



УДК 621.391.3.05:681.7.068

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДОСТУПА
БОЛЬШОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ¹****Дмитриева Виктория Рудольфовна,**студентка группы МИТС2431; Ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО
«Московский технический университет связи и информатики», 111024, г. Москва, ул.
Авиамоторная, 8А. E-mail: vdmitrieva711@mail.ru.**Аннотация**

Стремительное расширение зоны покрытия цифровых сервисов заставляет провайдеров массово переходить к архитектуре LR-PON. По существу, интеграция городских магистралей с абонентскими участками оптимизирует капитальные затраты. Между тем, в отрасли сформировалось острое технико-экономическое противоречие. С одной стороны, телеком-компании стремятся максимизировать дальность прокладки кабеля и предельно увеличить коэффициент ветвления. С другой, из-за подобного масштабирования многократно усиливается уязвимость физического уровня передачи. Это становится серьезным барьером. Обрыв единственного транзитного звена неминуемо оставляет огромные территории без интернета. А классические форматы аппаратного дублирования оказываются либо финансово неподъемными, либо технически недостаточным. Цель исследования заключается в оценке архитектурных рисков протяженных оптических трактов; в поиске оптимальных методов защиты для достижения доступности сервиса. Разбор топологий позволил автору сделать вывод о полной несостоятельности стандартного дублирования портов для сред столь глобального радиуса. Наилучший компромисс между инвестициями и отказоустойчивостью демонстрирует схема «кольцо-отвод». Сформулированные рекомендации будут полезны профильным инженерам-проектировщикам, научным специалистам, которые сосредоточены на развитии стандартов связи следующего поколения.

Ключевые слова: LR-PON, архитектура кольцо-отвод, машинное обучение, надежность оборудования, оптический бюджет, отказоустойчивость инфраструктуры, предиктивное обслуживание, резервирование линий связи

**ENSURING THE RELIABILITY OF LONG-REACH OPTICAL ACCESS
NETWORKS****Dmitrieva Viktoria Rudolfovna,**student of group MITS2431; Moscow Technical University of Communications and Informatics
(Order of the Red Banner of Labour), 111024, Moscow, Aviamotornaya St., 8A. E-mail:
vdmitrieva711@mail.ru.

¹ Научный руководитель: **Шишова Н. А.**, зав. кафедрой МТС МТУСИ, к.т.н., доцент
Scientific supervisor, **Shishova N.A.**, Head of the MTS Department of MTUCI, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

ABSTRACT

The rapid expansion of the coverage area of digital services is forcing providers to massively transition to the LR-PON architecture. In essence, the integration of urban backbones with subscriber segments optimizes capital costs. Meanwhile, an acute technical and economic contradiction has formed in the industry. On the one hand, telecom companies strive to maximize the cable laying distance and to maximize the branching ratio. On the other hand, due to such scaling, the vulnerability of the physical transmission layer is multiplied many times over. This becomes a serious barrier. A break in a single transit link inevitably leaves vast territories without the Internet. And classical formats of hardware duplication turn out to be either financially prohibitive or technically insufficient. The aim of the study is to assess the architectural risks of extended optical paths and to find optimal protection methods to achieve service availability. The analysis of topologies allowed the author to conclude that standard port duplication is completely untenable for environments of such a global radius. The best compromise between investment and fault tolerance is demonstrated by the "ring-and-spur" scheme. The formulated recommendations will be useful to relevant design engineers and scientific specialists focused on the development of next-generation communication standards.

Keywords: LR-PON, ring-and-spur architecture, machine learning, equipment reliability, optical budget, infrastructure fault tolerance, predictive maintenance, communication line redundancy

Современные телекоммуникационные системы находятся в стадии интенсивной трансформации. Это вызвано необходимостью расширения зоны покрытия и увеличения пропускной способности инфраструктуры. Концепция пассивных оптических сетей большого радиуса действия (LR-PON, Long-Reach Passive Optical Network) рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений.

Традиционные сети PON, которые стандартизированы в начале двухтысячных годов, обычно ограничены расстоянием около 20 км между станционным терминалом (OLT) и клиентским устройством (ONU). В отличие от предыдущих подходов, архитектура LR-PON дает возможность успешно увеличить этот показатель до 100 км и даже больше [1]. По сути, данная технология объединяет городские транспортные магистрали и локальные сегменты доступа в единую одноуровневую среду. Это помогает существенно сократить количество центральных узлов связи. Такой шаг весомо снижает капитальные и операционные затраты интернет-провайдеров.

