аппаратные ограничения транспондера с QoT-критериями и позволяют использовать их при переходе к следующей главе, где выбор допустимого и оптимального режима должен быть включён в процедуру управления и реконфигурации.

Глава 5. Метод реконфигурации режимов передачи адаптивного оптического транспондера по параметрам оптического тракта

5.1. Имитационная модель и методика проведения исследования

Для практического применения полученных результатов недостаточно только прямой модели, в которой по заданным параметрам режима определяются характеристики передачи. В реальной сети задача ставится в обратной форме: по требуемой скорости передачи, доступному спектральному окну, параметрам маршрута и оценкам QoT необходимо определить такую конфигурацию адаптивного оптического транспондера, которая обеспечит формирование допустимого и эффективного режима передачи. Это обосновывает переход от анализа режимов к методу их синтеза и реконфигурации [132].

В отличие от прямой задачи анализа режима передачи, в которой по заданным параметрам транспондера определяются характеристики сформированного суперканала, в данной главе рассматривается обратная задача конфигурирования адаптивного оптического транспондера. В этой задаче по требуемой скорости передачи, доступному спектральному блоку, длине оптического тракта, оценке OSNR и допустимым порогам QoT требуется определить такой набор параметров транспондера, который обеспечивает формирование допустимого и оптимального режима передачи для конкретного оптического тракта.

На первом этапе эксперимента в главе 4 исследовались спектральные и энергетические характеристики разработанной в главе 3 архитектуры адаптивного транспондера. В среде ПО OptiSystem была собрана модель волоконно-оптической системы передачи, включающая модель транспондера и волоконно-оптического тракта с оптическими узлами.

Методика моделирования физического уровня включала: формирование суперканала, введение аппаратных искажений и сбор метрик QoT. Результаты этого этапа позволили сформировать таблицы пороговых значений QoT и оценить аппаратные штрафы, которые затем использовались как ограничения в алгоритмах T-SDN-контроллера.

На основе результатов главы 4 был сформирован датасет конфигураций адаптивного транспондера, в котором каждой комбинации параметров режима и параметров оптического тракта сопоставлены вычисленные показатели качества передачи, включая BER, Q-factor, EVM и запас по QoT. По данному набору данных обучена модель, аппроксимирующая прямое отображение параметров транспондера и оптического тракта в характеристики суперканала.

С практической точки зрения обратная задача решается не аналитическим обращением модели, а через поиск по конечному множеству аппаратно поддерживаемых конфигураций. Для каждой потенциально реализуемой конфигурации вызывается прямая QoT-модель из главы 4, после чего контроллер отбрасывает недопустимые варианты и ранжирует оставшиеся по выбранному критерию рациональности. Такой подход хорошо ложится на программную

реализацию, потому что допускает как табличные модели, так и ML-предикторы, и не требует замкнутой формулы обратного отображения.

Для разработки программного комплекса и проведения вычислительных экспериментов использовался язык программирования Python версии 3.12, а также стабильные сборки библиотек для научного анализа данных: scikit-learn, NumPy. Выбор данной программной среды обусловлен наличием высокоэффективных реализаций алгоритмов градиентного бустинга и средств векторизованной обработки данных, что критически важно для работы модуля управления в режиме реального времени.

Таблица 5.1 Входные и выходные параметры модуля конфигурирования транспондера

Категория	Параметр	Обозначение	Назначение
Вход	Длина маршрута	L , км	Ограничение по дальности и QoT
	OSNR на тракте	$OSNR$, дБ	Выбор допустимой модуляции и режимов
	Допустимый BER	BER_{th}	Основной критерий допустимости
	Доступные частотные слоты	B_{avail}	Проверка спектральной совместимости
	Требуемая скорость	C_{req}	Фильтрация режимов по пропускной способности
	Максимально допустимая суммарная мощность передачи	P_{max}	Ограничения оптического тракта по нелинейным искажениям
Выход	Формат модуляции	M	Спектральная эффективность
	Число поднесущих	N	Ширина суперканала
	Ширина суперканала	B_{sc} , ГГц	Ширина суперканала
	Мощность передачи	P_{tx} , дБм	Мощность суперканала

Для оценки эффективности предложенных алгоритмов была разработана дискретно-временная модель эмуляции сети. Эмуляция воспроизводила работу замкнутого контура управления и выполнялась по следующей методике. Трафик моделировался функцией $C_{req}(t)$, представляющей собой пульсирующие временные ряды с периодическими пиками и случайной составляющей, что отражает поведение агрегированного трафика в транспортных оптических сетях. Использовалась базовая топология с наличием параллельных маршрутов между узлами для провоцирования конкуренции за спектральные ресурсы. Доступный спектральный ресурс линии был дискретизирован на спектральные блоки. Для каждого маршрута рассчитывался

$OSNR$ с учетом длины линии L и случайных флуктуаций физической среды, имитирующих временную нестабильность оптического тракта. На каждом шаге T-SDN контроллер получал актуальные запросы $C_{req}(t)$ и значения $OSNR$. На основе разработанного алгоритма T-SDN контроллер принимал решения.

Эмуляция замкнутого контура управления T-SDN-контроллера реализована с использованием библиотеки SimPy — генератора дискретно-событийных симуляций на языке Python. Генератор заявок формирует поток запросов на установление оптических соединений по закону Пуассона с интенсивностью λ (заявок/час). Для каждой заявки случайным образом выбирается пара узлов-источник и приёмник (равномерно из всех пар узлов топологии), требуемая скорость передачи C_{req} и время удержания соединения (экспоненциальное распределение со средним $1/\mu = 2$ часа).

Программная реализация моделирующего комплекса основана на разделении входных данных на два независимых файла. Первый файл содержит описание топологии сети, включая состав узлов, набор линий связи, их длины, число спектральных слотов и параметры качества передачи. Второй файл содержит описание сценария трафика, включая интенсивность поступления заявок, параметры распределения времени удержания соединений, диапазон требуемых скоростей передачи и правила выбора пар источник–приёмник. Такое разделение позволяет независимо изменять структуру сети и характеристики нагрузки без модификации исходного кода программы.

В предлагаемой программной архитектуре физические параметры сети учитываются на двух уровнях. На уровне топологии задаются укрупнённые характеристики оптического тракта, включая длину маршрута, доступный спектральный блок и оценку $OSNR$. На уровне базы конфигураций транспондера учитываются детализированные зависимости QoT от параметров устройства и линии связи, полученные в результате предварительного физического моделирования. В процессе эмуляции сетевые запросы, сформированные моделью трафика, сопоставляется с физически допустимыми режимами передачи на основе совместного анализа параметров маршрута и характеристик адаптивного транспондера.

5.2. Архитектура программного модуля на T-SDN контроллере

Для практической реализации разработанного метода выбора и реконфигурации режимов передачи адаптивного оптического транспондера предложена архитектура программного модуля, функционирующего в составе T-SDN-контроллера. Назначение данного модуля заключается в преобразовании телеметрических данных оптического тракта и сетевых требований к соединению в конкретную конфигурацию транспондера, допустимую по показателям качества передачи и рациональную по спектральному расходу.

В отличие от традиционных сетевых модулей управления, использующих упрощённое представление транспондера в виде набора фиксированных скоростных профилей, разработанный программный модуль опирается на аппаратно-ориентированную модель устройства, сформированную в предыдущих главах. Это означает, что при выборе режима учитываются не только требуемая скорость и доступный спектральный ресурс, но и реальные параметры конфигурации суперканала: число активных поднесущих, формат модуляции, мощность передачи, ширина спектрального блока, ограничения электрического тракта и результаты QoT-оценки. Тем самым модуль обеспечивает связь между физическим уровнем адаптивного транспондера и централизованным управлением в архитектуре T-SDN.

Функционально программный модуль включает пять основных подсистем: подсистему приема и валидации входных данных; подсистему формирования множества потенциально реализуемых режимов; подсистему оценки допустимости конфигураций; подсистему ранжирования и выбора рационального режима; подсистему верификации результата и переход к предыдущей конфигурации. Такое разбиение позволяет представить процесс реконфигурации как последовательность согласованных этапов, выполняемых в едином контуре управления.

На вход программного модуля поступают параметры оптического тракта и сетевого запроса. К ним относятся длина маршрута, доступный спектральный блок, требуемая скорость передачи, текущее значение OSNR, допустимые пороги BER, сведения о текущем состоянии соединения, а также телеметрические данные, поступающие от адаптивного транспондера и линейного оборудования. В составе входных данных также используется профиль транспондера, содержащий перечень потенциально реализуемых режимов передачи. На выходе формируется конфигурационный объект, включающий выбранный формат модуляции, число поднесущих, требуемую ширину спектрального блока, мощность передачи и резервный профиль, который может быть использован при недопустимом ухудшении QoT после реконфигурации.

Первая подсистема выполняет приём, нормализацию и валидацию входных параметров. На данном этапе проверяется полнота телеметрических данных, корректность описания сетевого запроса и согласованность входных ограничений. Практическая реализация интерфейса обмена данными может быть выполнена с использованием FastAPI, а контроль структуры входных и выходных объектов — средствами Pydantic. Однако в контексте настоящей работы принципиальным является не выбор конкретной программной библиотеки, а то, что модуль обеспечивает формальную валидацию телеметрии и управляющих воздействий перед передачей конфигурации на физический уровень. Это уменьшает вероятность применения некорректных режимов и повышает надёжность реконфигурации.

Вторая подсистема формирует множество потенциально реализуемых режимов передачи. В качестве исходного множества используются режимы, допустимые с точки зрения

архитектуры транспондера и результатов исследований, полученных в главах 3 и 4. На этом этапе для заданной требуемой скорости и доступного спектрального окна генерируются варианты конфигураций, различающиеся числом поднесущих, форматом модуляции, шириной суперканала и мощностью передачи. Далее выполняется предварительная фильтрация режимов по пропускной способности, спектральной совместимости и аппаратным ограничениям устройства. Таким образом, уже на раннем этапе исключаются конфигурации, которые не могут быть реализованы в данном оптическом тракте.

Третья подсистема предназначена для оценки допустимости потенциально реализуемых конфигураций по показателям качества передачи. Для каждого режима рассчитываются или прогнозируются значения QoT-метрик, в том числе BER, Q-factor, EVM и требуемый запас по OSNR. В отличие от упрощённого подхода, основанного только на пороговой длине маршрута, в разработанном модуле допустимость оценивается с учетом параметров самой конфигурации суперканала и аппаратных ограничений его формирования. При необходимости данный этап может опираться на заранее обученную ML-модель, реализующую быстрый прогноз показателей качества по параметрам режима и характеристикам тракта. Результатом работы этой подсистемы является множество допустимых режимов, удовлетворяющих ограничениям по QoT.

Четвёртая подсистема реализует выбор рационального режима передачи из множества допустимых конфигураций. На этом этапе выполняется ранжирование режимов по совокупности критериев, включающих минимизацию спектрального расхода, сохранение запаса по качеству передачи и снижение цены реконфигурации. В зависимости от состояния сети и цели управления приоритетным может быть либо минимальный занимаемый спектр, либо более высокий запас устойчивости по QoT. Для предотвращения частых переключений режимов в условиях пограничных значений телеметрии выбор выполняется с учетом штрафа за избыточную реконфигурацию. Выходом данной подсистемы является основной режим передачи и резервный режим, используемый как конфигурация при переходе к предыдущему режиму передачи.

Пятая подсистема обеспечивает применение новой конфигурации, её последующую верификацию и, при необходимости, переход к предыдущему режиму передачи. После передачи команды на транспондер модуль переходит в режим контроля результата реконфигурации и анализирует фактические QoT-метрики, полученные по телеметрии. Если после переключения показатели BER, Q-factor, EVM или OSNR выходят за допустимые пределы, инициируется возврат к предыдущей либо резервной конфигурации. Такой подход позволяет реализовать транзакционную реконфигурацию режима, в которой изменение параметров суперканала считается успешным только после подтверждения качества передачи по реальным измерениям переданного сигнала. Именно наличие верификационного и контура перехода к предыдущему

режиму передачи делает архитектуру пригодной для динамического трафика и практического применения в T-SDN.

С вычислительной точки зрения программный модуль ориентирован на обработку многомерных наборов режимов передачи и телеметрии в режиме, близком к реальному времени. Практическая реализация вычислительного ядра может использовать библиотеки NumPy и Pandas для векторизованной обработки массивов параметров, фильтрации конфигураций и ранжирования допустимых режимов. Однако научно значимым результатом в настоящей работе является не сам выбор программных средств, а построение архитектуры, в которой вычислительное ядро оперирует не абстрактными скоростными профилями, а аппаратно реализуемыми конфигурациями адаптивного транспондера.

Предлагаемая архитектура программного модуля обеспечивает включение адаптивного оптического транспондера в централизованный контур T-SDN-управления как программно-конфигурируемого ресурса с обратной связью на физическом уровне. Это позволяет перейти от статического выбора профиля передачи к интеллектуальной реконфигурации, в которой решения принимаются на основе совместного анализа параметров оптического тракта, состояния сети и аппаратных ограничений оптического адаптивного транспондера. Тем самым создаётся программная основа для последующего описания алгоритма решения обратной задачи выбора режима передачи и алгоритма выбора рациональной конфигурации транспондера.

5.3. Алгоритм решения обратной задачи выбора режима передачи транспондера

В предыдущих разделах были определены архитектура программного модуля в составе T-SDN-контроллера и общая постановка задачи реконфигурации режима передачи адаптивного оптического транспондера. Следующим этапом является разработка алгоритма решения обратной задачи выбора режима передачи, в которой по заданным параметрам оптического тракта и сетевого запроса требуется определить множество конфигураций транспондера, допустимых с точки зрения спектральных, аппаратных и QoT-ограничений. В отличие от прямой задачи, где по известным параметрам режима оцениваются характеристики передачи, в обратной задаче необходимо по требуемой скорости, длине тракта, доступному спектральному ресурсу и измеренным телеметрическим параметрам определить такие настройки транспондера, которые могут быть реализованы в конкретных условиях линии связи.

В диссертационной работе под решением обратной задачи понимается процедура отображения параметров оптического тракта и сетевого запроса в множество допустимых режимов передачи. На вход алгоритма поступают требуемая скорость передачи R_{req} , доступная ширина спектрального блока B_{avail} , длина маршрута L , доступный уровень OSNR в оптическом тракте, допустимое пороговое значение BER, максимально допустимая суммарная мощность передачи, а также сведения о доступном спектральном окне и профиле транспондера. На выходе

формируется множество допустимых конфигураций, каждая из которых задаётся набором параметров: число активных поднесущих, формат модуляции, символьная скорость, требуемая ширина спектрального блока и мощность передачи. Таким образом, результатом работы алгоритма является не единственная настройка устройства, а множество режимов, удовлетворяющих всем ограничениям задачи и пригодных для последующего ранжирования.

С практической точки зрения обратная задача не решается поиском по непрерывному пространству параметров, поскольку адаптивный транспондер имеет конечный набор аппаратно реализуемых конфигураций. Поэтому в разработанном алгоритме поиск выполняется по каталогу поддерживаемых режимов, заданному профилем транспондера и дополненному результатами моделирования, полученными в главах 3 и 4. Это означает, что алгоритм не генерирует произвольные комбинации параметров, а перебирает только такие конфигурации, которые реально могут быть сформированы архитектурой транспондера и были предварительно исследованы с точки зрения влияния на QoT. Такой подход обеспечивает согласованность программного модуля с физическим уровнем устройства и исключает выбор заведомо нереализуемых настроек.

Для ускоренной оценки допустимости потенциально реализуемых режимов в контуре T-SDN используется ML-предиктор, обученный на табличном наборе данных, полученном в среде OptiSystem. Каждая строка обучающей выборки соответствует одной конфигурации режима передачи при заданных параметрах оптического тракта и содержит значения входных признаков и выходных QoT-показателей. Входной вектор включает число активных поднесущих, формат модуляции, символьную скорость, требуемую ширину спектрального блока, число доступных спектральных слотов, длину тракта, мощность передачи и дополнительные параметры, характеризующие состояние линии. В качестве прогнозируемых величин используются показатели BER, Q-factor и EVM, а также производные признаки допустимости режима. Использование ML-предиктора позволяет отказаться от трудоёмкого повторного физического моделирования в момент принятия решения и тем самым обеспечить быстродействующую QoT-оценку в процессе эксплуатации сети.

В качестве архитектурного базиса ML-предиктора выбрана модель HistGradientBoostingRegressor, реализующая алгоритм градиентного бустинга на решающих деревьях с предварительным квантованием признаков. Выбор данной архитектуры обусловлен ее устойчивостью к мультиколлинеарности входных параметров (например, корреляции между мощностью и OSNR) и способностью эффективно моделировать нелинейные пороговые эффекты, характерные для волоконно-оптических систем связи.

Объем сформированного датасета в 10 000 конфигураций является репрезентативным для выбранной области поиска, так как пространство признаков было предварительно ограничено

физически реализуемыми режимами (шаг частот 25 ГГц, ограниченный набор модуляций). Для проверки обобщающей способности ML-предиктора за пределами обучающей выборки из OptiSystem выполнена дополнительная валидация на 500 конфигурациях, рассчитанных с использованием OptiCommPy.

Число активных поднесущих в модели адаптивного транспондера реализовано через управление оптическими аттенюаторами в ветвях оптической частотной гребёнки. Для каждой линии используется отдельный аттенюатор, задающий состояние линии: для активной устанавливается минимальное значение (0 дБ), для неактивной устанавливается большое значение (например, 50–80 дБ), что эквивалентно подавлению данной поднесущей.

Для формирования суперканала выбирается непрерывная по частоте группа из соседних линий гребёнки, что обеспечивает согласование с выделяемым непрерывным спектральным окном в гибкой сетке частот, а остальные линии подавляются. Такой подход позволяет формировать суперканалы различной ширины и исследовать влияние на QoT при фиксированном шаге 25 ГГц.

Для анализа чувствительности предложенного решения к параметрам физического уровня была проведена серия экспериментов, в которых варьировались передаваемая мощность, потери и неоднородность AWGR. Параметры мощности изменялись в диапазоне от -6 до $+2$ дБм с шагом 1 дБ, что позволило учесть как недостаточную OSNR при низкой мощности, так и рост нелинейных искажений при избыточной мощности.

