

УДК 621.391.63:330.131.5

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ LR-PON НА СЕТЯХ ДОСТУПА¹

Дмитриева Виктория Рудольфовна,

Ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики»,

111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8А,

студент группы МИТС2431,

vdmitrieva711@mail.ru

Аннотация

В условиях, когда экспоненциальный рост трафика и развертывание сетей 5G требуют от операторов связи не простого наращивания пропускной способности, а коренной перестройки сетевой архитектуры, технология LR-PON (пассивных оптических сетей увеличенного радиуса действия) выходит на первый план. Актуальность обсуждаемой темы определяется необходимостью разрешить ключевое противоречие — оправдывают ли долгосрочные экономические выгоды от консолидации сетевых узлов и упрощения инфраструктуры более высокие первоначальные капитальные затраты на внедрение LR-PON по сравнению с традиционным GPON. Цель — провести технико-экономический анализ целесообразности LR-PON, сместив фокус с чисто технических характеристик на стратегические, финансовые аспекты. Автор приходит к выводу, что архитектурная трансформация, которую несет в себе LR-PON, позволяет добиться существенного сокращения операционных расходов (ОРЕХ) за счет уменьшения количества центральных узлов, снижения энергопотребления, затрат на обслуживание. Эти преимущества в полной мере компенсируют повышенный CAPEX, что в итоге приводит к значительно более низкой совокупной стоимости владения (ТСО) и делает технологию стратегически оправданной для долгосрочного развития.

Ключевые слова: LR-PON, капитальные затраты, конвергенция сетей, операционные затраты, пассивные оптические сети, совокупная стоимость владения, технико-экономический анализ

THE FEASIBILITY OF USING LR-PON TECHNOLOGY IN ACCESS NETWORKS

Dmitrieva Viktoriya Rudolfofna,

Order of the Red Banner of Labour

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI),

¹ научный руководитель: Шিশова Н.А., зав. кафедрой МТС МТУСИ, к.т.н., доц.

Scientific Supervisor Shishova N.A., Head of the Department of MTS, MTUCI, Ph.D. in Engineering, Associate Professor

111024, Moscow, Aviamotornaya St., 8A,
Student of group MITS2431,
vdmitrieva711@mail.ru

ABSTRACT

In an environment where the exponential growth of traffic and the deployment of 5G networks require telecom operators to not only increase bandwidth, but also fundamentally restructure their network architecture, LR-PON (long-reach passive optical networks) technology is gaining prominence. The relevance of the topic under discussion is determined by the need to resolve a key contradiction: whether the long-term economic benefits of consolidating network nodes and simplifying infrastructure justify the higher initial capital costs of implementing LR-PON compared to traditional GPON. The goal is to conduct a technical and economic analysis of the feasibility of LR-PON, shifting the focus from purely technical characteristics to strategic and financial aspects. The author concludes that the architectural transformation that LR-PON brings about can significantly reduce operational expenses (OPEX) by reducing the number of central nodes, lowering energy consumption, and reducing maintenance costs. These benefits fully compensate for the increased CAPEX, resulting in a significantly lower total cost of ownership (TCO) and making the technology strategically viable for long-term development.

Keywords: LR-PON, capital costs, network convergence, operational costs, passive optical networks, total cost of ownership, feasibility study

Введение. Стремительная цифровизация мировой экономики и общества предъявляет экспоненциально растущие требования к пропускной способности и качеству сетей связи. Развитие технологий – облачные вычисления, интернет вещей (IoT), видео сверхвысокой четкости (UHD 8K) и, в особенности, развертывание сетей пятого поколения (5G) – формирует запрос на создание универсальной, масштабируемой, экономически эффективной инфраструктуры доступа. В этом контексте пассивные оптические сети (PON) утвердились в качестве доминирующей технологии для реализации концепции «оптика до дома / здания» (FTTH/FTTB), обеспечивая высокую скорость передачи данных при относительно низких эксплуатационных затратах.

Исторически развитие PON шло по пути увеличения скорости на одного абонента – от первоначальных стандартов GPON и GPON к более производительным XG-PON и NG-PON2, предлагающим симметричные скорости до 10 Гбит/с и выше. Однако данный эволюционный путь, главным образом, решал проблему «последней мили», сохраняя при этом традиционную иерархическую структуру телекоммуникационных сетей. Эта структура, представленная множеством центральных узлов (Central Office, CO) или телефонных станций, становится все более громоздкой и дорогостоящей в обслуживании. Вследствие этого перед операторами связи встает стратегическая задача не просто наращивания пропускной способности, но и фундаментальной архитектурной оптимизации, которая направлена на консолидацию сетевых узлов, унификацию транспортной и абонентской сетей [3, 5]. Именно в качестве ответа на данный вызов возникла концепция Long-Reach PON (LR-PON) – пассивных оптических сетей увеличенного радиуса действия.

Методы. При подготовке данной статьи был применен комплексный методологический подход, который базируется на анализе и синтезе научной информации

из современных источников. Ключевым служит сравнительный технико-экономический анализ, в рамках которого технология LR-PON сопоставлялась с альтернативными решениями (GPON, DSL). Для наглядного представления количественных данных использовался табличный метод, позволивший структурировать и визуализировать сравнение капитальных и операционных затрат. На основе этого была дана характеристика совокупной стоимости владения (ТСО), что помогло сделать обоснованные выводы об экономической целесообразности технологии. Помимо этого, задействованы общенаучные методы – систематизация (для описания сетей), обобщение (в целях формулирования итоговых выводов).