Вместе с тем, консолидация аппаратных комплексов в сочетании со значительным увеличением коэффициента оптического разветвления до соотношений 1:512 или 1:1024 порождают серьезную техническую уязвимость. Отказ одного магистрального элемента либо обрыв фидерного кабеля неминуемо приводит к отключению десятков тысяч абонентов на весьма обширных территориях. Обеспечение надежности, резервирования, отказоустойчивости таких протяженных систем становится не стандартной желательной опцией, а абсолютно фундаментальным условием их практической реализации.

Протяженные линии передачи данных подвержены специфическим рискам. Они не так ярко проявляются на коротких дистанциях. Ключевым ограничением служит оптический бюджет мощности. Поскольку затухание полезного сигнала на отрезках свыше 100 км весьма велико, в архитектурах LR-PON массово применяются промежуточные оптические усилители. В частности, задействуются эрбиевые устройства (EDFA) или полупроводниковые решения (SOA) [6]. По-видимому, неизбежное внедрение активных

компонентов в изначально пассивную распределительную среду объективно снижает общий показатель безотказности всей сети. Каждое дополнительное энергозависимое устройство автоматически становится потенциальной точкой отказа.

Наряду с затуханием, дестабилизирующим фактором в протяженных трактах становятся нелинейные оптические эффекты. При использовании мультиплексирования по длине волны передача мощного светового пучка провоцирует такие явления, как фазовая самомодуляция, четырехволновое смешение. Увеличение мощности лазера для преодоления потерь приводит к искажениям спектра [2, 7]. Сигнал начинает интерферировать сам с собой. Это сказывается на увеличении вероятности битовых ошибок.

Между тем, прямые физические повреждения волокна остаются наиболее частой причиной аварий. Земляные работы, погодные аномалии, старение кабельной инфраструктуры – все перечисленное формирует постоянную угрозу. В традиционных топологиях обрыв затрагивает небольшой локальный сегмент. Здесь же масштаб инцидента возрастает многократно. Разумно предположить, что в целях компенсации данных рисков требуются принципиально новые аппаратные схемы локализации неисправностей. Интеграция многоволнового анализа на отражение (nλ-TRA) позволяет точнее определять места деградации сигнала [8]. Благодаря подобным методам сокращается время обнаружения поломки.

Помимо этого, удлинение канала неминуемо влечет заметный рост задержек распространения. Протоколы динамического распределения полосы пропускания начинают работать менее эффективно. Обмен служебными сообщениями между узлами занимает больше времени [4]. В условиях деградации линии указанное обстоятельство провоцирует коллизии кадров данных вкупе с потерей синхронизации оборудования.

Для того, чтобы повысить доступность сервисов, инженеры разрабатывают различные методы архитектурной защиты. Стандартные подходы делятся на несколько базовых категорий. Схема защиты Type B опирается на дублирование портов OLT и главного кабеля до первого сплиттера. Это оберегает от проблем на станции. Однако рассматриваемый вариант совершенно не спасает при обрывах на клиентском участке. В свою очередь, полное сквозное резервирование (Type C) защищает сеть вплоть до терминала конкретного абонента. На практике прокладка двух независимых линий к каждому домохозяйству экономически невыгодна.

В связи с этим отметим стремительно набирающую популярность гибридную топологию «кольцо-отвод». В ней несколько центральных станций оператора объединяются мощной кольцевой линией. А от удаленных узлов ветвления расходятся стандартные пассивные структуры. За счет описываемого подхода обеспечивается высокая отказоустойчивость ядра сети. При обрыве кольцевого участка трафик автоматически перенаправляется по альтернативному круговому маршруту [3]. Одновременно с этим внедряется концепция двойного подключения. Оптическое кольцо замыкается сразу на два разнесенных терминала. В итоге достигается полноценное георезервирование станционного оборудования.

С технологической точки зрения, новейшие стандарты опираются на мультиплексирование TWDM-PON. Это совмещает временное и волновое разделение каналов. Гибридный подход не только повышает спектральную эффективность, но и улучшает гибкость инфраструктуры [5]. При выходе из строя одного лазера система автономно перенастраивает устройства на резервную длину волны.