Для каждого значения мощности оценивались средние значения OSNR, BER и маржи QoT по всем установленным соединениям; при этом наблюдалась область оптимальных мощностей, в которой QoT максимален. Аналогично параметр AWGR, моделирующий совокупные потери и неидеальности, варьировался в диапазоне, соответствующем реальным значениям для интегральных AWGR ($IL = 3\text{--}5$ дБ, $NU = 0,5\text{--}1$ дБ), что позволило проследить деградацию QoT и рост вероятности блокировки при ухудшении характеристик устройства.

Результаты чувствительности позволяют выделить наиболее критичные параметры, обосновать необходимость запаса QoT при выборе высокоэффективных режимов, выбрать практические настройки порогов верификации, обеспечивающие устойчивость при динамическом трафике и изменчивости физического слоя сети.

Далее по результатам моделирования формируется таблица конфигураций в виде списка комбинаций параметров (Таблица 5.2). Для обеспечения репрезентативности используется смешанный план: дискретные параметры (модуляция, число поднесущих, профили скорости) перебираются по заданным наборам, а непрерывные параметры (P_{tx} , L , OSNR) выбираются случайно в заданных диапазонах, что предотвращает перекосы распределений и уменьшает объём вычислений по сравнению с полным перебором.

Таблица 5.2 Пример первых строк таблицы конфигураций транспондера

	N_sc	Mod	tx_pow erdbm	Symbol_ rate	B_GHz	slot_ count	Lk_ m	OSNR dB	BER	Q	EVM
1	2	QPSK	-2,0	25,0	50	4	110	22,5	$1,8 \times 10^{-11}$	7,1	0,09
2	4	8QAM	-1,5	25,0	100	8	85	19,8	$3,4 \times 10^{-11}$	6,5	0,15
3	10	64QAM	-4,0	25,0	250	20	18	27,2	$6,0 \times 10^{-10}$	6,1	0,13
4	6	16QAM	-3,0	25,0	150	12	62	18,4	$2,7 \times 10^{-11}$	6,9	0,12
5	8	32QAM	-2,5	25,0	200	16	34	21,6	$4,9 \times 10^{-12}$	6,3	0,14

После завершения каждого прогона скрипт автоматически извлекает QoT-метрики из анализаторов OptiSystem (BER, EVM, Q-factor, OSNR) и записывает результаты в выходной CSV-файл. Далее с помощью научных библиотек Python выполняется постобработка: контроль полноты данных, удаление некорректных строк (ошибки сходимости/невалидные значения), а также проверка распределений параметров и метрик. Для повышения устойчивости расчёты выполняются блоками фиксированного размера (по 500–1000 точек), и для каждого блока ведётся отдельный лог, содержащий номер сценария, значения входных параметров и статус выполнения.

В качестве входных признаков использованы параметры режима передачи и спектрального ресурса:

- N_sc — число активных поднесущих;
- Mod — формат модуляции;
- tx_power_dbm — мощность передачи (дБм);
- Symbol_rate — символьная скорость;
- B_GHz — ширина спектрального блока (ГГц);
- slot_count — число спектральных слотов;
- L_km — длина маршрута (км);
- OSNR_dB — OSNR на приёме (дБ).

Целевыми переменными являются прогнозируемые показатели QoT:

- BER, Q, EVM.

Итоговый набор данных содержит 10000 строк (конфигураций). Таблица сформирована по результатам вычислительных экспериментов, где для каждой конфигурации вычислялись BER, Q и EVM. Таким образом, ML-модель решает задачу аппроксимации прямого отображения параметров режима передачи и оптического тракта в QoT-показатели и далее используется как быстрый предиктор при генерации и фильтрации потенциально реализуемых режимов (Приложение 1).

В диссертационной работе ML-предиктор QoT используется как быстродействующая модель, предназначенная для фильтрации и ранжирования потенциально реализуемых режимов в контуре управления. Такой предиктор не заменяет физическую модель полностью и корректен в пределах диапазонов параметров, покрытых обучающей выборкой (по L , OSNR, профилям передачи и спектральному ресурсу). Для обеспечения воспроизводимости фиксируются объём выборки, диапазоны параметров, метод формирования данных и параметры разбиения на обучающую и тестовую части.

Для обеспечения воспроизводимости результатов выборка разбивалась на обучающую и тестовую части в пропорции 80/20 при фиксированном значении `random_state = 41`. На обучающей части дополнительно выполнялась k -кратная кросс-валидация, что позволило оценить устойчивость модели к вариациям состава подвыборок. Такая схема валидации является принципиально важной, поскольку предиктор в рамках настоящей работы используется не как вспомогательный аналитический инструмент, а как часть контура принятия решений при выборе допустимых режимов передачи транспондера.

В процессе предварительной обработки числовые признаки нормировались, а категориальные признаки кодировались методом `one-hot`. В качестве основной модели использовалась многомерная регрессия `MultiOutputRegressor (HistGradientBoostingRegressor)`, позволяющая одновременно прогнозировать три показателя качества передачи: BER , Q и EVM . Выбор данной архитектуры обусловлен её способностью аппроксимировать нелинейные зависимости между параметрами режима передачи и QoT-показателями без необходимости явного задания аналитической формы этих зависимостей. Кроме того, модель обеспечивает приемлемую вычислительную сложность при пакетной обработке множества потенциально реализуемых конфигураций, что делает её пригодной для использования в составе T-SDN-контроллера.

Качество предсказания модели оценивалось отдельно для каждой целевой переменной на тестовой выборке по трём метрикам: среднеквадратичной ошибке (MSE), средней абсолютной ошибке (MAE) и коэффициенту детерминации R^2 . Дополнительно выполнялось сравнение с базовыми моделями меньшей сложности, включая линейную регрессию и ансамблевый регрессор случайного леса. По совокупности метрик выбранная модель на основе градиентного бустинга обеспечила наилучший компромисс между точностью предсказания и вычислительной сложностью, что делает её пригодной для использования в контуре T-SDN-управления.

Ввиду того, что прогнозируемое значение BER изменяется на несколько порядков, в качестве целевой переменной при обучении использовалась величина $\log_{10}(BER)$. Такой переход позволяет получить содержательные значения MSE/MAE и корректно сравнивать ошибки в

разных областях изменения BER. При пост-обработке прогноз обратно преобразуется в шкалу BER посредством возведения 10 в прогнозируемую степень.

Поскольку ML-предиктор используется не только для аппроксимации QoT-показателей, но и для фильтрации допустимых режимов передачи, отдельно анализировалась ошибка модели в приграничной области допустимости. Для этого рассматривались конфигурации, для которых истинные значения BER, Q и EVM находились в окрестности пороговых значений. Для данной области оценивались доля ложнодопустимых и ложнонедопустимых решений, а также итоговая точность бинарной классификации режимов по критерию допустимости. Полученные результаты показали, что основная масса ошибок регрессии сосредоточена вне критической области принятия решений, а оставшиеся ошибки компенсируются обязательной пост-верификацией QoT после применения выбранной конфигурации и механизмом перехода к предыдущему режиму передачи.

Полученные результаты приведены в таблице 5.3 и показывают, что для всех трёх целевых показателей модель обеспечивает высокую степень согласования между прогнозируемыми и расчётными значениями. Эти значения подтверждают, что построенный ML-предиктор способен корректно воспроизводить основные закономерности изменения QoT-показателей в исследуемом диапазоне параметров.

Таблица 5.3 Результаты обучения ML-предиктора QoT

Целевой параметр	MSE	MAE	R ² -score
$\log_{10} \text{BER}$	0.03	0,15	0,97
Q-factor	0,38	0,29	0,94
EVM	0,0082	0,09	0,96

Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 > 0,94$) по всем трём целевым показателям подтверждают адекватность выбранной модели градиентного бустинга. Анализ абсолютных ошибок показал, что данные значения на порядок меньше заложенного эксплуатационного запаса по QoT, что исключает принятие неверных решений о допустимости режима передачи в пределах рабочей области параметров адаптивного транспондера. Оставшиеся ошибки регрессии компенсируются обязательной пост-верификацией QoT после применения конфигурации и механизмом перехода к предыдущему режиму передачи при неподтверждении результата.

5.4. Алгоритм выбора рациональных режимов передачи транспондера

Ранее (раздел 5.3) была решена обратная задача выбора режима передачи адаптивного оптического транспондера, в результате которой по заданным параметрам оптического тракта и сетевого запроса формируется множество допустимых конфигураций. Однако наличие

допустимого множества ещё не определяет окончательное решение о конфигурации транспондера, поскольку несколько режимов могут одновременно удовлетворять ограничениям по BER, OSNR, ширине спектрального блока и аппаратным ограничениям, но существенно различаться по спектральной эффективности, запасу по качеству передачи и цене реконфигурации. Поэтому следующим этапом является выбор рационального режима передачи из множества допустимых конфигураций (Приложение 2).

В диссертации под рациональным режимом понимается такой допустимый режим передачи адаптивного оптического транспондера, который не обязательно является глобально оптимальным в строгом математическом смысле, но обеспечивает наилучший инженерный компромисс между эффективностью использования спектра и устойчивостью по QoT. Иными словами, рациональный режим должен одновременно обеспечивать требуемую пропускную способность, использовать минимально необходимый спектральный ресурс, сохранять достаточный запас по качеству передачи и не вызывать избыточную реконфигурацию устройства.

Таблица 5.4 Пороги OSNR для разных режимов передачи адаптивного транспондера

Число поднесущих	Полоса суперканала (ГГц)	Формат модуляции	Скорость поднесущей (Гбит/с)	Суммарная скорость (Гбит/с)	Требуемый OSNR (дБ)
1	25	32QAM	125	125	~20,0
2	50	32QAM	125	250	~20,4
3	75	16QAM	100	300	~16,2
4	100	16QAM	100	400	~16,6
5	125	8QAM	75	375	~14,2
6	150	8QAM	75	450	~14,7
7	175	QPSK	50	350	~12,0
8	200	QPSK	50	400	~13,5

Приведенные в Таблице 5.4 пороговые значения OSNR для форматов модуляции QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM и 64QAM соответствуют теоретическим пределам для когерентных систем связи с идеальной компенсацией фазового шума. В практической реализации выбора режима передачи к данным значениям добавляется штраф, учитывающий неидеальность АЧХ AWGR и накопленные нелинейные искажения в оптическом тракте. Суммарный эксплуатационный запас по качеству передачи принимается равным 1,5 дБ, что обеспечивает устойчивость выбранного рационального режима к флуктуациям параметров линии связи.

С инженерной точки зрения алгоритм удобнее строить не как формальную оптимизацию, а как многоступенчатый конвейер отбора (рис. 5.1).

Шаг 1. Приём входных параметров

Контроллер получает объект запроса вида:

- length_km

- osnr_db
- ber_limit
- available_slots
- required_rate_gbps

Этот объект описывает уже известный оптический тракт и фактически заменяет абстрактную постановку сетевой задачи.

Шаг 2. Загрузка каталога аппаратных режимов

Из базы режимов передачи извлекаются все поддерживаемые транспондером конфигурации. Каждая запись содержит:

- modulation
- subcarriers
- symbol_rate
- tx_power_dbm
- slot_count
- guard_band_profile
- superchannel_width_ghz

Шаг 3. Спектральная фильтрация

Из каталога сразу отбрасываются конфигурации, которые не помещаются в доступные спектральные блоки.

Шаг 4. Пакетная QoT-оценка

Для каждой оставшейся конфигурации вызывается модель из главы 4:

Шаг 5. Отбор допустимых режимов

После оценки остаются только те конфигурации, для которых одновременно выполняется:

- прогнозный BER не хуже порогового;
- при необходимости обеспечивается требуемая скорость.

То есть на этом этапе строится конечное множество допустимых режимов. Если множество пусто, контроллер возвращает отрицательный результат: для данного тракта рациональный режим не найден.

Шаг 6. Ранжирование рациональных режимов

Из допустимых режимов выбираются рациональные. Для отбора достаточно использовать последовательность правил:

1. минимальная занимаемая полоса;
2. максимальная спектральная эффективность;
3. достаточный, но не чрезмерный запас по качеству передачи;

4. минимально сложная перестройка относительно текущего профиля.

Шаг 7. Формирование конфигурационного профиля

После выбора лучшего режима контроллер формирует объект конфигурации транспондера:

- modulation_profile
- subcarrier_count
- symbol_rate
- tx_power
- slot_profile
- guard_band_profile

Шаг 8. Верификация после применения

После отправки конфигурации T-SDN контроллер считывает обратную телеметрию и сравнивает фактические показатели с прогнозом. Если фактический QoT не подтвердился, активируется реконфигурация: выбирается следующий режим из отсортированного списка.



Рисунок 5.1 Последовательность работы модуля при применении выбранного режима передачи

Таблица 5.5 Правила верификации и действий T-SDN контроллера после применения выбранного рационального режима передачи

Событие	Условие	Действие T-SDN контроллера
Успешная реконфигурация	$BER \leq BER_{th}$ в течение окна наблюдения	зафиксировать $\mathbf{x}^*$ как рабочий режим
Неподтверждение QoT	$BER > BER_{th}$	применить резервный $\mathbf{x}_{res}^*$
Повторный провал	$\mathbf{x}_{res}^*$ также не подтверждён	реконфигурация на предыдущий стабильный режим
Дрейф параметров оптического тракта	падение OSNR ниже порога для выбранного формата модуляции	понизить M или уменьшить N
Спектральный конфликт	изменилось B_{avail}	выбрать новый $B_{sc} \leq B_{avail}$ и пересчитать кандидатов

Окно наблюдения для верификации задаётся фиксировано и может быть согласовано с возможной динамикой элементов тракта и временем перестройки оборудования.

Ниже приведён пример работы алгоритма для типового городского тракта.

Входные данные оптического тракта:

- $L = 60$ км

- $OSNR = 19$ дБ
- $BER_{th} = 10^{-11}$
- доступное окно: 100 ГГц (4 слота по 25 ГГц)
- требуемая скорость: $C_{req} = 200$ Гбит/с

После спектральной фильтрации остаются режимы с $B_{sc} \leq 100$ ГГц. Далее проводится QoT-оценка по модели главы 4 и формируется ранжированный список допустимых режимов.

Таблица 5.6 Пример ранжирования потенциально реализуемых конфигураций

Режим	B_{sc} , ГГц	N	M	P_{tx} , дБм	BER	EVM , %	Статус	Примечание
1	50	2	8QAM	-1	10^{-12}	6,0	недопустим	не соответствует по скорости
2	100	4	8QAM	-1	10^{-12}	7,1	допустим	рациональный
3	100	4	32QAM	-1	10^{-10}	10,2	недопустим	не проходит по BER
4	50	2	32QAM	-1	10^{-10}	9,8	недопустим	не проходит по BER
5	100	4	QPSK	-2	10^{-12}	4,8	допустим	помехоустойчивый, но низкая эффективность
6	100	4	16QAM	-4	10^{-11}	8,6	допустим	близко к границе, меньше запас
7	100	4	16QAM	+1	10^{-11}	8,0	допустим	предельный (малый запас)
8	100	4	64QAM	-1	10^{-9}	16,0	недопустим	OSNR недостаточен

Итог: выбран режим 2 как рациональный; резервный профиль — 5.

5.5. Исследование эффективности алгоритма выбора рационального режима передачи для типовых оптических трактов при динамическом трафике

Для подтверждения работоспособности и оценки эффективности предложенного алгоритма выбора режима адаптивного оптического транспондера проведена серия вычислительных экспериментов в условиях динамически изменяющегося трафика. Экспериментальная постановка ориентирована на практический сценарий управления ресурсами в гибкой оптической сети: в каждый дискретный момент времени T-SDN контроллер принимает решение о допустимом режиме транспондера и параметрах выделения спектрального ресурса на основе текущего состояния сети и требований трафика.

Экспериментальная оценка эффективности алгоритма выполнена на дискретно-временной эмуляции динамического трафика (рис. 5.2). Сравнение выполняется с базовым подходом, отражающим статическую настройку профиля передачи и простую политику спектрального назначения (First-Fit). Для обеспечения корректности сравнения все методы тестируются на одинаковых реализациях временных рядов трафика и одинаковых QoT-порогах.

Эффективность оценивается в серии точек нагрузки и по набору метрик: вероятность блокировки, спектральный расход, скорость передачи, число реконфигураций, число переходов к предыдущему режиму передачи и средний запас по QoT. Для каждой точки нагрузки результаты усредняются по множеству прогонов, что позволяет оценить разброс и корректно

сопоставлять методы. Такая постановка демонстрирует не только выигрыш по эффективности, но и цену адаптивности в виде реконфигураций и устойчивость решений через долю переходов к предыдущему режиму передачи.

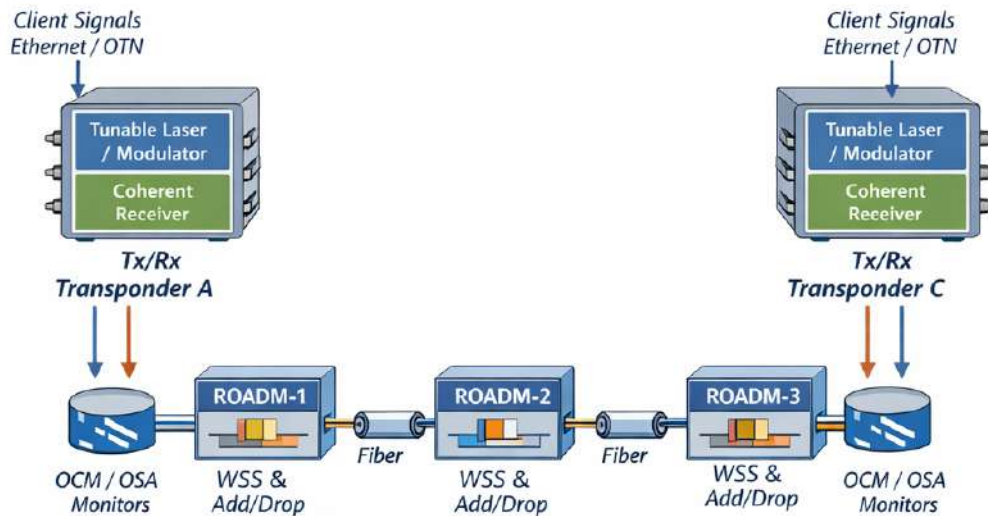


Рисунок 5.2 Схема волоконно-оптической сети

Моделирование выполнялось в дискретном времени на топологии кольцо с хордами, содержащей 14 узлов и 21 двунаправленное соединение. В рамках каждого независимого прогона формировалась последовательность сетевых заявок с динамически изменяющимися требованиями по скорости передачи. Интенсивность поступления заявок $\lambda = 10 \dots 100$ заявок/час (с шагом 10) задавалась по закону Пуассона, а для каждого соединения формировался временной профиль требуемой пропускной способности, отражающий пульсирующий характер нагрузки, среднее время удержания: $1/\mu = 2$ часа.

Для каждой заявки контроллер последовательно выполнял выбор маршрута, выделение спектрального блока в гибкой сетке частот, формирование множества допустимых режимов адаптивного транспондера и выбор рациональной конфигурации по критериям допустимости по QoT и минимального спектрального расхода. В состав конфигурации входили формат модуляции, число активных поднесущих, требуемая полоса спектрального блока и мощность передачи.

В каждом сценарии выполнялось 1000 независимых прогонов. Во всех прогонах сравниваемые алгоритмы использовали одинаковые реализации трафика, что обеспечивало корректность сравнительной оценки. Для оценки статистической значимости результатов для каждой метрики вычислялись выборочное среднее, выборочная дисперсия и доверительные интервалы на основе нормального приближения, что позволяло отделить устойчивые закономерности от случайных флуктуаций.

Исходные параметры топологии, спектрального ресурса, модели трафика и порогов QoT приведены в таблице 5.7. Для обеспечения статистической устойчивости все результаты получены усреднением по независимым прогонам при одинаковых исходных условиях и одинаковых реализациях временных рядов трафика для сравниваемых подходов.

Таблица 5.7 Параметры вычислительного эксперимента

Параметр	Значение
Число прогонов	1000
Длина пути (L)	10 – 120 км
Шаг гибкой сетки частот	25 ГГц
Диапазон полосы	50–250 ГГц
Скорость C_{req}	50, 100, 150, 200, 250 Гбит/с
Модуляции (M)	QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM
Число поднесущих	2 – 10
Мощность передачи	–6...+2 дБм
Пороги OSNR	QPSK: 12 дБ 8QAM: 14 дБ 16QAM: 16 дБ 32QAM: 20 дБ 64QAM: 24 дБ

Оценка эффективности алгоритма выполнялась по набору метрик, отражающих способность сети обслуживать динамический трафик, экономичность использования спектрального ресурса, устойчивость к деградации QoT и издержки реконфигураций.

В рамках каждого прогона фиксировались следующие показатели:

1. Вероятность блокировки — доля заявок/соединений, для которых T-SDN контроллер не смог сформировать допустимую конфигурацию, удовлетворяющую ограничениям по спектру и QoT.
2. Коэффициент использования спектра — среднее количество занятых спектральных слотов на обслуженные соединения. Метрика используется как практический показатель экономичности размещения в спектре: меньший расход соответствует более эффективному выбору режима передачи транспондера.
3. Число реконфигураций — суммарное количество смены режима передачи транспондера и/или параметров выделения спектра за эксперимент. Метрика отражает цену адаптивности и напрямую связана с устойчивостью управления и нагрузкой на плоскость управления.
4. Число переходов к предыдущему режиму передачи — процент реконфигураций, не подтвердившихся на этапе пост-верификации QoT и завершившихся переходом к предыдущему режиму передачи или выбором следующего допустимого режима. Метрика характеризует

надёжность работы алгоритма в реальных условиях изменения OSNR/нагрузки и корректность отбора потенциально реализуемых режимов.

5. **Средний запас QoT** — средний запас до порога QoT на обслуженных соединениях. Показатель используется для оценки устойчивости работы сети и снижения риска деградации качества передачи.

Корректность сравнения обеспечивалась равенством исходных условий: одинаковые топологии, одинаковые реализации временных рядов трафика $C_{req}(t)$, одинаковые пороги QoT и одинаковые правила доступности спектрального ресурса. Отличие подходов заключается только в наличии или отсутствии адаптивного выбора режима транспондера и динамического пересчёта допустимых конфигураций в предложенном методе.

Вычислительный эксперимент реализован в виде дискретно-временной эмуляции работы T-SDN контроллера. На каждом шаге времени t контроллер получает актуальные требования трафика $C_{req}(t)$ и текущее состояние сети, после чего выполняет последовательность действий:

1. **Обновление состояния.** Фиксация свободных и занятых спектральных слотов на линиях, регистрация активных соединений и их текущих конфигураций, обновление наблюдаемых параметров QoT.

2. **Генерация потенциально реализуемых конфигураций.** Формирование множества кандидатов на основе доступных конфигураций транспондера и доступных спектральных блоков на маршруте. При необходимости кандидаты ограничиваются верхней границей для соблюдения требований по времени расчёта.

3. **QoT-оценка.** Для каждого кандидата выполняется быстрая оценка качества передачи на основе ML-модели QoT с учётом параметров оптического тракта. Кандидаты, не удовлетворяющие порогам QoT, исключаются из дальнейшего рассмотрения.

4. **Фильтрация по ресурсам.** Проверка наличия непрерывного спектрального блока требуемой ширины на всех рёбрах выбранного маршрута с учётом правила размещения.

5. **Ранжирование.** Оставшиеся допустимые кандидаты сортируются по критерию рациональности. Выбирается конфигурация с наилучшим значением критерия при условии соблюдения ограничений (например, запрет слишком частых переключений).

6. **Конфигурация.** Выбранный режим передаётся на исполнительный модуль конфигурирования транспондера и управления выделением спектра.

7. **Пост-верификация.** В течение окна шагов контроллер контролирует подтверждение QoT. При неподтверждении выполняется переход к предыдущему режиму передачи либо переход к следующему допустимому кандидату из ранжированного списка.

8. **Логирование результатов.** На каждом шаге сохраняются $C_{req}(t)$, занятый спектральный блок, выбранный режим передачи (M, N_{sc}, P_{tx}) , факт реконфигурации, факт

переход к предыдущему режиму передачи и показатели QoT. На основе журналов рассчитываются итоговые метрики эффективности.

Такой протокол эмуляции позволяет оценить работу алгоритма в динамике, включая устойчивость к флуктуациям QoT и реальную стоимость адаптивности в виде числа реконфигураций и переходов к предыдущему режиму передачи.

Предложенная методика ориентирована на практическую интеграцию в контур T-SDN и поэтому использует упрощения, обеспечивающие вычислительную реализуемость. При интерпретации результатов следует учитывать следующие ограничения.

1. Ограниченность физической модели QoT.

QoT-оценка в контуре управления основана на ML-предикторе, обученном на данных прямого моделирования и симуляций. Точность прогноза гарантируется только в пределах диапазонов параметров, покрытых обучающей выборкой (по длине тракта, OSNR, профилям передачи и спектральному ресурсу). Вне этих диапазонов возможны ошибки предсказания, компенсируемые механизмами пост-верификации и перехода к предыдущему режиму передачи.

2. Упрощения по нелинейным и каскадным эффектам.

В ряде сценариев могут быть не учтены или учтены приближённо нелинейные искажения и каскадные фильтрационные эффекты (ROADM/WSS и детальная частотная зависимость характеристик каскада узлов). Это ограничивает применимость модели для длинных многоузловых маршрутов с выраженной каскадной фильтрацией и высокой спектральной нагрузкой.

3. Ограниченная наблюдаемость состояния линии.

В реальной сети параметры состояния оптического тракта доступны по телеметрии с конечной частотой обновления и погрешностью (OSNR, EVM, BER). В работе предполагается, что эти параметры доступны в форме наблюдений или оценок, достаточных для работы QoT-фильтрации. Для практического внедрения требуется согласование источников телеметрии и порогов верификации.

4. Компромисс между эффективностью и стабильностью.

Адаптивный выбор режима неизбежно увеличивает число реконфигураций. Для предотвращения частого переключения режимов передачи требуется введение штрафа при ранжировании. Конкретные настройки должны подбираться под требования сервиса и допустимую динамику управления.

Таким образом, предложенный подход следует рассматривать как основу для QoT управления, корректность которой обеспечивается сочетанием быстрого предиктора и защитных механизмов верификации, а также как методику, пригодную для дальнейшего расширения за счёт более детальных моделей и телеметрии.

Для повышения полноты оценки рассматриваются следующие сценарии:

Сценарий 1. Динамический трафик в пределах одного диапазона спектра.

Проверяется способность алгоритма снижать долю неудовлетворённого трафика и спектральный расход при изменяющихся требованиях сервиса. Фиксируются вероятность блокировки, спектральный расход, пропускная способность, число реконфигураций, доля переходов к предыдущему режиму передачи, средний запас по QoS.

Сценарий 2. Сравнение Fixed Grid и Flex-Grid при одинаковой нагрузке.

Проверяется влияние гранулярности выделения спектра на эффективность: блокировки, расход спектра и спектральная эффективность. Показано, что гибкая сетка частот снижает потери квантования полосы и повышает эффективность использования спектра при неоднородном трафике.

Сценарий 3. Отказ линии и восстановление.

Имитируется отказ одного из участков тракта или изменение доступности спектра на маршруте. Оцениваются время восстановления (в терминах числа шагов управления), число реконфигураций, доля переходов к предыдущему режиму и устойчивость QoS после восстановления.

Сценарий 4. Расширение ресурсной модели.

Рассматривается расширенный спектральный ресурс (например, использование дополнительных полос), что позволяет оценить масштабируемость алгоритма и влияние доступной полосы на блокировки и экономию спектра.

Практическая реализация предложенного метода ориентирована на высокодинамичные сети. Суммарное время выполнения алгоритма выбора режима и его аппаратной инициализации (переключение профилей DSP и стабилизация уровней мощности через VOA) составляет от 15 до 40 мс. Такая скорость перестройки позволяет минимизировать накопление неудовлетворенного трафика в периоды пиковых нагрузок и соответствует требованиям к управляемости транспортной инфраструктуры сетей 6G.

На рисунке 5.3 представлен график динамики трафика и выделенной ёмкости. При росте требований по скорости передачи адаптивный транспондер увеличивает число активных поднесущих, а при достаточном OSNR повышает порядок модуляции, тем самым ограничивая рост занимаемой спектральной полосы. Видно, что адаптивный выбор режима транспондера позволяет более точно подстраивать выделение ресурсов под текущие требования, снижая накопление неудовлетворённого трафика в периоды пиковых нагрузок.

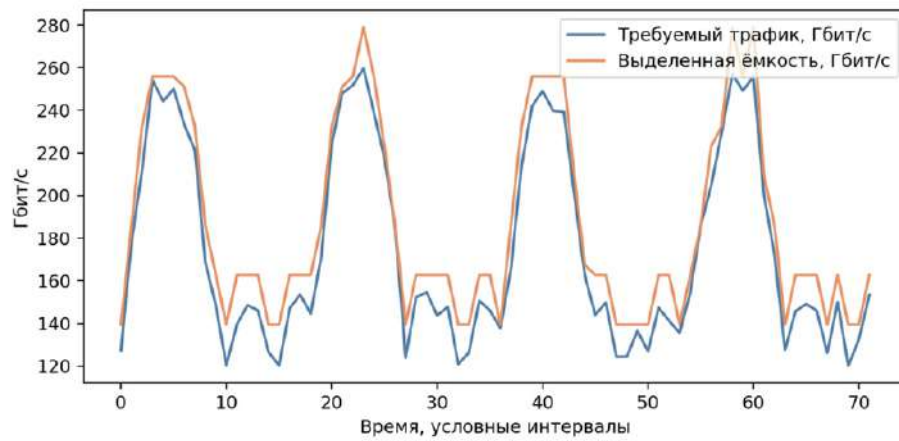


Рисунок 5.3 График динамики требуемого трафика и выделенной ёмкости

На рисунке 5.4 и 5.5 показаны временные зависимости числа активных поднесущих и уровня формата модуляции сигнала.

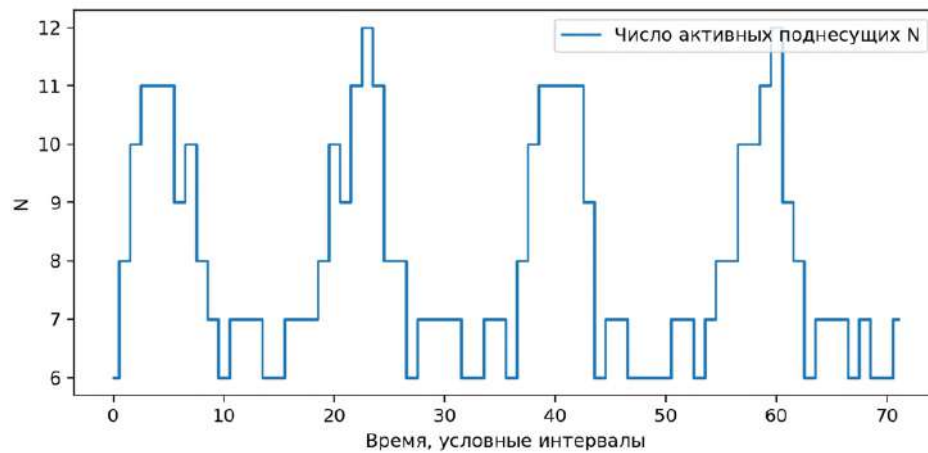


Рисунок 5.4 Динамика количества активных поднесущих

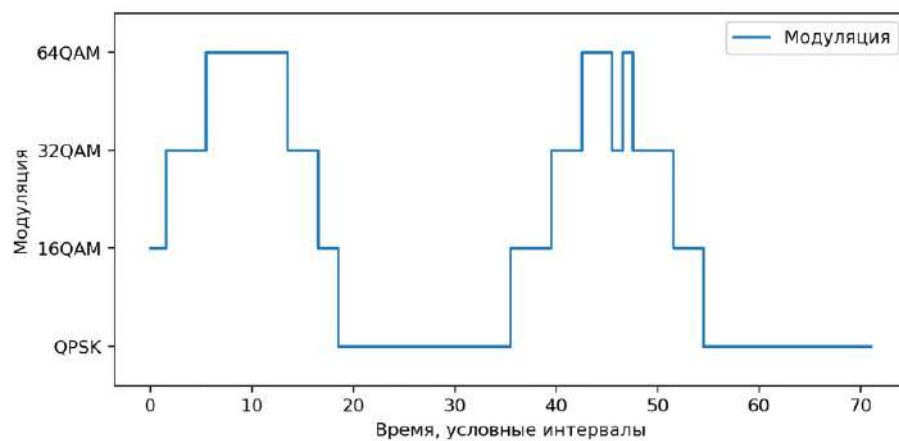


Рисунок 5.5 Перенастройка уровней модуляции во времени

При ухудшении OSNR и BER T-SDN-контроллер понижает уровень модуляции на адаптивном транспондере и компенсирует снижение спектральной эффективности увеличением количества поднесущих, а при улучшении выполняет обратный переход с учётом введенных ранее ограничений. Переключения режима коррелируют с изменением требований трафика и условий QoT, при этом введенные ограничения предотвращают частое изменение режима передачи при кратковременных колебаниях.

На рисунке 5.6 показана ступенчатая адаптация транспондера. При улучшении OSNR происходит переключение на использование более эффективных форматов модуляции, тогда как традиционный транспондер остается на фиксированном уровне, независимо от качества связи в канале. Даже если OSNR высокий, он продолжает использовать низкоэффективную модуляцию, так как был сконфигурирован с запасом на худший случай.

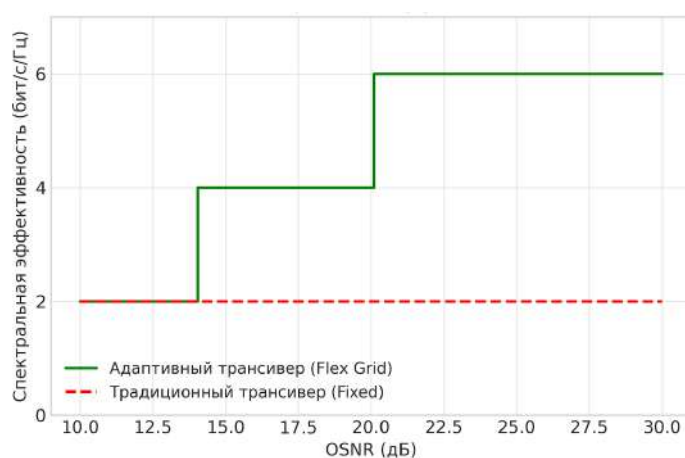


Рисунок 5.6 График зависимости спектральной эффективности от OSNR в канале связи

Сравнительная оценка по агрегированным метрикам представлена в таблице 5.8. По сравнению с базовым подходом предложенный метод обеспечивает снижение вероятности блокировки на 5 п.п. (рис. 5.7), снижение доли неудовлетворённого трафика на 4 п.п., снижение спектрального расхода на 35 ГГц, увеличение среднего запаса Δ OSNR на 0,3 дБ.

Таблица 5.8 Сравнение базового подхода First-Fit с предложенным методом

Метрика	First-Fit	Предложенный метод
Вероятность блокировки	15 %	10 %
Доля неудовлетворённого трафика	8 %	4 %
Средний спектральный расход	220 ± 4 ГГц/соединение	185 ± 3 ГГц/соединение
Пропускная способность (нормированная)	1,00	$1,10 \pm 0,02$
Доля реконфигураций	25 %	37 %
Доля переходов к предыдущей конфигурации	5 %	3,5 %
Средний запас Δ OSNR	$1,5 \pm 0,1$ дБ	$1,8 \pm 0,1$ дБ

Одновременно наблюдается рост числа реконфигураций на 12 п.п., что является ожидаемой платой за адаптивность. Однако доля переходов к предыдущей конфигурации

составляет 3,5 %, что подтверждает устойчивость алгоритма и корректность отбора допустимых режимов по QoT-оценке (рис. 5.8).