Математическая оценка эффективности резервирования строится на расчете показателя доступности. В телекоммуникационном стандарте предполагается достижение уровня «пяти девяток» (99,999%). Это эквивалентно максимум 5 минутам простоя в год [2, 6-

8]. На основании отмеченного подчеркнем, что выбор топологии требует скрупулезного расчета затрат. Для наглядности представим сравнительные характеристики основных эксплуатируемых конфигураций (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ конфигураций резервирования в сетях LR-PON (составлено на основе [2, 6-8])

Тип архитектуры	Коэффициент доступности (%)	Ожидаемое время восстановления (мс)	Относительная стоимость	Оптимальный сценарий использования
Стандартная (без защиты)	99,8 – 99,9	Ручной ремонт (часы/дни)	1.0x (база)	Сельские поселения с низким бюджетом
Типе В (защита OLT и фидера)	99,99	< 50	1.3x – 1.4x	Пригородные зоны, укрупненные узлы
Кольцо-отвод	99,995	< 50	1.6x – 1.8x	Межрегиональные транзитные магистрали
Типе С (полное дублирование)	99,999	< 10	2.5x – 3.0x	Бизнес-центры, вышки сотовой связи

Приведенные показатели опираются на теоретические вероятностные расчеты. В реальности эксплуатационные цифры могут весомо отличаться. Многое зависит от климатической зоны, качества исходного монтажа муфт, оперативности работы локальных ремонтных бригад. Примечательно, что топология «Кольцо-отвод» объективно демонстрирует наиболее сбалансированный компромисс между затратами провайдера и итоговой отказоустойчивостью.

Опираясь на проведенный анализ, сформулируем следующие рекомендации по обеспечению стабильности протяженных оптических сетей доступа.

Так, вместо классического подхода предлагается применять нейросетевые модели для анализа логов оптических рефлектометров в реальном времени. Система сможет автономно обнаруживать микроизгибы волокна и постепенный рост коэффициента затухания задолго до фактического обрыва линии. Назначение описываемого шага состоит в переходе к проактивному сервису. Новизна идеи выражается во встраивании аналитических модулей непосредственно в чипсеты OLT. В итоге снимается проблема внезапных масштабных отключений в труднодоступных районах.

В дополнение к отмеченному, рекомендуется комбинировать кольцевую магистраль для надежного соединения станций с экономичной древовидной архитектурой Типе В для частного сектора. Полное дублирование Типе С уместно оставить лишь для корпоративных клиентов. Подобное зонирование решает вопросы с высокими капиталовложениями. Оператор гарантирует базовую устойчивость всем, а премиальную – именно там, где это экономически оправдано.

Наконец, предлагается перенести часть промежуточных усилителей сигнала из головного центрального узла в распределенные точки ветвления кольцевой магистрали. Благодаря характеризуемой архитектуре ликвидируется единая точка отказа. В итоге можно гибко балансировать оптический бюджет на резервных маршрутах при автоматическом переключении потоков.

Итак, концепция пассивных оптических сетей большого радиуса действия представляет собой закономерный этап эволюции телекоммуникационной среды. Как было показано в исследовании, укрупнение узлов связи и удлинение кабельных линий несут очевидные экономические преимущества. Однако одновременно они многократно усиливают риски массовых отключений абонентов. Обобщая изложенный аналитический материал, резюмируем, что привычные методы пассивного резервирования, которые успешно применяются в локальных городских сетях, оказываются недостаточными в глобальных масштабах LR-PON. Решение обозначенной проблемы лежит как раз в плоскости углубленной структурной трансформации и применения новых программно-аппаратных инструментов. Именно симбиоз кольцевой топологии фидера, предиктивного мониторинга на базе машинного обучения, адаптивного георезервирования способен гарантировать требуемый отраслевыми стандартами уровень доступности свыше 99,99%. В перспективе дальнейшие научные изыскания целесообразно направить на сведение к минимуму нелинейных оптических эффектов в волокне и создание более действенных полупроводниковых усилителей. Развитие указанных инновационных направлений поможет устранить оставшиеся барьеры на пути повсеместного развертывания отказоустойчивых цифровых систем следующего поколения.