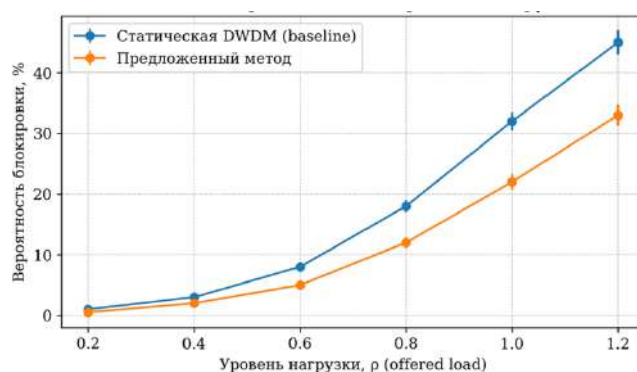


Рисунок 5.7 Вероятность блокировки в зависимости от уровня нагрузки

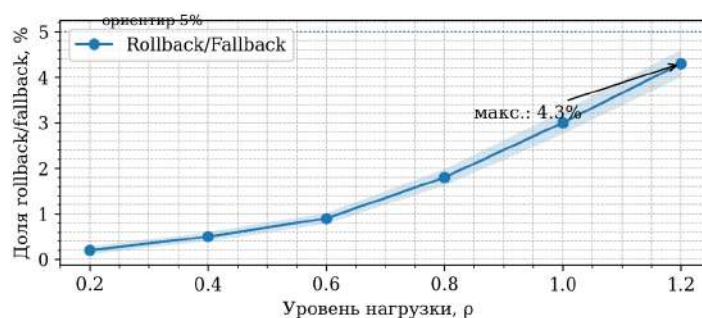


Рисунок 5.8 Доля переходов к предыдущей конфигурации в зависимости от нагрузки

Для визуализации компромиссов между пропускной способностью C_{req} , длиной маршрута L и маржой QoT в T-SDN контроллере используется matplotlib. Визуализация 3D Парето-фронта выделяет оптимальные режимы передачи, доминирующие по всем трём целевым параметрам (рис. 5.9).

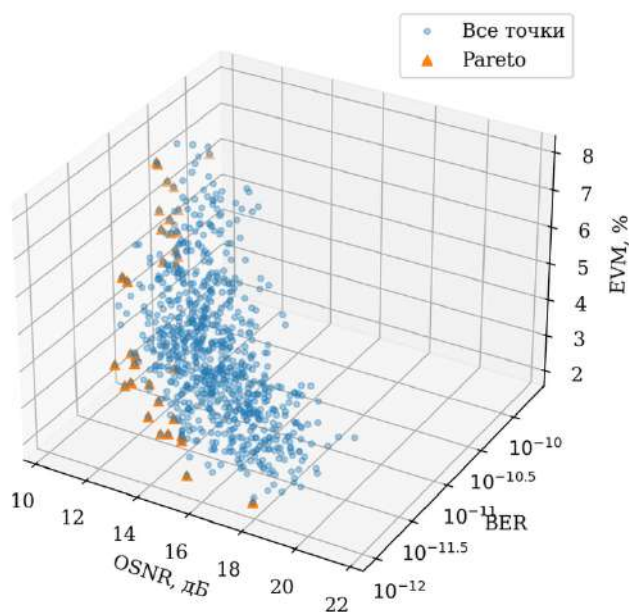


Рисунок 5.9 3D Парето-фронт в пространстве QoT: OSNR, BER, EVM

Для сопоставления предложенного решения с существующими QoT-aware RMSA-алгоритмами были использованы результаты работ F. Arpanaei, Z. Zhu и др. [26, 27, 107], в которых рассматриваются классические RMSA подходы для гибких оптических сетей с учётом QoT-ограничений и фрагментации спектра. Для обеспечения объективности сравнительного анализа предложенного метода с классическим алгоритмом QoT-aware RMSA (Arpanaei et al. [26]), условия моделирования были максимально синхронизированы по ключевым параметрам. Значения для Arpanaei et al. приняты за базовый уровень ($1,0 = 100\%$), значения для предложенного метода нормированы относительно базового. Пропускная способность приведена в нормированных единицах, где 1,00 соответствует пропускной способности базового метода при той же нагрузке.

Основное отличие в условиях эксперимента заключалось в модели физического уровня:

1. В подходе Arpanaei et al. учитывались только усредненные пороги OSNR для фиксированных профилей передачи без учета внутренней структуры суперканала.
2. В предложенном методе учитывались аппаратные штрафы AWGR, электрическая полоса модуляторов и неравномерность спектра.

В качестве ключевых метрик сравнения выбраны:

1. Вероятность блокировки — доля заявок, для которых не удалось сформировать допустимое соединение при заданном уровне нагрузки;
2. Доля соединений с нарушением QoT-ограничений — отношение числа установленных соединений, для которых $BER > BER_{th}$ к общему числу установленных соединений;
3. Нормированная пропускная способность сети — относительная средняя пропускная способность сети при соблюдении заданных требований по QoT.

Таблица 5.9 Сравнение с QoT-aware RMSA (по Arpanaei et al.) при разной нагрузке в сети

Требуемая скорость C_{req} (Гбит/с)	Подход	Вероятность блокировки	QoT	Нормированная пропускная способность
50	QoT-aware RMSA (Arpanaei et al.)	1,0	1,0	1,00
50	Предложенный метод	0,9	0,6	1,02–1,05
100	QoT-aware RMSA (Arpanaei et al.)	1,0	1,0	1,00
100	Предложенный метод	0,8	0,5	1,05–1,10
150	QoT-aware RMSA (Arpanaei et al.)	1,0	1,0	1,00
150	Предложенный метод	0,7–0,8	0,4–0,5	1,08–1,12

Снижение вероятности блокировки на 20 % в условиях высокой нагрузки объясняется способностью предложенного алгоритма динамически подбирать число поднесущих и ширину

защитных интервалов в реальном времени, что позволяет размещать трафик в фрагментированных участках спектра, которые классический алгоритм посчитал бы непригодными из-за отсутствия запаса по QoT.

Анализ данных таблицы 5.9 показывает, что при увеличении нагрузки с 50 до 250 Гбит/с предложенный подход с учётом аппаратных характеристик адаптивного транспондера и ML-оценками QoT демонстрирует устойчивое снижение вероятности блокировок на 20 % и уменьшение доли QoT-нарушений почти в 2 раза по сравнению с классическим QoT-aware RMSA по Arpanaei et al., при этом обеспечивая прирост нормированной пропускной способности в среднем на 10 % в зависимости от уровня загрузки сети.

Полученный масштаб выигрыша по снижению количества блокировок сопоставим с улучшениями, демонстрируемыми в QoT-aware RBMSA-подходах Arpanaei et al. для динамических сценариев, однако в данной работе улучшение достигается при дополнительном учёте аппаратных ограничений формирования суперканала и наличии пост-верификации QoT, что обеспечивает устойчивость режима передачи в условиях изменчивости физического уровня.

Такое сравнение демонстрирует, что интеграция T-SDN-контроллера, ML-оценок QoT и учета аппаратных характеристик адаптивного оптического транспондера позволяет снизить вероятность блокировок и частоту QoT-нарушений по сравнению с классическими RMSA-алгоритмами при сопоставимых условиях нагрузки и топологии. При этом полученные выигрыши достигаются за счёт более точного соответствия выбранного режима передачи реальному качеству передачи, а не только аналитическим оценкам, использующим упрощённые модели искажений.

Таким образом T-SDN-контроллер реализует три согласованных механизма адаптации: масштабирование полосы пропускания через изменение числа активных поднесущих, повышение спектральной эффективности через выбор формата модуляции сигнала и переконфигурацию транспондера при изменении условий в оптическом тракте. Совокупность этих механизмов соответствует требованиям к транспортной инфраструктуре 6G в части управляемости и масштабируемости ёмкости каналов передачи при сохранении заданного уровня QoT [62-66].

5.6. Выводы по пятой главе

Разработана архитектура программного модуля выбора рационального режима передачи адаптивного оптического транспондера для T-SDN контроллера, обеспечивающая полный цикл управления. Сформулирован и реализован алгоритм решения обратной задачи конфигурирования по заданным требованиям сервиса и условиям оптического тракта на основе каталога допустимых режимов и QoT-ограничений. Показано, что ключевым практическим

этапом является формирование множества кандидатов и последовательная их фильтрация: сначала по QoT, а затем по спектральным ресурсам, что резко сокращает пространство поиска.

В качестве быстрого оценщика QoT использован ML-предиктор, что позволяет применять QoT-фильтрацию и ранжирование в режиме, совместимом с работой T-SDN контроллера. ML-предиктор выступает своего рода быстрой моделью для предварительного отбора, а окончательная корректность обеспечивается верификацией после применения выбранного режима передачи на реальном оптическом тракте.

На дискретно-временной эмуляции показано, что адаптивный выбор режима передачи позволяет согласовывать выделение спектральных ресурсов с динамикой трафика, снижая долю неудовлетворённого спроса и спектральный расход по сравнению со статической настройкой, при этом ценой за адаптивность выступает рост числа реконфигураций транспондера.

Проведено сравнение подходов для разных вариантов частотной сетки. Использование адаптивных оптических транспондеров обеспечивает более точное соответствие занимаемой спектральной полосы требованиям сервисов и потенциал повышения спектральной эффективности относительно гибкой сетки частот, что особенно важно при неоднородном трафике.

К направлениям дальнейших исследований относятся развёртывание программной эмуляции T-SDN-контроллера на базе платформ ONOS/OpenDaylight для верификации алгоритма реконфигурации в условиях, приближённых к промышленным системам управления телекоммуникациями, а также расширение модели QoT с учётом каскадных фильтрационных эффектов и соответствующей адаптацией ML-предиктора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложен один из вариантов решения актуальной проблемы, связанной с разработкой методов выбора и реконфигурации режимов передачи информации адаптивных оптических транспондеров для гибких сетей, являющихся инфраструктурной основой систем связи шестого поколения. В результате её реализации были получены следующие результаты:

1. Проведён анализ существующих архитектур адаптивных оптических транспондеров, способов формирования суперканалов и методов управления гибкими оптическими сетями. Показано, что известные подходы к решению задач RSA/RMSA и QoT-aware управления в большинстве случаев используют упрощённую модель транспондера и недостаточно учитывают внутреннюю структуру суперканала, влияние AWGR, ограничения электрической полосы и неравномерность качества передачи. На основании проведённого анализа сформулирован научный зазор, состоящий в отсутствии сквозного метода выбора и реконфигурации режимов передачи, который одновременно учитывал бы параметры аппаратной реализации транспондера, характеристики оптического тракта и требования к качеству передачи в контуре T-SDN.

2. Разработана математическая модель режима передачи адаптивного оптического транспондера, связывающая формат модуляции, число активных поднесущих, мощность передачи, параметры спектрального окна и характеристики тракта с показателями качества передачи. На её основе сформированы критерии допустимости и рациональности выбора режима передачи, позволяющие перейти от описания множества потенциально возможных конфигураций к множеству конфигураций, реализуемых в условиях конкретного маршрута и удовлетворяющих ограничениям по QoT. Тем самым в работе получен формальный аппарат для решения обратной задачи конфигурирования транспондера по параметрам оптического тракта.

3. Разработана архитектура адаптивного оптического транспондера, ориентированная на формирование и реконфигурацию OFDM-суперканалов в гибких оптических сетях. В рамках параметрического исследования, выполненного в среде OptiSystem и с использованием программной обработки результатов в Python, получены зависимости показателей качества передачи от параметров аппаратной структуры устройства и оптического тракта. В частности, показано влияние шага каналов AWGR 25 ГГц, полосы канала AWGR по уровню -3 дБ около 23 ГГц и электрической полосы модулятора 25 ГГц на формирование QoT-ограничений и область допустимых режимов передачи. Для различных форматов модуляции заданы пороговые значения OSNR, а также запас по QoT 1,5 дБ, что позволило перейти к построению области допустимых и рациональных режимов работы транспондера.

4. Проведено параметрическое исследование влияния параметров транспондера на QoT, по результатам которого показано, что допустимость режима определяется не отдельными параметрами, а их согласованным сочетанием. Количественно доказано, что лимитирующим фактором качества суперканала являются его краевые поднесущие, подверженные фильтрационному сужению и влиянию межподнесущей интерференции в AWGR. Установлено, что рассогласование электрической полосы сигнала и полосы канала AWGR приводит к резкому росту EVM. Выявлено, что интеграция AWGR в схему транспондера вносит эквивалентный штраф порядка 1,6 дБ по OSNR для высокоуровневых форматов модуляции (64QAM), что формирует жесткие границы области допустимых режимов.

5. Разработаны методика выбора режима передачи и алгоритм реконфигурации адаптивного оптического транспондера в контуре T-SDN. Предложенный подход включает формирование множества потенциально реализуемых конфигураций, быструю оценку QoT, отбор допустимых режимов, их ранжирование и последующую верификацию результата после применения новой конфигурации. Для ускорения выбора режима сформирован набор данных из 10000 конфигураций транспондера, содержащий параметры режима передачи и соответствующие значения BER, Q и EVM, на основе чего построен ML-предиктор QoT, используемый как быстрый инструмент фильтрации и оценки потенциально реализуемых решений. Это позволило сократить вычислительную сложность процедуры выбора режима и сделать возможным её применение в задачах динамической реконфигурации соединений.

6. Эффективность разработанного метода выбора рационального режима передачи адаптивного оптического транспондера подтверждена вычислительным экспериментом на имитационной модели динамического трафика в топологии кольцо с хордами, содержащей 14 узлов и 21 двунаправленное соединение. По сравнению с базовым подходом First-Fit предложенный метод обеспечивает снижение вероятности блокировки с 15 % до 10 %, снижение доли неудовлетворённого трафика с 8 % до 4 %, уменьшение среднего спектрального расхода с 220 до 185 ГГц на соединение и увеличение среднего запаса Δ OSNR с 1,5 до 1,8 дБ. Нормированная пропускная способность сети возрастает до 1,08–1,12 относительно базового подхода. При этом рост числа реконфигураций на 12 % является ожидаемой платой за адаптивность, тогда как доля переходов к предыдущей конфигурации снижается до 3,5 %, что подтверждает устойчивость алгоритма и корректность отбора допустимых режимов по QoT-оценке.

Полученные результаты подтверждают, что выбор и реконфигурация режимов передачи адаптивного транспондера позволяют переходить от статического резервирования «под худший случай» к управлению, согласующему параметры передачи с реальными условиями оптического тракта и текущим спросом на пропускную способность.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ADC** — analog-to-digital converter, аналого-цифровой преобразователь
- AWGR** — arrayed waveguide grating router, маршрутизатор на основе волноводной дифракционной решетки
- BER** — bit error rate, коэффициент битовых ошибок
- BVT** — bandwidth-variable transponder, транспондер с переменной полосой пропускания
- C-band** — диапазон оптических длин волн от 1530 нм до 1565 нм
- DAC** — digital-to-analog converter, цифро-аналоговый преобразователь
- DSP** — digital signal processor, цифровой сигнальный процессор
- DWDM** — dense wavelength division multiplexing, плотное спектральное уплотнение по длине волны
- EDFA** — erbium-doped fiber amplifier, эрбиевый волоконно-оптический усилитель
- EON** — elastic optical network, гибкая оптическая сеть
- ER** — extinction ratio, коэффициент экстинкции модулятора
- EVM** — error vector magnitude, векторная ошибка модуляции
- FEC** — forward error correction, прямое исправление ошибок
- FFT** — fast Fourier transform, быстрое преобразование Фурье
- Flex-Grid** — гибкая сетка частот
- FPGA** — field-programmable gate array, программируемая пользователем вентильная матрица
- FPR** — область свободного распространения
- ICI** — inter-carrier interference, межканальные перекрёстные помехи
- IFFT** — inverse fast Fourier transform, обратное быстрое преобразование Фурье
- IQ-MZM** — IQ Mach-Zehnder modulator, квадратурный модулятор Маха–Цендера
- MZM** — Mach-Zehnder modulator, модулятор Маха–Цендера
- NLI** — nonlinear interference, нелинейные искажения
- OCR** — optical coherent receiver, когерентный оптический приёмник
- OFC** — optical frequency comb, оптическая частотная гребёнка
- OFDM** — orthogonal frequency division multiplexing, ортогональное частотное мультиплексирование
- OSNR** — optical signal-to-noise ratio, оптическое отношение сигнал/шум
- PAPR** — peak-to-average power ratio, отношение пиковой мощности к средней
- QoT** — quality of transmission, качество передачи
- QPSK** — quadrature phase-shift keying, квадратурная фазовая манипуляция
- QAM** — quadrature amplitude modulation, квадратурная амплитудная модуляция
- RSA** — routing and spectrum allocation, маршрутизация и назначение спектра
- RMSA** — routing, modulation and spectrum allocation; маршрутизация, выбор формата модуляции и назначение спектра
- ROADM** — reconfigurable optical add-drop multiplexer, реконфигурируемый оптический мультиплексор ввода-вывода
- Rx** — receiver, приёмник
- S-BVT** — sliceable bandwidth-variable transponder, нарезаемый транспондер с переменной полосой пропускания
- SDM** — space division multiplexing, пространственное мультиплексирование
- SDN** — software-defined networking, программно-конфигурируемая сеть
- SFP** — small form-factor pluggable, малогабаритный сменный трансиверный модуль
- SoC** — system-on-a-chip, система на кристалле
- T-SDN** — transport software-defined networking, транспортные программно-конфигурируемые сети
- Tx** — transmitter, передатчик
- VOA** — variable optical attenuator, переменный оптический аттенюатор
- WDM** — wavelength division multiplexing, спектральное уплотнение по длине волны

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

N	— число активных поднесущих
M	— формат модуляции
i	— индекс поднесущей
λ	— центральная длина волны (нм)
f_c	— центральная частота оптического суперканала (ТГц)
Δf	— шаг между поднесущими (ГГц)
G	— защитный интервал между поднесущими (ГГц)
R	— скорость передачи суперканала (Гбит/с)
R_i	— символьная скорость на поднесущей (Гбод)
R_s	— символьная скорость (Гбод)
B_{sc}	— ширина суперканала (ГГц)
B_e	— электрическая полоса формируемого I/Q-сигнала (ГГц)
B_{AWGR}	— эффективная полоса пропускания канала AWGR (ГГц)
n_{slot}	— число спектральных слотов
P_i	— мощность на i -й поднесущей (дБм)
P_{tx}	— суммарная мощность суперканала (дБм)
P_{max}	— максимально допустимая суммарная мощность суперканала (дБм)
$SE(x)$	— спектральная эффективность режима передачи (бит/с/Гц)
$OSNR_i$	— оптическое отношение сигнал/шум на i -й поднесущей
$OSNR_{th}$	— пороговое значение OSNR
BER_i	— коэффициент битовых ошибок на i -й поднесущей
BER_{th}	— пороговое значение коэффициента битовых ошибок
EVM_i	— векторная ошибка модуляции на i -й поднесущей
EVM_{th}	— пороговое значение вектора ошибка модуляции
QoT	— запас по качеству передачи
C_{req}	— требуемая скорость передачи для обслуживания трафика (Гбит/с)
G_{EDFA}	— усиление EDFA (дБ)
NF	— коэффициент шума усилителя EDFA (дБ)
ER	— коэффициент экстинкции MZM (дБ)
V_π	— полуволновое напряжение MZM (В)
U_{RF}	— размах управляющего СВЧ-сигнала MZM (В)
XT_{adj}	— перекрёстные помехи от соседнего канала (дБ)
XT_{nonadj}	— перекрёстные помехи от несоседнего канала (дБ)
B_{avail}	— доступный непрерывный спектральный блок (ГГц)
ΔP_{eq}	— неравномерность спектра до/после эквалайзинга (дБ)
L	— длина оптического тракта (км)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аль-Кереа, З. А. Х.* Архитектурная эволюция сетей: распределенный интеллект и конвергенция космических, воздушных, наземных и подводных сетей связи / З. А. Х. Аль-Кереа, А. С. А. Мутханна, А. Е. Кучерявый // *Электросвязь*. – 2025. – № 10. – С. 63–71. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=83144182> (дата обращения: 14.03.2026).
2. *Блан, Ф. С.* Перспективная архитектура сетей, определяемых знаниями (KDN) / Ф. С. Блан, В. С. Елагин // *Труды учебных заведений связи*. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 67–82. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82309551> (дата обращения: 14.03.2026).
3. *Былина, М. С.* Оптоэлектронные технологии в инфокоммуникациях: современное состояние и перспективы / М. С. Былина, С. Ф. Глаголев. // *Первая миля*. — 2024. — № 7 (123). — С. 52–59. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=76061729> (дата обращения: 14.03.2026).
4. *Волков, А.Н.* Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в Лаборатории 6G Meganetlab СПбГУТ / А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый и др. // *Электросвязь*. – 2023. – № 6. – С. 5-14. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54266215> (дата обращения: 14.03.2026).
5. *Волков, А. Н.* Туманные вычисления в сетях IMT-2030 для услуг телеприсутствия / А. Н. Волков, А. Е. Кучерявый // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления : сборник научных трудов. – М., 2024. – С. 2295–2297. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=79487319> (дата обращения: 14.03.2026).
6. *Кучерявый, А. Е.* Методы распределения трафика в гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности / А. Е. Кучерявый, Д. В. Окунева, А. И. Парамонов, Н. Ф. Хоанг // *Труды учебных заведений связи*. — 2024. — Т. 10, № 2. — С. 67–74. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65846413> (дата обращения: 14.03.2026).
7. *Кучерявый, А.Е.* Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети / А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов, М.А. Маколкина и др. // *Электросвязь*. – 2022. – № 3. – С. 1-12. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50092893> (дата обращения: 14.03.2026).
8. *Трешиков, В.Н.* DWDM системы: научное издание / В.Н. Трешиков, В.Н. Листвин – М. : Техносфера, 2024. – 476 с. — URL: <https://www.technosphera.ru/lib/book/738> (дата обращения: 14.03.2026).
9. *Коган, С. С.* Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM / С. С. Коган, О. Е. Наний, В. Н. Трешиков // *Прикладная фотоника*. — 2024. — Т. 11, № 1. — С. 84–98. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68573093> (дата обращения: 14.03.2026).
10. *Fadeenko, V. B.* New design of fiber-optic communication line for the transmission of microwave signals in the X-band / V. B. Fadeenko, V. A. Kuts, D. A. Vasiliev [et al.] // *Journal of*

Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1135, no. 1. – Art. 012053. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1135/1/012053/pdf> (дата обращения: 14.03.2026).

11. *Фокин, В.Г.* Гибкие оптические сети: учебное пособие для вузов / В.Г. Фокин, Р.З. Ибрагимов. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 252 с. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48523400> (дата обращения: 14.03.2026).

12. *Франчук, О.С.* Сравнительный анализ оптических сетей и гибких оптических сетей / О.С. Франчук // Е-SCIO. - 2023. - №4 (79). - С. 91-99. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53951718> (дата обращения: 14.03.2026).

13. *Богомолова, С. П.* Обзор оборудования для построения гибких оптических сетей 5G / С. П. Богомолова, В. Г. Фокин // Инновации и научно-техническое творчество молодежи : сборник трудов конференции. — 2022. — С. 1054–1058. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48675821> (дата обращения: 14.03.2026).

14. *Фокин, В. Г.* Исследование развития функциональной гибкости оптических транспортных сетей OTN-ОТН / В. Г. Фокин // Современные проблемы телекоммуникаций : сборник трудов конференции. — 2024. — С. 31–37. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68453524> (дата обращения: 14.03.2026).

15. *Поповский, Н.И.* Гибкие оптические сети и способы реализации оптических суперканалов / Н.И. Поповский, В.В. Давыдов // Электросвязь. — 2024. — № 8. — С. 44-47. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=70571859> (дата обращения: 14.03.2026).

16. *Гаврилова, А. Н.* Балансировка нагрузки в сети SDN с применением технологии MEC / А. Н. Гаврилова, В. С. Елагин // Электросвязь. — 2024. — № 12-2. — С. 10–15. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=79719461> (дата обращения: 14.03.2026).

17. *Дмитриева, Ю. С.* Анализ методов идентификации трафика для управления ресурсами в SDN / Ю. С. Дмитриева, Д. В. Окунева, В. С. Елагин // Труды учебных заведений связи. — 2023. — Т. 9, № 6. — С. 42–57. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56946379> (дата обращения: 14.03.2026).

18. *Nadal, L.* Programmable SDN-enabled S-BVT based on hybrid electro-optical MCM / L. Nadal, M. S. Moreolo, J. Fabrega [et al.] // Journal of Optical Communications and Networking. — 2018. — Vol. 10, no. 6. — P. 593–602. — URL: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-10-6-593> (дата обращения: 14.03.2026).

19. *Ujjwal, Y.* Review and analysis of elastic optical network and sliceable bandwidth variable transponder architecture / Y. Ujjwal, J. Thangaraj // Optical Engineering. - 2018. - Vol. 57, Iss. 11. - P. 110802. — URL: <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.11.110802> (дата обращения: 14.03.2026).

20. Коган, С. С. Транспортные ВОСП большой пропускной способности / С. С. Коган // Первая миля. – 2024. – № 2 (118). – С. 44–54. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=66334699> (дата обращения: 14.03.2026).
21. Коган, С. С. Эволюция транспортных волоконно-оптических систем передачи / С. С. Коган // Первая миля. – 2025. – № 7 (131). – С. 60–69. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=86105718> (дата обращения: 14.03.2026).
22. Jinno, M. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [Topics in Optical Communications] / M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, et al. // IEEE Communications Magazine. — 2010. — Vol. 48, no. 8. — P. 138–145. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5534599> (дата обращения: 14.03.2026).
23. Chen, X. DeepRMSA: A Deep Reinforcement Learning Framework for Routing, Modulation and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks / X. Chen, B. Li, R. Proietti, Z. Zhu, S. J. B. Yoo // Journal of Lightwave Technology. — 2019. — Vol. 37, no. 16. — P. 4155–4163. — URL: <https://arxiv.org/abs/1905.02248> (дата обращения: 14.03.2026).
24. Castoldi, P. Control of Optical Networks: a Reality Check and Future Perspectives / P. Castoldi [et al.] // Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2024). — Frankfurt, 2024. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10926392/> (дата обращения: 14.03.2026).
25. Cincotti, G. Enhanced Optical Communications Through Joint Time-Frequency Multiplexing Strategies / G. Cincotti, N. Wada, H. Uenohara [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2019. — P. 346–351. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8844837> (дата обращения: 14.03.2026).
26. Arpanaei, F. Evaluating QoT-Aware Hybrid Grooming Schemes in Dynamic C+L-Band Optical Networks / F. Arpanaei, M. Dibaj, A. Dibaj [et al.] // Journal of Optical Communications and Networking. — Optica Publishing Group, 2025. — P. 1–13. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11230132> (дата обращения: 14.03.2026).
27. Etezadi, E. Joint Fragmentation - and QoT-Aware RBMSA in Dynamic Multi-Band Elastic Optical Networks / E. Etezadi, F. Arpanaei, C. Natalino [et al.] // 2024 24th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). — IEEE, 2024. — P. 1–5. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10648045> (дата обращения: 14.03.2026).
28. Ravipudi, J. L. Machine-learning-based impairment-aware dynamic RMSA in multi-core elastic optical networks / J. L. Ravipudi, M. Brandt-Pearce // Journal of Optical Communications and Networking (JOCN). — 2024. — Vol. 16, no. 10. — P. F26–F39. — URL: <https://opg.optica.org/jocn/fulltext.cfm?uri=jocn-16-10-F26> (дата обращения: 14.03.2026).
29. Radovic, M. Super-channel spectrum saving optimization procedure in elastic optical networks / M. Radovic, A. Sgambelluri, F. Cugini [et al.] // Journal of Optical Communications and Networking. —

2023. – Vol. 15, Iss. 2. – P. 68–77. — URL: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-15-2-68> (дата обращения: 14.03.2026).

30. *Фриман, Р.* Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2007. – 512 с. — URL: <https://www.technosfera.ru/lib/book/162> (дата обращения: 14.03.2026).

31. *Аль-Кереа, З. А. Х.* Интеллектуальная бессерверная вычислительная система для услуг телеприсутствия / З. А. Х. Аль-Кереа, А. С. А. Мутханна, А. Е. Кучерявый // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11, № 4. – С. 18–27. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82836317> (дата обращения: 14.03.2026).

32. *Волков, А. Н.* Сетевая вселенная / А. Н. Волков, А. Е. Кучерявый, А. С. А. Мутханна // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : сборник трудов конференции. – 2024. – С. 9–11. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67337462> (дата обращения: 14.03.2026).

33. *Бурдин, А.В.* Моделирование микроструктурированных оптических волокон с учётом флуктуаций геометрии в пакете Comsol Multiphysics / А.В. Бурдин, А.С. Евтушенко, М.В. Дашков // Фотон-экспресс. – 2023. – № 6 (190). – С. 406–407. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54512734> (дата обращения: 14.03.2026).

34. *Бурдин, А.В.* Исследование маломодовых режимов функционирования ВРБ, записанных в кварцевых закрученных многосердцевинных микроструктурированных оптических волокнах / А. В. Бурдин, М. В. Дашков, В. В. Демидов и др. // Фотон-экспресс. — 2023. — № 6 (190). — С. 412–413. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54512739> (дата обращения: 14.03.2026).

35. *Бурдин, В.А.* «Умная» транспортная многоканальная коммуникация волоконно-оптической кабельной линии связи / В. А. Бурдин, А. В. Бурдин, С. А. Гаврюшин, М. В. Дашков // Оптические технологии в телекоммуникациях — 2021 : материалы XIX Международной научно-технической конференции в рамках V Научного форума «Телекоммуникации: теория и технологии» (ТТТ-2021), Самара, 23–26 ноября 2021 г. — Самара : ПГУТИ, 2021. — С. 21. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47301918> (дата обращения: 14.03.2026).

36. *Кукунин, Д.С.* Асинхронная передача данных с использованием многослойных ортогональных структур в системах с кодовым разделением каналов / Д.С. Кукунин, А.А. Березкин, Р.В. Киричек и др. // Электросвязь. – 2023. – № 1. – С. 26–35. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50313705> (дата обращения: 14.03.2026).

37. *Никульский, И.Е.* Оценка задержек в IP-ориентированных сетях доступа / И.Е. Никульский, О.А. Овчинников, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2023. – № 1. – С. 52–58. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50313708> (дата обращения: 14.03.2026).

38. *Пачин, А. В.* Концепция применения интеллектуальных цифровых двойников в системе технического обслуживания инфраструктуры передачи данных / А. В. Пачин, Ю. М. Гурьев, С.

А. Черкасов, Р. В. Киричек // Электросвязь. — 2025. — № 1. — С. 2–7. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80307001> (дата обращения: 14.03.2026).

39. *Пачин, А. В.* Методика применения интеллектуальных цифровых двойников для сокращения времени восстановления работоспособности автоматизированной системы управления / А. В. Пачин, А. А. Березкин, В. В. Бородулин, Р. В. Киричек // Труды Научно-исследовательского института радио. — 2025. — № 1-2. — С. 23–33. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82482175> (дата обращения: 14.03.2026).

40. *Пачин, А. В.* Методы цифровых испытаний аппаратно-программных средств инфраструктуры передачи данных с применением интеллектуальных цифровых двойников / А. В. Пачин, А. В. Лазутин, С. А. Черкасов, Р. В. Киричек // Труды Научно-исследовательского института радио. — 2025. — № 3-4. — С. 177–186. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=86436769> (дата обращения: 14.03.2026).

41. *Адонин, Л. С.* Алгоритмы роевого интеллекта для решения задач оптимизации в системах телекоммуникаций / Л. С. Адонин, А. Г. Владыко // Труды учебных заведений связи. — 2025. — Т. 11, № 3. — С. 7–24. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82605537> (дата обращения: 14.03.2026).

42. *Плотников, П. В.* Анализ подходов к оптимизации V2X-систем: кластеризация, граничные и туманные вычисления / П. В. Плотников, А. Г. Владыко // Труды учебных заведений связи. — 2024. — Т. 10, № 3. — С. 7–22. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68450274> (дата обращения: 14.03.2026).

43. *Владыко, А. Г.* Оценка энергетической эффективности гибридных сетей связи / А. Г. Владыко, Е. И. Глушанков, И. А. Горобцов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2025). — Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2025. — С. 303–307. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=84319166> (дата обращения: 14.03.2026).

44. *Маколкина, М. А.* Исследование трафика мультимедиа, интернета вещей и голографических услуг на модельной сети / М. А. Маколкина, Н. А. Демидов // Электросвязь. — 2024. — № 12-2. — С. 46–52. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=79719465> (дата обращения: 14.03.2026).

45. *Маколкина, М. А.* Исследование средней задержки в сетях связи, предоставляющих телемедицинские услуги / М. А. Маколкина, М. В. Шарлаева // Труды учебных заведений связи. — 2024. — Т. 10, № 3. — С. 59–65. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68450278> (дата обращения: 14.03.2026).

46. *Паньков, Б. О.* Разработка модели предоставления услуг НТС / Б. О. Паньков, Д. С. Свечников, М. А. Маколкина и др. // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского

НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. — 2023. — № 1 (78). — С. 171–174. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53913795> (дата обращения: 14.03.2026).

47. *Владимиров, С. С.* Модернизация протокола NCRP для работы в адаптивных системах с сетевым кодированием / С. С. Владимиров, А. И. Фомин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции, Санкт-Петербург, 2024 г. — Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2024. — С. 205–209. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67337369> (дата обращения: 14.03.2026).

48. *Владимиров, С. С.* Протокол сетевого кодирования IPv6NC на основе расширенных заголовков IPv6 / С. С. Владимиров // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2024. — Т. 12, № 1. — С. 57–69. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74517765> (дата обращения: 14.03.2026).

49. *Владимиров, С. С.* Методы организации адаптивного помехоустойчивого кодирования / С. С. Владимиров, Р. Л. Остапчук, И. Р. Скакунов // Вестник СПбГУТ. — 2024. — Т. 2, № 1. — Арт. 3. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67219757> (дата обращения: 14.03.2026).

50. *Чан, Т. З.* Оптимизация использования ресурсов воздушных базовых станций на основе методов искусственного интеллекта / Т. З. Чан, А. Е. Кучерявый // Труды учебных заведений связи. — 2025. — Т. 11, № 1. — С. 62–68. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80404728> (дата обращения: 14.03.2026).

51. *Гольдштейн, Б. С.* Виртуализация сетевых функций и OSS реального времени. Новые аспекты управления сетями / Б. С. Гольдштейн, А. К. Гринёва // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018) : сборник научных статей VII Международной научно-технической и научно-методической конференции, в 4 т. / под ред. С. В. Бачевского. — СПб. : СПбГУТ, 2018. — Т. 1. — С. 252–255. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35231568> (дата обращения: 14.03.2026).

52. *Гринева, А. К.* Виртуализация сетевых функций vEPC в сетях 5G / А. К. Гринева, Б. С. Гольдштейн // Вестник связи. — 2020. — № 7. — С. 14–20. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44734623> (дата обращения: 14.03.2026).

53. *Гольдштейн, Б. С.* Сдвиг парадигмы тестирования сетевой инфраструктуры 5G/6G / Б. С. Гольдштейн, А. В. Зимин // Вестник связи. — 2025. — № 2. — С. 10–15. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82373887> (дата обращения: 14.03.2026).

54. *Фокин, В. Г.* Функциональные возможности новой модели OTN / В. Г. Фокин // Современные проблемы телекоммуникаций : сборник трудов конференции. — 2025. — С. 52–57. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=83084926> (дата обращения: 14.03.2026).