Список литературы:

1. Дмитриева, В. Р. Целесообразность использования технологии LR-PON на сетях доступа / В. Р. Дмитриева // Оригинальные исследования. – 2025. – Т. 15, № 10. – С. 17-22. – EDN ZUJXDQ.
2. Jeon, S-W. Opportunistic Noisy Network Coding for Fading Parallel Relay Networks / S-W. Jeon // URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6134015> (дата обращения: 12.09.2026).
3. Mas-Machuca, C. Optical Networks and Interconnects / C. Mas-Machuca // URL: <https://arxiv.org/html/2302.07829v1> (дата обращения: 12.09.2026).
4. Mohammad, S. H. Dynamic bandwidth allocation algorithm for long reach passive optical network / S. H. Mohammad, N. Zulkifli, S. M. Idrus // Telkomnika. – 2021. – Vol. 19, No. 3. – P. 738. – DOI 10.12928/telkomnika.v19i3.18787. – EDN WZIQEK.
5. Muciaccia, T. Passive optical access networks: state of the art and future evolution / T. Muciaccia, F. Gargano, V. M. N. Passaro // Photonics. – MDPI, 2014. – Т. 1. – №. 4. – С. 323-346. – DOI 10.3390/photonics1040323.
6. Performance Analysis of a 100 Gbps Long-Reach PON for Ultra-Wideband Rural Connectivity: A Case Study in Ecuador / E. Tatayo, A. Carrera, Ch. García [et al.] // Electronics. – 2026. – Vol. 15, No. 7. – P. 1502. – DOI 10.3390/electronics15071502. – EDN LEPLUZ.
7. Róka, R. Performance Analysis of Wavelength Division Multiplexing-Based Passive Optical Network Protection Schemes by Means of the Network Availability Evaluator / R. Róka // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – Vol. 12, No. 15. – P. 7911. – DOI 10.3390/app12157911. – EDN DQQJEM.
8. Sachdeva, Sh. A Comparative Study of Various Fault Location and Protection Mechanisms For LR-PON's (Long Reach Passive Optical Networks) / Sh. Sachdeva, J. Malhotra // URL: <https://thinkindiaquarterly.org/index.php/think-india/article/view/13867> (дата обращения: 12.09.2026).

References:

1. Dmitrieva, V.R. Feasibility of using LR-PON technology on access networks / V.R. Dmitrieva // Original Research. – 2025. – Vol. 15, No. 10. – Pp. 17-22. – EDN ZUJXDQ.
2. Jeon, S-W. Opportunistic Noisy Network Coding for Fading Parallel Relay Networks / S-W. Jeon // URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6134015> (accessed: 09/12/2026).
3. Mas-Machuca, C. Optical Networks and Interconnects / C. Mas-Machuca // URL: <https://arxiv.org/html/2302.07829v1> (accessed: 09/12/2026).
4. Mohammad, S.H. Dynamic bandwidth allocation algorithm for long reach passive optical network / S.H. Mohammad, N. Zulkifli, S.M. Idrus // Telkomnika. – 2021. – Vol. 19, No. 3. – P. 738. – DOI 10.12928/telkomnika.v19i3.18787. – EDN WZIQEK.
5. Muciaccia, T. Passive optical access networks: state of the art and future evolution / T. Muciaccia, F. Gargano, V.M.N. Passaro // Photonics. – MDPI, 2014. – Vol. 1. – No. 4. – Pp. 323-346. – DOI 10.3390/photonics1040323.
6. Performance Analysis of a 100 Gbps Long-Reach PON for Ultra-Wideband Rural Connectivity: A Case Study in Ecuador / E. Tatayo, A. Carrera, Ch. García [et al.] // Electronics. – 2026. – Vol. 15, No. 7. – P. 1502. – DOI 10.3390/electronics15071502. – EDN LEPLUZ.
7. Róka, R. Performance Analysis of Wavelength Division Multiplexing-Based Passive Optical Network Protection Schemes by Means of the Network Availability Evaluator / R. Róka // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – Vol. 12, No. 15. – P. 7911. – DOI 10.3390/app12157911. – EDN DQQJEM.
8. Sachdeva, Sh. A Comparative Study of Various Fault Location and Protection Mechanisms For LR-PON's (Long Reach Passive Optical Networks) / Sh. Sachdeva, J. Malhotra // URL: <https://thinkindiaquarterly.org/index.php/think-india/article/view/13867> (accessed: 09/12/2026).