55. *Фокин, В.Г.* Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи: учебное пособие для вузов / В.Г. Фокин, Р.З. Ибрагимов – Новосибирск : СибГУТИ, 2020. – 180 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28059782> (дата обращения: 14.03.2026).
56. *Чебыкин, И.П.* Сравнение скорости и точности алгоритмов оптимизации волоконно-оптических линий связи / И. П. Чебыкин, Д. Д. Старых, О. Е. Наний, Г. А. Андреев, В. Н. Трещиков. // Журнал технической физики. — 2024. — Т. 94, № 11. — С. 1848–1853. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75082218> (дата обращения: 14.03.2026).
57. *Davydov, V. V.* Fiber-optics system for the radar station work control / V. V. Davydov, N. V. Sharova, E. V. Fedorova [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9247. – P. 712–721. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-23126-6_65 (дата обращения: 14.03.2026).
58. *Davydov, V.* New optical system for long distance control of electrical energy flows / V. Davydov, B. Reznikov, V. Dudkin // Energies. – 2023. – Vol. 16, no. 3. – Art. 1040. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1040> (дата обращения: 14.03.2026).
59. *Портнов, Э.Л.* Сравнение передаточных характеристик одномодовых оптических волокон для высокоскоростных передач / Э.Л. Портнов, Ж. Рабенандрасана // Международная научно-техническая конференция «Технологии информационного общества – ТИО-2020». – М.: МТУСИ, 2020 – С. 81-84. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42637035> (дата обращения: 14.03.2026).
60. *Былина, М. С.* Принципы построения современных мультиплексоров ввода/вывода ROADM / М. С. Былина, С. Ф. Глаголев, В. А. Гоменица и др. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции, в 4 т. – СПб. : СПбГУТ, 2024. – С. 146–151. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67337359> (дата обращения: 14.03.2026).
61. ITU-T Recommendation G.694.1 (10/2020). Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. — International Telecommunication Union, 2020. — URL: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=14498> (дата обращения: 14.03.2026).
62. ITU-T Recommendation G.798 (01/2021). Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks. — International Telecommunication Union, 2021. — URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.798> (дата обращения: 14.03.2026).
63. OIF-INT-SDN-01.0. Requirements for Integrated Packet Optical SDN. 2020. — URL: <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-INT-SDN-01.0.pdf> (дата обращения: 14.03.2026).
64. OpenZR+ MSA. Technical Specification. 2023. — URL: https://openzrplus.org/wp-content/uploads/2024/04/openzrplus_rev3p0_final2.pdf (дата обращения: 14.03.2026).

65. OIF. Implementation Agreement 400ZR. 2024. — URL: <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-400ZR-03.0.1.pdf> (дата обращения: 14.03.2026).
66. Open ROADM MSA Device White Paper. 2024. — URL: https://github.com/OpenROADM/OpenROADM_MSA_Public/wiki/files/20240307_open-roadm_msa_specification_ver7.0.xlsx (дата обращения: 14.03.2026).
67. *Sgambelluri, A.* Self-Autonomous Multi-Carrier Optical Transmissions / A. Sgambelluri, M. Radovic, F. Cugini [et al.] // 2023 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). – 2023. – P. 1–6. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10144878> (дата обращения: 14.03.2026).
68. *Song, J.* End-to-end Autoencoder for Superchannel Transceivers with Hardware Impairment / J. Song, C. Häger, J. Schröder [et al.] // Optical Fiber Communication Conference (OFC). – Washington : Optica Publishing Group, 2021. – P. F4D.6. — URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2021-F4D.6> (дата обращения: 14.03.2026).
69. *Pfeifle, J.* Flexible terabit/s Nyquist-WDM super-channels using a gain-switched comb source / J. Pfeifle, V. Vujicic, R. T. Watts [et al.] // Optics Express. – 2015. – Vol. 23, Iss. 2. – P. 724–738. — URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-23-2-724> (дата обращения: 14.03.2026).
70. *Xu, T.* Equalization enhanced phase noise in Nyquist-spaced superchannel transmission systems using multi-channel digital back-propagation / T. Xu, G. Liga, D. Lavery // Scientific Reports. — 2015. — Vol. 5. — Art. 13990. — URL: <https://www.nature.com/articles/srep13990> (дата обращения: 14.03.2026).
71. *Pappas, C.* Reaching the Peta-Computing: 163.8 TOPS Through Multidimensional AWGR-Based Accelerators / C. Pappas, T. Moschos, A. Prapas [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2025. – Vol. 43, Iss. 4. – P. 1773–1785. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10848282> (дата обращения: 14.03.2026).
72. *Tomassilli, A.* Path protection in optical flexible networks with distance-adaptive modulation formats / A. Tomassilli, B. Jaumard, F. Giroire // 2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). – IEEE, 2018. – P. 132–137. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8396102> (дата обращения: 14.03.2026).
73. *Politi, C.* Planning and operation of elastic flex-grid optical networks with OFDM variable bandwidth capabilities / C. Politi, C. Matrakidis, T. Orphanoudakis [et al.] // 2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). — IEEE, 2013.— P. 1–4. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6602715> (дата обращения: 14.03.2026).
74. *Al-Qadi, M.* QD-MLL-Based Single-Sideband Superchannel Generation Scheme With Kramers–Kronig Direct Detection Receivers / M. Al-Qadi, G. Vedala, M. O'sullivan [et al.] // IEEE Photonics

Journal. — 2019. — Vol. 11, no. 4. — Art. 7204013. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8770081> (дата обращения: 14.03.2026).

75. *Amado, S. B.* Nonlinear Mitigation of a 400G Frequency-Hybrid Superchannel for the 62.5-GHz Slot / S. B. Amado, F. Guiomar, N. Muga // Journal of Lightwave Technology. — 2017. — Vol. 35, no. 18. — P. 3963–3973. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7971903> (дата обращения: 14.03.2026).

76. *Giorgetti, A.* Enabling hierarchical control of coherent pluggable transceivers in SONiC packet-optical nodes / A. Giorgetti, D. Scano, A. Sgambelluri [et al.] // Journal of Optical Communications and Networking. — 2023. — Vol. 15, no. 3. — P. 163–173. — DOI: 10.1364/JOCN.477732.

77. *Deynu, F.* Low-Overhead Low-Complexity Carrier Phase Recovery Technique for Coherent Multi-Band OFDM-Based Superchannel Systems Enabled by Optical Frequency Combs / F. Deynu, E. Akpari, C. Akama // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. — 2021. — Vol. 20, no. 1. — DOI: 10.1590/2179-10742021v20i1965.

78. *Srinivasan, G.* All optical OFDM transmission system based future optical broadband networks / G. A. S. Srinivasan, S. Prince // 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). — IEEE, 2016. — P. 1380–1384. — DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566317. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7566317> (дата обращения: 14.03.2026).

79. *Geng, Y.* Terabit optical OFDM superchannel transmission via coherent carriers of a hybrid chip-scale soliton frequency comb / Y. Geng, X. Huang, W. Cui // Optics Letters. — 2018. — Vol. 43, no. 10. — P. 2406–2409. — DOI: 10.1364/OL.43.002406.

80. *Mazur, M.* Overhead-optimization of pilot-based digital signal processing for flexible high spectral efficiency transmission / M. Mazur, J. Schröder, A. Lorences-Riesgo [et al.] // Optics Express. — 2019. — Vol. 27, Iss. 17. — P. 24654–24669. — URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-27-17-24654> (дата обращения: 14.03.2026).

81. *Li, S.* OpticGAI: Generative AI-aided Deep Reinforcement Learning for Optical Networks Optimization / S. Li [et al.] // Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Optical Technologies (HotOptics '24). — Sydney, 2024. — URL: <https://arxiv.org/abs/2406.15906> (дата обращения: 14.03.2026).

82. *Locatelli, F.* Feedback-Based Channel Frequency Optimization in Superchannels / F. Locatelli, K. Christodouloupoulos, C. Delezoide [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2024. — Vol. 42, Iss. 13. — P. 4467–4475. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10457072> (дата обращения: 14.03.2026).

83. *Lorences-Riesgo, A.* Self-homodyne 24×32-QAM superchannel receiver enabled by all-optical comb regeneration using brillouin amplification / A. Lorences-Riesgo, M. Mazur, T. Eriksson [et al.] // *Optics Express*. — 2016. — Vol. 24, no. 26. — P. 29714–29723. — DOI: 10.1364/OE.24.029714.
84. *Mazur, M.* High Spectral Efficiency Coherent Superchannel Transmission With Soliton Microcombs / M. Mazur, M.-G. Suh, A. Fülöp [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. — 2021. — Vol. 39, Iss. 13. — P. 4367–4373. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9405395> (дата обращения: 14.03.2026).
85. *Millar, D. S.* Design of a 1 Tb/s Superchannel Coherent Receiver / D. S. Millar, R. Maher, D. Lavery [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. — 2016. — Vol. 34, Iss. 6. — P. 1453–1463. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7384692> (дата обращения: 14.03.2026).
86. *Muñoz, R.* SDN Control and Monitoring System for Soft-Failure Detection and Optical Restoration of Spectral/Spatial Superchannels / R. Muñoz, N. Yoshikane, J. Fabrega // 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). — 2018. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8535244> (дата обращения: 14.03.2026).
87. *Muñoz, R.* SDN/NFV Control and Orchestration for SDM Networks / R. Muñoz, R. Vilalta, J. Fabrega // 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). — 2019. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8817985> (дата обращения: 14.03.2026).
88. *Ateya, A. A.* QL-AODV: Q-learning-enhanced multi-path routing protocol for 6G-enabled autonomous aerial vehicle networks / A. A. Ateya, N. D. Tu, A. Muthanna [et al.] // *Future Internet*. — 2025. — Vol. 17, no. 10. — P. 473. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=86400850> (дата обращения: 14.03.2026).
89. *Vilalta, R.* GRPC-based SDN control and telemetry for soft-failure detection of spectral/spacial superchannels / R. Vilalta, N. Yoshikane, R. Casellas [et al.] // 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). — 2019. — DOI: 10.1049/cp.2019.0874.
90. *Cugini, F.* Toward Plug-and-Play Software-Defined Elastic Optical Networks / F. Cugini, F. Paolucci, F. Fresi [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. — 2016. — Vol. 34, Iss. 6. — P. 1494–1500. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7365418> (дата обращения: 14.03.2026).
91. *Muñoz, R.* Adaptive software defined networking control of space division multiplexing superchannels exploiting the spatial-mode dimension / R. Muñoz, N. Yoshikane, R. Vilalta [et al.] // *Journal of Optical Communications and Networking*. — 2020. — Vol. 12, Iss. 1. — P. A58–A69. — URL: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-12-1-A58> (дата обращения: 14.03.2026).
92. *Yeminy, T.* Flexible Photonic Spectral Shaping at Ultrahigh Resolution of 125MHz / T. Yeminy, S. Asraf, D. Sadot [et al.] // 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). —

IEEE, 2019. – P. 1–3. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8696904> (дата обращения: 14.03.2026).

93. *Chandrasekhar, S.* OFDM Based Superchannel Transmission Technology / S. Chandrasekhar, X. Liu // *Journal of Lightwave Technology*. – 2012. – Vol. 30, Iss. 24. – P. 3816–3823. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6266673> (дата обращения: 14.03.2026).

94. *Lowery, A. J.* All-optical generation of DFT-S-OFDM superchannels using periodic sinc pulses / A. J. Lowery, C. Zhu, E. Viterbo // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22, no. 22. — P. 27026–27041. — URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-22-22-27026> (дата обращения: 14.03.2026).

95. *Hu, R.* Direct-detection optical OFDM superchannel for long-reach PON using pilot regeneration / R. Hu, Q. Yang, X. Xiao [et al.] // *Optics Express*. — 2013. — Vol. 21, no. 22. — P. 26513–26519. — DOI: 10.1364/OE.21.026513.

96. *Liu, X.* Digital Signal Processing Techniques Enabling Multi-Tb/s Superchannel Transmission: An overview of recent advances in DSP-enabled superchannels / X. Liu, S. Chandrasekhar, P. J. Winzer // *IEEE Signal Processing Magazine*. – 2014. – Vol. 31, Iss. 2. – P. 16–24. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6739248> (дата обращения: 14.03.2026).

97. *Mazur, M.* Joint Superchannel Digital Signal Processing for Effective Inter-Channel Interference Cancellation / M. Mazur, J. Schröder, M. Karlsson [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. – 2020. – Vol. 38, Iss. 20. – P. 5676–5684. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9115258> (дата обращения: 14.03.2026).

98. *Liu, C.* Joint digital signal processing for superchannel coherent optical communication systems / C. Liu, J. Pan, T. Detwiler [et al.] // *Journal of Optical Communications and Networking*. – 2013. – Vol. 21, Iss. 7. – P. 8342–8356. — URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-21-7-8342> (дата обращения: 14.03.2026).

99. *He, Z.* Inter-Channel Interference Cancellation for Long-Haul Superchannel System / Z. He, K. Vijayan, A. Mirani [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. — 2024. — Vol. 42, no. 1. — P. 48–56. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10214267> (дата обращения: 14.03.2026).

100. *Helgason, Ó. B.* Superchannel engineering of microcombs for optical communications / Ó. B. Helgason, A. Fülöp, J. Schröder [et al.] // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2019. – Vol. 36, Iss. 8. – P. 2013–2022. — URL: <https://opg.optica.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-36-8-2013> (дата обращения: 14.03.2026).

101. *Jana, M.* Design of Time-Frequency Packed WDM Superchannel Transmission Systems / M. Jana, L. Lampe, J. Mitra // *Journal of Lightwave Technology*. – 2020. – Vol. 38, Iss. 24. – P. 6719–6731. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9177264> (дата обращения: 14.03.2026).

102. *Jana, M.* Multi-dimensional Probabilistic Shaping for Optical Superchannels / M. Jana, L. Lampe, J. Mitra [et al.] // 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC). — 2021. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9605980> (дата обращения: 14.03.2026).

103. *Mazur, M.* High Spectral Efficiency PM-128QAM Comb-Based Superchannel Transmission Enabled by a Single Shared Optical Pilot Tone / M. Mazur, A. Lorences-Riesgo, J. Schröder [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2018. — Vol. 36, Iss. 6. — P. 1318–1325. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8239584> (дата обращения: 14.03.2026).

104. *Prayoonyong, C.* Frequency Comb Distillation for Optical Superchannel Transmission / C. Prayoonyong, A. Boes, X. Xu [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2021. — Vol. 39, no. 23. — P. 7383–7392. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9555375> (дата обращения: 14.03.2026).

105. *Prayoonyong, C.* Effects of Receiver-Side Optical Filtering On Optical Superchannel System Performance / C. Prayoonyong, B. Corcoran // Journal of Lightwave Technology. — 2021. — Vol. 39, no. 19. — P. 6097–6106. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9488197> (дата обращения: 14.03.2026).

106. *Zeng, T.* Superchannel transmission system based on multi-channel equalization / T. Zeng // Optics Express. — 2013. — Vol. 21, Iss. 12. — P. 14799–14807. — URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-21-12-14799> (дата обращения: 14.03.2026).

107. *Zheng, Z.* Orthogonal-band-multiplexed offset-QAM optical superchannel generation and coherent detection / Z. Zheng, D.-B. Wang, X. Zhu // Scientific Reports. — 2015. — Vol. 5. — Art. 17891. — URL: <https://www.nature.com/articles/srep17891> (дата обращения: 14.03.2026).

108. *Othman, W. M.* Key enabling technologies for 6G: the role of UAVs, terahertz communication, and intelligent reconfigurable surfaces in shaping the future of wireless networks / W. M. Othman, A. A. Ateya, M. E. Nasr [et al.] // Journal of Sensor and Actuator Networks. — 2025. — Vol. 14, no. 2. — P. 30. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82075132> (дата обращения: 14.03.2026).

109. *Поповский Н.И.* Особенности реализации оптических суперканалов в гибких оптических сетях // Научно-технические ведомости СПбГПУ: Физико-математические науки. 2024. Том 17. № 3.1. С. 215-219. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80258827> (дата обращения: 14.03.2026).

110. *Thang, D. V.* Future of telepresence services in the evolving fog computing environment: a survey on research and use cases / D. V. Thang, A. Volkov, A. Muthanna [et al.] // Sensors. — 2025. — Vol. 25, no. 11. — P. 3488. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=86209813> (дата обращения: 14.03.2026).

111. *Upadhyay, K.* Superimposed Pilots Are Superior for Mitigating Pilot Contamination in Massive MIMO / K. Upadhyay, S. Vorobyov, M. Vehkaperä // IEEE Transactions on Signal Processing. — 2017.

— Vol. 65, no. 11. — P. 2917–2932. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7865983> (дата обращения: 14.03.2026).

112. *Isaenko, D.* Development of communication channel for data transmission over single-mode optical fiber in environmental monitoring system from remote multifunctional complexes / D. Isaenko, B. Reznikov, S. Rodin [et al.] // Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech - 2022). — IEEE, 2022. — P. 315–319. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9950821> (дата обращения: 14.03.2026).

113. *Podstrigaev, A. S.* Features of the development of transceivers for information and communication systems considering the distribution of radar operating frequencies in the frequency range / A. S. Podstrigaev, A. V. Smolyakov, N. S. Myazin [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. — 2018. — Vol. 11118. — P. 509–515. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01168-0_45 (дата обращения: 14.03.2026).

114. *Tang, M.* Research On High-speed Optical Transmission Technology Based On Optical Frequency Comb / M. Tang // 2020 International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEET). — 2020. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9298578> (дата обращения: 14.03.2026).

115. *Богданова, Е.Г.* Оценка OSNR в когерентных системах связи / Е.Г. Богданова // Информационные технологии и телекоммуникации, 2017. — Том. 5, №2. — С. 25-33. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30095020> (дата обращения: 14.03.2026).

116. *Жулидова, М. О.* Моделирование динамики OSNR в момент переходного процесса в волоконно-оптической линии связи с EDFA / М. О. Жулидова, И. И. Шихалиев, О. Е. Наний и др. // Инжиниринг и телекоммуникации — EN&T — 2023 : сборник тезисов докладов конференции. — 2023. — С. 62–65. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65640759> (дата обращения: 14.03.2026).

117. *Amari, A.* A Survey on Fiber Nonlinearity Compensation for 400 Gb/s and Beyond Optical Communication Systems / A. Amari, O. Dobre, R. Venkatesan // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2017. — Vol. 19, no. 4. — P. 3097–3113. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7959045> (дата обращения: 14.03.2026).

118. *Давыдов, В. В.* Волоконно-оптическая система имитации аварий в контурах охлаждения атомной энергетической установки / В. В. Давыдов, В. И. Дудкин, Е. Н. Величко и др. // Оптический журнал. — 2015. — Т. 82, № 3. — С. 4–8. — URL: <https://opticjourn.ru/ru/abstract/2015-82-3-4-8> (дата обращения: 14.03.2026).

119. *Tarasenko, M. Y.* Features of use direct and external modulation in fiber optical simulators of a false target for testing radar station / M. Y. Tarasenko, V. V. Davydov, V. A. Lenets [et al.] // Lecture

Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10531. – P. 227–232. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1038/1/012035> (дата обращения: 14.03.2026).

120. *Резников, А. В.* E-LAS — малошумящий узкополосный лазер С-диапазона с внешним резонатором / А. В. Резников, С. П. Никитин, О. Е. Наний и др. // Фотоника. – 2025. – Т. 19, № 7. – С. 558–563. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=87408048> (дата обращения: 14.03.2026).

121. *Guo, Y.* AWGR-based all-optical switching network for distributed machine learning / Y. Guo, X. Xue, B. Guo [et al.] // Optics Express. – 2025. – Vol. 33, Iss. 1. – P. 829–841. – DOI: 10.1364/OE.544474. — URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-33-1-829> (дата обращения: 14.03.2026).

122. *Поповский, Н.И.* Разработка трансивера оптического сигнала OFDM на основе AWGR / Н.И. Поповский, В.В. Давыдов // Ученые записки физического факультета Московского Университета. – 2024. – № 3. – С. 2431108. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75151881> (дата обращения: 14.03.2026).

123. *Lundberg, L.* Frequency Comb-Based WDM Transmission Systems Enabling Joint Signal Processing / L. Lundberg, M. Karlsson, A. Lorences-Riesgo [et al.] // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, Iss. 5. – Art. 718. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/5/718> (дата обращения: 14.03.2026).

124. *Mazur, M.* Frequency Comb Based High-Spectral Efficiency Transmission / M. Mazur, J. Schröder, A. Lorences-Riesgo [et al.] // OSA Technical Digest. — Optica Publishing Group, 2019. — P. SpTh1E.1. — URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=sppcom-2019-SpTh1E.1> (дата обращения: 14.03.2026).

125. *Давыдов, В. В.* Волоконно-оптический датчик для долговременного дистанционного контроля γ -излучения на объектах ядерной энергетики / В. В. Давыдов, Д. С. Дмитриева // Атомная энергия. – 2025. – Т. 138, № 1-2. – С. 59–64. – URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5473> (дата обращения: 14.03.2026).

126. *Коньшев, В. А.* Высокоэффективный малогабаритный интегрально-оптический компонент фотонного матричного умножителя / В. А. Коньшев, Т. О. Лукиных, О. Е. Наний и др. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 167, № 4. – С. 469–476. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82347704> (дата обращения: 14.03.2026).

127. *Поповский, Н.И.* Особенности построения волоконно-оптических линий связи с ортогональным частотным разделением каналов / Н.И. Поповский, В.В. Давыдов, В.Ю. Рудь // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2022. – Т. 15, № 3.2. – С. 178-183. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50819431> (дата обращения: 14.03.2026).

128. *Поповский, Н.И.* Метод идентификации вида цифровой модуляции в оптических системах связи с применением сверточных нейронных сетей / Н.И. Поповский, В.В. Давыдов //

Электросвязь. – 2023. – № 5. – С. 27-33. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54175381> (дата обращения: 14.03.2026).

129.Былина, М. С. Использование специального программного обеспечения для проектирования современных ВОСС: учебное пособие / М. С. Былина, С. Ф. Глаголев. – СПб. : СПбГУТ, 2025. – 38 с. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=87489047> (дата обращения: 14.03.2026).

130.Былина, М. С. Обзор методов оценки качества связи в современных транспортных высокоскоростных волоконно-оптических системах связи / М. С. Былина, С. Ф. Глаголев // Современные средства связи. – 2025. – Т. 1, № 1. – С. 166–168. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=83257876> (дата обращения: 14.03.2026).

131.Былина, М. С. Оценка качества связи в современных высокоскоростных волоконно-оптических системах / М. С. Былина, С. Ф. Глаголев // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО-2023), в 4 т. – СПб. : СПбГУТ, 2023. – Т. 1. – С. 209–214. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54033567> (дата обращения: 14.03.2026).

132.Поповский, Н.И. Исследование и разработка методов управления адаптивными оптическими трансиверами в гибких оптических сетях // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2026. – № 2. – С. 53–57. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=91714148> (дата обращения: 09.07.2026).

133.Vorobyova, D. IoT network model with multimodal node distribution and data-collecting mechanism using mobile clustering nodes / D. Vorobyova, A. Muthanna, A. Paramonov [et al.] // Electronics. – 2023. – Vol. 12, no. 6. – Art. 1410. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/6/1410> (дата обращения: 14.03.2026).

Приложение 1. Алгоритм решения обратной задачи выбора режима передачи транспондера

```

from __future__ import annotations

import json
from pathlib import Path
from typing import Dict, List, Tuple

import joblib
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.compose import ColumnTransformer
from sklearn.ensemble import HistGradientBoostingRegressor, RandomForestRegressor
from sklearn.impute import SimpleImputer
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import (
    mean_absolute_error,
    mean_squared_error,
    r2_score,
    accuracy_score,
    precision_score,
    recall_score,
    f1_score,
)
from sklearn.model_selection import KFold, cross_val_predict, train_test_split
from sklearn.multioutput import MultiOutputRegressor
from sklearn.pipeline import Pipeline
from sklearn.preprocessing import OneHotEncoder, StandardScaler
from sklearn.dummy import DummyRegressor

DATA_PATH = "qot_dataset.csv"           # CSV с данными
MODEL_PATH = "qot_predictor.joblib"     # куда сохранить модель
METRICS_PATH = "qot_metrics.json"       # куда сохранить метрики

RANDOM_STATE = 41
TEST_SIZE = 0.2
N_SPLITS = 5

FEATURES = [
    "N_sc",
    "Mod",
    "tx_power_dbm",
    "Symbol_rate",
    "B_GHz",
    "slot_count",
    "L_km",
    "OSNR_dB",
]

TARGETS = ["BER", "Q", "EVM"]

# Пороговые значения допустимости режима
QOT_THRESHOLDS = {
    "BER_max": 1e-3,
    "Q_min": 6.0,
    "EVM_max": 0.20,
}

# Приграничная зона вокруг порогов, где особенно важно качество модели
BOUNDARY_BAND = {
    "BER_rel": 0.20,    # ±20% вокруг порога BER
    "Q_abs": 0.50,     # ±0.5 вокруг порога Q
    "EVM_rel": 0.10,   # ±10% вокруг порога EVM
}

```

```

def load_dataset(path: str) -> pd.DataFrame:
    """Загрузка датасета и базовая проверка структуры."""
    df = pd.read_csv(path)

    required_columns = FEATURES + TARGETS
    missing = [col for col in required_columns if col not in df.columns]
    if missing:
        raise ValueError(f"В датасете отсутствуют обязательные столбцы: {missing}")

    df = df.drop_duplicates().reset_index(drop=True)
    return df

def build_pipeline(model_name: str = "hgb") -> Pipeline:
    """Построение ML-конвейера: препроцессинг + multi-output regression."""
    numeric_features = [c for c in FEATURES if c != "Mod"]
    categorical_features = ["Mod"]

    numeric_transformer = Pipeline(
        steps=[
            ("imputer", SimpleImputer(strategy="median")),
            ("scaler", StandardScaler()),
        ]
    )
    categorical_transformer = Pipeline(
        steps=[
            ("imputer", SimpleImputer(strategy="most_frequent")),
            ("onehot", OneHotEncoder(handle_unknown="ignore")),
        ]
    )
    preprocessor = ColumnTransformer(
        transformers=[
            ("num", numeric_transformer, numeric_features),
            ("cat", categorical_transformer, categorical_features),
        ]
    )
    if model_name == "hgb":
        base_model = HistGradientBoostingRegressor(
            random_state=RANDOM_STATE,
            max_depth=6,
            learning_rate=0.05,
            max_iter=300,
            l2_regularization=0.01,
        )
    elif model_name == "rf":
        base_model = RandomForestRegressor(
            n_estimators=300,
            max_depth=14,
            random_state=RANDOM_STATE,
            n_jobs=-1,
        )
    elif model_name == "lin":
        base_model = LinearRegression()
    elif model_name == "dummy":
        base_model = DummyRegressor(strategy="mean")
    else:
        raise ValueError(f"Неизвестная модель: {model_name}")

    pipeline = Pipeline(
        steps=[
            ("preprocessor", preprocessor),
            ("model", MultiOutputRegressor(base_model)),
        ]
    )
    return pipeline

```

```

def regression_metrics(
    y_true: pd.DataFrame,
    y_pred: np.ndarray,
    target_names: List[str],
) -> Dict[str, Dict[str, float]]:
    """Расчёт регрессионных метрик по каждой целевой переменной."""
    metrics: Dict[str, Dict[str, float]] = {}

    for i, target in enumerate(target_names):
        yt = y_true.iloc[:, i].to_numpy()
        yp = y_pred[:, i]

        mse = mean_squared_error(yt, yp)
        rmse = np.sqrt(mse)
        mae = mean_absolute_error(yt, yp)
        r2 = r2_score(yt, yp)

        metrics[target] = {
            "MAE": float(mae),
            "MSE": float(mse),
            "RMSE": float(rmse),
            "R2": float(r2),
        }
    return metrics

def is_mode_admissible(df_targets: pd.DataFrame) -> np.ndarray:
    """Преобразование QoT-показателей в бинарную метку допустимости режима."""
    return (
        (df_targets["BER"] <= QOT_THRESHOLDS["BER_max"]) &
        (df_targets["Q"] >= QOT_THRESHOLDS["Q_min"]) &
        (df_targets["EVM"] <= QOT_THRESHOLDS["EVM_max"])
    ).astype(int).to_numpy()

def boundary_mask(df_targets: pd.DataFrame) -> np.ndarray:
    """Маска приграничной зоны допустимости режима."""
    ber_thr = QOT_THRESHOLDS["BER_max"]
    q_thr = QOT_THRESHOLDS["Q_min"]
    evm_thr = QOT_THRESHOLDS["EVM_max"]
    ber_low = ber_thr * (1.0 - BOUNDARY_BAND["BER_rel"])
    ber_high = ber_thr * (1.0 + BOUNDARY_BAND["BER_rel"])
    evm_low = evm_thr * (1.0 - BOUNDARY_BAND["EVM_rel"])
    evm_high = evm_thr * (1.0 + BOUNDARY_BAND["EVM_rel"])

    q_low = q_thr - BOUNDARY_BAND["Q_abs"]
    q_high = q_thr + BOUNDARY_BAND["Q_abs"]
    mask = (
        ((df_targets["BER"] >= ber_low) & (df_targets["BER"] <= ber_high)) |
        ((df_targets["Q"] >= q_low) & (df_targets["Q"] <= q_high)) |
        ((df_targets["EVM"] >= evm_low) & (df_targets["EVM"] <= evm_high))
    )
    return mask.to_numpy()

def admissibility_classification_report(
    y_true_df: pd.DataFrame,
    y_pred: np.ndarray,
) -> Dict[str, float]:
    """Оценка качества бинарного решения 'режим допустим / недопустим'."""
    pred_df = pd.DataFrame(y_pred, columns=TARGETS, index=y_true_df.index)
    y_true_cls = is_mode_admissible(y_true_df)
    y_pred_cls = is_mode_admissible(pred_df)
    report = {
        "accuracy": float(accuracy_score(y_true_cls, y_pred_cls)),
        "precision": float(precision_score(y_true_cls, y_pred_cls,
zero_division=0)),
        "recall": float(recall_score(y_true_cls, y_pred_cls, zero_division=0)),
        "f1": float(f1_score(y_true_cls, y_pred_cls, zero_division=0)),
    }

```

```

# Ошибка именно на границе допустимости
mask = boundary_mask(y_true_df)
if mask.sum() > 0:
    y_true_b = y_true_cls[mask]
    y_pred_b = y_pred_cls[mask]
    report.update({
        "boundary_accuracy": float(accuracy_score(y_true_b, y_pred_b)),
        "boundary_precision": float(precision_score(y_true_b, y_pred_b,
zero_division=0)),
        "boundary_recall": float(recall_score(y_true_b, y_pred_b,
zero_division=0)),
        "boundary_f1": float(f1_score(y_true_b, y_pred_b, zero_division=0)),
        "boundary_samples": int(mask.sum()),
    })
else:
    report.update({
        "boundary_accuracy": None,
        "boundary_precision": None,
        "boundary_recall": None,
        "boundary_f1": None,
        "boundary_samples": 0,
    })
return report
def compare_models(
    X_train: pd.DataFrame,
    y_train: pd.DataFrame,
    X_test: pd.DataFrame,
    y_test: pd.DataFrame,
) -> pd.DataFrame:
    """Сравнение нескольких моделей по среднему R2 и RMSE."""
    model_names = {
        "dummy": "DummyRegressor",
        "lin": "LinearRegression",
        "rf": "RandomForest",
        "hgb": "HistGradientBoosting",
    }
    rows = []
    for key, title in model_names.items():
        pipe = build_pipeline(key)
        pipe.fit(X_train, y_train)
        pred = pipe.predict(X_test)
        metrics = regression_metrics(y_test, pred, TARGETS)
        row = {
            "Model": title,
            "Mean_R2": np.mean([metrics[t]["R2"] for t in TARGETS]),
            "Mean_RMSE": np.mean([metrics[t]["RMSE"] for t in TARGETS]),
            "BER_R2": metrics["BER"]["R2"],
            "Q_R2": metrics["Q"]["R2"],
            "EVM_R2": metrics["EVM"]["R2"],
        }
        rows.append(row)
    result = pd.DataFrame(rows).sort_values(by="Mean_R2",
ascending=False).reset_index(drop=True)
    return result

def main() -> None:
    # Загрузка данных
    df = load_dataset(DATA_PATH)
    X = df[FEATURES].copy()
    y = df[TARGETS].copy()
    # Разделение train/test
    X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
        X,
        y,

```

```

    test_size=TEST_SIZE,
    random_state=RANDOM_STATE,
)
# Сравнение моделей
comparison = compare_models(X_train, y_train, X_test, y_test)
print("\n=== Сравнение моделей ===")
print(comparison.to_string(index=False))
# Выбор лучшей модели
final_model = build_pipeline("hgb")
# Кросс-валидация на train
cv = KFold(n_splits=N_SPLITS, shuffle=True, random_state=RANDOM_STATE)
cv_pred = cross_val_predict(final_model, X_train, y_train, cv=cv, n_jobs=None)
cv_metrics = regression_metrics(y_train, cv_pred, TARGETS)
cv_adm_report = admissibility_classification_report(y_train, cv_pred)
# Обучение на train
final_model.fit(X_train, y_train)
# Оценка на test
y_test_pred = final_model.predict(X_test)
test_metrics = regression_metrics(y_test, y_test_pred, TARGETS)
test_adm_report = admissibility_classification_report(y_test, y_test_pred)
print("\n=== Метрики на обучающей части (CV) ===")
for target, m in cv_metrics.items():
    print(
        f"{target}: MAE={m['MAE']:.6f}, MSE={m['MSE']:.6f}, "
        f"RMSE={m['RMSE']:.6f}, R²={m['R2']:.4f}"
    )
print("\n=== Метрики на тестовой выборке ===")
for target, m in test_metrics.items():
    print(
        f"{target}: MAE={m['MAE']:.6f}, MSE={m['MSE']:.6f}, "
        f"RMSE={m['RMSE']:.6f}, R²={m['R2']:.4f}"
    )
print("\n=== Качество бинарного решения 'допустим / недопустим' (CV) ===")
for k, v in cv_adm_report.items():
    print(f"{k}: {v}")
print("\n=== Качество бинарного решения 'допустим / недопустим' (TEST) ===")
for k, v in test_adm_report.items():
    print(f"{k}: {v}")
# Сохранение модели
joblib.dump(final_model, MODEL_PATH)
# Сохранение метрик
output = {
    "dataset_rows": int(len(df)),
    "features": FEATURES,
    "targets": TARGETS,
    "test_size": TEST_SIZE,
    "cv_folds": N_SPLITS,
    "model": "MultiOutputRegressor(HistGradientBoostingRegressor)",
    "comparison": comparison.to_dict(orient="records"),
    "cv_metrics": cv_metrics,
    "cv_admissibility": cv_adm_report,
    "test_metrics": test_metrics,
    "test_admissibility": test_adm_report,
}
with open(METRICS_PATH, "w", encoding="utf-8") as f:
    json.dump(output, f, ensure_ascii=False, indent=2)
print(f"\nМодель сохранена в: {MODEL_PATH}")
print(f"Метрики сохранены в: {METRICS_PATH}")
if __name__ == "__main__":
    main()

```

Приложение 2. Алгоритм выбора рациональных режимов передачи транспондера

```

from __future__ import annotations

from dataclasses import dataclass, field
from typing import Dict, List, Optional, Tuple
import math

@dataclass(frozen=True)
class QoTThresholds:
    ber_max: float
    q_min: float
    evm_max: float
    osnr_min_db: float
@dataclass(frozen=True)
class ModeCandidate:
    """
    Кандидатный режим передачи транспондера.
    Предполагается, что QoT-показатели уже получены из ML-предиктора
    или из физической модели.
    """
    mode_id: str
    modulation: str
    n_sc: int # число поднесущих
    symbol_rate_gbd: float # Гбод
    bandwidth_ghz: float # требуемая полоса
    slot_count: int # число спектральных слотов
    tx_power_dbm: float # мощность передачи
    line_rate_gbps: float # полезная скорость режима
    # Прогноз QoT
    ber: float
    q_factor: float
    evm: float
    predicted_osnr_db: float
@dataclass
class CurrentState:
    """
    Текущее состояние соединения / транспондера.
    """
    current_mode: Optional[ModeCandidate] = None
    recent_switch_count: int = 0
    recent_rollback_count: int = 0
@dataclass(frozen=True)
class SelectionWeights:
    """
    Весовые коэффициенты в функции полезности.
    """
    w_se: float = 0.40 # спектральная эффективность
    w_q: float = 0.35 # QoT-маржа
    w_rc: float = 0.15 # цена реконфигурации
    w_sw: float = 0.10 # штраф за переключение
@dataclass
class RankedMode:
    mode: ModeCandidate
    admissible: bool
    spectral_score: float
    qot_score: float
    reconfig_cost: float
    switching_penalty: float
    utility: float
    reasons: List[str] = field(default_factory=list)
@dataclass
class SelectionDecision:
    """

```

```

Результат выбора рационального режима.
"""
selected_mode: Optional[ModeCandidate]
reserve_mode: Optional[ModeCandidate]
ranked_modes: List[RankedMode]
keep_current: bool
reason: str
@dataclass
class VerificationResult:
    success: bool
    final_mode: Optional[ModeCandidate]
    rollback_to: Optional[ModeCandidate]
    reason: str

DEFAULT_THRESHOLDS: Dict[str, QoTThresholds] = {
    "QPSK": QoTThresholds(ber_max=1e-3, q_min=6.0, evm_max=0.20,
osnr_min_db=12.0),
    "8QAM": QoTThresholds(ber_max=1e-3, q_min=6.0, evm_max=0.18,
osnr_min_db=14.0),
    "16QAM": QoTThresholds(ber_max=1e-3, q_min=6.0, evm_max=0.15,
osnr_min_db=16.0),
    "32QAM": QoTThresholds(ber_max=1e-3, q_min=6.0, evm_max=0.14,
osnr_min_db=20.0),
    "64QAM": QoTThresholds(ber_max=1e-3, q_min=6.0, evm_max=0.13,
osnr_min_db=24.0),
}

def is_mode_admissible(
    mode: ModeCandidate,
    required_rate_gbps: float,
    available_bandwidth_ghz: float,
    available_osnr_db: float,
    thresholds_map: Dict[str, QoTThresholds],
) -> Tuple[bool, List[str]]:
    """
    Проверка допустимости режима:
    - хватает ли line rate;
    - укладывается ли режим в доступную полосу;
    - удовлетворяет ли QoT-порогам;
    - не превышает ли требуемый OSNR доступный OSNR.
    """
    reasons: List[str] = []
    if mode.modulation not in thresholds_map:
        return False, [f"Неизвестный формат модуляции: {mode.modulation}"]
    thr = thresholds_map[mode.modulation]
    if mode.line_rate_gbps < required_rate_gbps:
        reasons.append(
            f"Недостаточная скорость: {mode.line_rate_gbps:.1f} <
{required_rate_gbps:.1f} Гбит/с"
        )
    if mode.bandwidth_ghz > available_bandwidth_ghz:
        reasons.append(
            f"Недостаточный спектральный ресурс: {mode.bandwidth_ghz:.1f} >
{available_bandwidth_ghz:.1f} ГГц"
        )
    if mode.ber > thr.ber_max:
        reasons.append(f"BER выше порога: {mode.ber:.3e} > {thr.ber_max:.3e}")
    if mode.q_factor < thr.q_min:
        reasons.append(f"Q ниже порога: {mode.q_factor:.2f} < {thr.q_min:.2f}")
    if mode.evm > thr.evm_max:
        reasons.append(f"EVM выше порога: {mode.evm:.3f} > {thr.evm_max:.3f}")

```

```

    if mode.predicted_osnr_db < thr.osnr_min_db:
        reasons.append(
            f"Предсказанный OSNR ниже порога: {mode.predicted_osnr_db:.2f} <
{thr.osnr_min_db:.2f} дБ"
        )
    if available_osnr_db < thr.osnr_min_db:
        reasons.append(
            f"Доступный OSNR тракта ниже порога: {available_osnr_db:.2f} <
{thr.osnr_min_db:.2f} дБ"
        )
    return len(reasons) == 0, reasons

def safe_div(x: float, y: float) -> float:
    return x / y if y != 0 else 0.0

def normalize(values: List[float]) -> List[float]:
    """
    Мин-макс нормализация в [0, 1].
    Если все значения одинаковые, возвращаем 1.0.
    """
    if not values:
        return []
    v_min = min(values)
    v_max = max(values)
    if math.isclose(v_min, v_max):
        return [1.0 for _ in values]
    return [(v - v_min) / (v_max - v_min) for v in values]

def spectral_efficiency(mode: ModeCandidate) -> float:
    """
    Спектральная эффективность как полезная скорость / занимаемая полоса.
    """
    return safe_div(mode.line_rate_gbps, mode.bandwidth_ghz)

def qot_margin(mode: ModeCandidate, thresholds_map: Dict[str, QoTThresholds]) ->
float:
    """
    Интегральная QoT-маржа.
    Чем больше, тем лучше.
    Учитываются запасы по BER, Q, EVM и OSNR.
    """
    thr = thresholds_map[mode.modulation]

    # Для BER и EVM меньше = лучше, поэтому запас считаем "порог / факт"
    ber_margin = safe_div(thr.ber_max, mode.ber) if mode.ber > 0 else 10.0
    evm_margin = safe_div(thr.evm_max, mode.evm) if mode.evm > 0 else 10.0

    # Для Q и OSNR больше = лучше
    q_margin = safe_div(mode.q_factor, thr.q_min)
    osnr_margin = safe_div(mode.predicted_osnr_db, thr.osnr_min_db)

    # Ограничиваем, чтобы экстремумы не доминировали
    ber_margin = min(ber_margin, 10.0)
    evm_margin = min(evm_margin, 10.0)
    q_margin = min(q_margin, 10.0)
    osnr_margin = min(osnr_margin, 10.0)

    return (ber_margin + evm_margin + q_margin + osnr_margin) / 4.0

def reconfiguration_cost(

```

```

    current_mode: Optional[ModeCandidate],
    candidate_mode: ModeCandidate,
) -> float:
    """
    Цена реконфигурации относительно текущего режима.
    Чем больше, тем хуже.
    """
    if current_mode is None:
        return 0.0

    cost = 0.0

    if current_mode.modulation != candidate_mode.modulation:
        cost += 1.0

    cost += abs(current_mode.n_sc - candidate_mode.n_sc) / max(current_mode.n_sc,
1)
    cost += abs(current_mode.bandwidth_ghz - candidate_mode.bandwidth_ghz) /
max(current_mode.bandwidth_ghz, 1.0)
    cost += abs(current_mode.tx_power_dbm - candidate_mode.tx_power_dbm) / 10.0
    cost += abs(current_mode.symbol_rate_gbd - candidate_mode.symbol_rate_gbd) /
max(current_mode.symbol_rate_gbd, 1.0)

    return cost

def switching_penalty(
    state: CurrentState,
    current_mode: Optional[ModeCandidate],
    candidate_mode: ModeCandidate,
) -> float:
    """
    Штраф за частые переключения и недавние rollback.
    """
    if current_mode is None:
        return 0.0

    if current_mode.mode_id == candidate_mode.mode_id:
        return 0.0

    return 0.1 * state.recent_switch_count + 0.2 * state.recent_rollback_count

def select_rational_mode(
    candidates: List[ModeCandidate],
    required_rate_gbps: float,
    available_bandwidth_ghz: float,
    available_osnr_db: float,
    state: CurrentState,
    thresholds_map: Dict[str, QoTThresholds] = DEFAULT_THRESHOLDS,
    weights: SelectionWeights = SelectionWeights(),
    hysteresis_delta: float = 0.05,
) -> SelectionDecision:
    """
    Выбор рационального режима:
    1) фильтрация допустимых режимов;
    2) расчёт частных критериев;
    3) вычисление функции полезности;
    4) hysteresis;
    5) выбор резервного режима.
    """
    ranked: List[RankedMode] = []

    # 1. Проверка допустимости
    admissible_modes: List[ModeCandidate] = []

```

```

admissibility_reasons: Dict[str, List[str]] = {}

for mode in candidates:
    admissible, reasons = is_mode_admissible(
        mode=mode,
        required_rate_gbps=required_rate_gbps,
        available_bandwidth_ghz=available_bandwidth_ghz,
        available_osnr_db=available_osnr_db,
        thresholds_map=thresholds_map,
    )
    admissibility_reasons[mode.mode_id] = reasons
    if admissible:
        admissible_modes.append(mode)

if not admissible_modes:
    # Возвращаем ранжированный список с пометкой, что ничего не допустимо
    for mode in candidates:
        ranked.append(
            RankedMode(
                mode=mode,
                admissible=False,
                spectral_score=0.0,
                got_score=0.0,
                reconfig_cost=0.0,
                switching_penalty=0.0,
                utility=float("-inf"),
                reasons=admissibility_reasons[mode.mode_id],
            )
        )
    return SelectionDecision(
        selected_mode=None,
        reserve_mode=None,
        ranked_modes=ranked,
        keep_current=False,
        reason="Нет допустимых режимов передачи"
    )

# 2. Частные критерии для допустимых режимов
se_values = [spectral_efficiency(m) for m in admissible_modes]
q_values = [got_margin(m, thresholds_map) for m in admissible_modes]
rc_values = [reconfiguration_cost(state.current_mode, m) for m in
admissible_modes]
sp_values = [switching_penalty(state, state.current_mode, m) for m in
admissible_modes]

se_norm = normalize(se_values)
q_norm = normalize(q_values)
rc_norm = normalize(rc_values) # больше = хуже
sp_norm = normalize(sp_values) # больше = хуже

# 3. Функция полезности
admissible_ranked: List[RankedMode] = []
for idx, mode in enumerate(admissible_modes):
    utility = (
        weights.w_se * se_norm[idx]
        + weights.w_q * q_norm[idx]
        - weights.w_rc * rc_norm[idx]
        - weights.w_sw * sp_norm[idx]
    )

    admissible_ranked.append(
        RankedMode(
            mode=mode,
            admissible=True,

```

```

        spectral_score=se_norm[idx],
        qot_score=q_norm[idx],
        reconfig_cost=rc_values[idx],
        switching_penalty=sp_values[idx],
        utility=utility,
        reasons=[],
    )
)

# Добавляем недопустимые режимы в общий список
inadmissible_ranked: List[RankedMode] = []
for mode in candidates:
    if mode.mode_id not in {m.mode_id for m in admissible_modes}:
        inadmissible_ranked.append(
            RankedMode(
                mode=mode,
                admissible=False,
                spectral_score=0.0,
                qot_score=0.0,
                reconfig_cost=0.0,
                switching_penalty=0.0,
                utility=float("-inf"),
                reasons=admissibility_reasons[mode.mode_id],
            )
        )

# Сортируем допустимые режимы по utility
admissible_ranked.sort(key=lambda x: x.utility, reverse=True)
best = admissible_ranked[0]

# 4. Hysteresis
keep_current = False
reason = "Выбран наилучший допустимый режим"

if state.current_mode is not None:
    current_ranked = None
    for item in admissible_ranked:
        if item.mode.mode_id == state.current_mode.mode_id:
            current_ranked = item
            break

    if current_ranked is not None:
        improvement = best.utility - current_ranked.utility
        if improvement <= hysteresis_delta:
            best = current_ranked
            keep_current = True
            reason = (
                f"Текущий режим сохранён по hysteresis: "
                f"улучшение {improvement:.4f} <= {hysteresis_delta:.4f}"
            )

selected_mode = best.mode

reserve_mode = None
reserve_candidates = [r for r in admissible_ranked if r.mode.mode_id !=
selected_mode.mode_id]

if reserve_candidates:
    reserve_candidates.sort(
        key=lambda r: (r.qot_score, -r.mode.bandwidth_ghz),
        reverse=True,
    )
    reserve_mode = reserve_candidates[0].mode

```

```

full_ranked = admissible_ranked + inadmissible_ranked
full_ranked.sort(key=lambda x: x.utility, reverse=True)

return SelectionDecision(
    selected_mode=selected_mode,
    reserve_mode=reserve_mode,
    ranked_modes=full_ranked,
    keep_current=keep_current,
    reason=reason,
)

def verify_and_maybe_rollback(
    applied_mode: ModeCandidate,
    previous_mode: Optional[ModeCandidate],
    reserve_mode: Optional[ModeCandidate],
    measured_ber: float,
    measured_q: float,
    measured_evm: float,
    measured_osnr_db: float,
    thresholds_map: Dict[str, QoTThresholds] = DEFAULT_THRESHOLDS,
) -> VerificationResult:
    """
    Проверка фактического QoT после применения режима.
    Если QoT не подтверждается, выполняется rollback к reserve_mode
    или к previous_mode.
    """
    thr = thresholds_map[applied_mode.modulation]

    ok = (
        measured_ber <= thr.ber_max and
        measured_q >= thr.q_min and
        measured_evm <= thr.evm_max and
        measured_osnr_db >= thr.osnr_min_db
    )

    if ok:
        return VerificationResult(
            success=True,
            final_mode=applied_mode,
            rollback_to=None,
            reason="Режим подтверждён по телеметрии"
        )

    rollback_target = reserve_mode if reserve_mode is not None else previous_mode

    return VerificationResult(
        success=False,
        final_mode=rollback_target,
        rollback_to=rollback_target,
        reason=(
            "QoT не подтверждён после реконфигурации; "
            "выполняется rollback к резервному/предыдущему режиму"
        )
    )

if __name__ == "__main__":
    candidates = [
        ModeCandidate(
            mode_id="M1",
            modulation="QPSK",
            n_sc=8,
            symbol_rate_gbd=25.0,
            bandwidth_ghz=200.0,
            slot_count=16,

```

```

        tx_power_dbm=-2.0,
        line_rate_gbps=200.0,
        ber=1e-6,
        q_factor=8.5,
        evm=0.08,
        predicted_osnr_db=19.0,
    ),
    ModeCandidate(
        mode_id="M2",
        modulation="16QAM",
        n_sc=4,
        symbol_rate_gbd=25.0,
        bandwidth_ghz=100.0,
        slot_count=8,
        tx_power_dbm=-1.0,
        line_rate_gbps=200.0,
        ber=4e-4,
        q_factor=6.8,
        evm=0.12,
        predicted_osnr_db=18.5,
    ),
    ModeCandidate(
        mode_id="M3",
        modulation="32QAM",
        n_sc=4,
        symbol_rate_gbd=25.0,
        bandwidth_ghz=100.0,
        slot_count=8,
        tx_power_dbm=-1.0,
        line_rate_gbps=250.0,
        ber=2e-3,      # недопустим по BER
        q_factor=5.7,
        evm=0.17,
        predicted_osnr_db=20.5,
    ),
    ModeCandidate(
        mode_id="M4",
        modulation="16QAM",
        n_sc=6,
        symbol_rate_gbd=25.0,
        bandwidth_ghz=150.0,
        slot_count=12,
        tx_power_dbm=-2.0,
        line_rate_gbps=250.0,
        ber=2e-4,
        q_factor=7.1,
        evm=0.11,
        predicted_osnr_db=19.2,
    ),
]

state = CurrentState(
    current_mode=candidates[0],
    recent_switch_count=2,
    recent_rollback_count=1,
)

decision = select_rational_mode(
    candidates=candidates,
    required_rate_gbps=200.0,
    available_bandwidth_ghz=150.0,
    available_osnr_db=19.0,
    state=state,
    hysteresis_delta=0.03,

```

```

)
print("=== Результат выбора ===")
print("Причина:", decision.reason)
print("Сохранить текущий:", decision.keep_current)
print("Выбранный режим:", decision.selected_mode.mode_id if
decision.selected_mode else None)
print("Резервный режим:", decision.reserve_mode.mode_id if
decision.reserve_mode else None)
print("\n=== Ранжирование режимов ===")
for item in decision.ranked_modes:
    print(
        f"{item.mode.mode_id:>2} | admissible={item.admissible} "
        f"| utility={item.utility:.4f} "
        f"| SE={item.spectral_score:.3f} "
        f"| QoT={item.qot_score:.3f} "
        f"| RC={item.reconfig_cost:.3f} "
        f"| SW={item.switching_penalty:.3f}"
    )
    if item.reasons:
        print(" Причины недопустимости:", "; ".join(item.reasons))
if decision.selected_mode:
    verification = verify_and_maybe_rollback(
        applied_mode=decision.selected_mode,
        previous_mode=state.current_mode,
        reserve_mode=decision.reserve_mode,
        measured_ber=3e-4,
        measured_q=6.7,
        measured_evm=0.12,
        measured_osnr_db=18.2,
    )
    print("\n=== Verification / Rollback ===")
    print("Успех:", verification.success)
    print("Итоговый режим:", verification.final_mode.mode_id if
verification.final_mode else None)
    print("Причина:", verification.reason)

```

Приложение 3. Акт о внедрении научных результатов

ЧИСТЫЙ КОСМОС
ЯРКОЕ БУДУЩЕЕ

Общество с ограниченной ответственностью «Чистый космос»
+7 (999) 440-77-39
clearspace@internet.ru
clear-space.ru

Генеральный директор ООО «Чистый космос» А.В. Шавшин
УТВЕРЖДАЮ:
«23» марта 2026 г.



АКТ о внедрении научных результатов

Комиссия ООО «Чистый космос» в составе А.В. Шавшина и Р.А. Дмитриева составила настоящий акт о том, что результаты научно-технической деятельности, полученные Поповским Никитой Игоревичем и защищённые патентом РФ на полезную модель № 239363 от 01.12.2025 г. «Трансивер оптических сигналов с возможностью мультиплексирования нескольких каналов с помощью ортогонального частотного разделения», используются в деятельности Общества при проработке технических решений в области оптических систем связи.

Руководитель
отдела лазерных технологий


(подпись)

Р.А. Дмитриев

Исполнитель: Дмитриев Роман Алексеевич,
тел.: +7 (904) 602-54-09

Приложение 4. Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ
№ 239363

**Трансивер оптических сигналов с возможностью
мультиплексирования нескольких каналов с помощью
ортогонального частотного разделения**

Патентообладатель: **Поповский Никита Игоревич (RU)**

Автор(ы): **Поповский Никита Игоревич (RU)**

Заявка № **2024136880**
Приоритет полезной модели **08 декабря 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **01 декабря 2025 г.**
Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **08 декабря 2034 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7ad08d531b4b8818e75f29506
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 04.03.2025 по 28.11.2026



Приложение 5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026619497

**Программа для выбора оптимальной конфигурации
адаптивного оптического транспондера и
моделирования его работы в гибкой оптической сети**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (RU)*

Авторы: *Давыдов Вадим Владимирович (RU), Поповский
Никита Игоревич (RU)*

Заявка № **2026618946**

Дата поступления **03 апреля 2026 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **03 апреля 2026 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7ad3bd531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.02.2025 по 28.11.2026