Результаты и обсуждение. Технология пассивных оптических сетей, зародившаяся в 1990-х годах, прошла значительный путь развития, став базисом для современных широкополосных сетей доступа. Первые стандарты – GPON (IEEE 802.3ah) и GPON (ITU-T G.984) – обеспечивали асимметричные скорости до 2,5 Гбит/с в нисходящем потоке и заложили архитектурный принцип разделения пропускной способности одного волокна между несколькими абонентами (обычно до 64) с помощью пассивных оптических разветвителей. Этот подход помог значительно снизить стоимость подключения по сравнению с топологией «точка-точка» [2, 5].

Технология LR-PON достигает своих уникальных характеристик – дальности до 100 км и поддержки до 512 и более абонентов на порт – за счет применения ряда передовых технологических решений:

- для компенсации затухания сигнала на больших расстояниях и при высоком коэффициенте ветвления в архитектуру LR-PON интегрируются оптические усилители. Могут использоваться различные их типы: EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), Рамановские (Raman Amplifier), полупроводниковые оптические (SOA);

- на стороне абонентского оборудования (ONT) и стационарного терминала (OLT) задействуются более чувствительные фотодетекторы, к примеру, лавинные фотодиоды (APD), способные корректно распознавать ослабленный оптический сигнал;

- с целью дальнейшего увеличения пропускной способности и гибкости сети поверх архитектуры LR-PON применяются технологии спектрального уплотнения (WDM), выделяя отдельные длины волн для разных групп пользователей или сервисов. Это даёт возможность эффективно использовать оптический спектр и масштабировать сеть по мере роста трафика [1, 4, 5].

В результате архитектура сети на базе LR-PON существенно упрощается. Вместо десятков и сотен небольших центральных узлов, которые типичны для крупного города, оператор имеет возможность консолидировать всё оборудование в нескольких (иногда даже в одном) крупных центрах обработки данных. Это приводит к прямому экономическому эффекту – сокращаются расходы на аренду или владение недвижимостью, уменьшается энергопотребление, упрощаются процедуры обслуживания / мониторинга сети.

Целесообразность внедрения любой новой технологии определяется, в первую очередь, ее экономической эффективностью. В случае LR-PON ключевые преимущества лежат в плоскости сокращения как капитальных, так и, в большей степени, операционных затрат по сравнению с альтернативными технологиями. Рассмотрим сравнительный анализ с опорой на данные, представленные в исследовании проекта SARDANA [1], который является одной из реализаций концепции LR-PON.

Капитальные затраты включают стоимость оборудования (OLT, ONT), пассивной оптической распределительной сети (ODN), а также стоимость строительно-монтажных работ. В таблице 1 приведено сравнение CAPEX на одного абонента для различных технологий в зависимости от плотности застройки.

Таблица 1 – Сравнительный анализ капитальных затрат (CAPEX) на абонента для различных технологий доступа (в условных единицах)

(составлено на основе [1, 2, 4])

Плотность абонентов (население)	DSL	GPON	GPON with Metro	SARDANA (LR-PON)
650	830	2120	2020	2450
2200	340	645	1195	1425
4300	240	510	935	1105
5500	198	405	860	1020

Из таблицы видно, что в сценариях с высокой плотностью абонентов (от 2200 и выше) технология LR-PON (SARDANA) демонстрирует более высокие начальные капитальные затраты на абонента в сопоставлении с GPON и DSL. Это объясняется более высокой стоимостью активного оборудования LR-PON (усилителей, мощных трансиверов). Однако в районах с низкой плотностью абонентов (650), где требуется прокладка протяженных линий связи, разница в CAPEX сокращается, а в некоторых сценариях LR-PON может стать сопоставимой с GPON из-за экономии на количестве требуемых центральных узлов. Тем не менее, основной экономический выигрыш от LR-PON проявляется не в CAPEX, а в OPEX.

Операционные затраты являются ключевым фактором, определяющим долгосрочную рентабельность сети. Консолидация центральных узлов, обеспечиваемая LR-PON, напрямую ведет к снижению OPEX (таблица 2).

Таблица 2 – Качественное сравнение факторов, влияющих на OPEX и TCO (составлено на основе [1])

Фактор затрат	DSL	GPON	LR-PON
Количество центральных узлов	Высокое	Среднее	Низкое
Затраты на недвижимость	Высокие	Средние	Низкие
Энергопотребление	Высокое	Среднее	Низкое
Обслуживание и персонал	Высокие	Средние	Низкие
Сложность сети	Высокая	Средняя	Низкая
Совокупная стоимость владения (ТСО)	Высокая	Средняя	Низкая

Как показывает анализ, LR-PON обеспечивает кардинальное сокращение OPEX по всем ключевым статьям:

- сокращение числа активных узлов с десятков до единиц приводит к пропорциональному снижению счетов за электроэнергию, аренду помещений, обслуживание систем климат-контроля;

- упрощение архитектуры и уменьшение количества активных элементов в сети снижают вероятность сбоев, сокращают трудозатраты на техническое обслуживание и ремонт.

Выводы. Таким образом, невзирая на потенциально более высокий CAPEX в некоторых сценариях, технология LR-PON обеспечивает значительно более низкую совокупную стоимость владения (ТСО) в долгосрочной перспективе, что делает ее экономически целесообразной для стратегического развития сетей операторов связи.

В качестве направлений для последующих исследований видится уместным выделить углубленное моделирование производительности LR-PON для ultra-reliable low-latency-приложений в сетях 5G, анализ вопросов информационной безопасности в укрупненных сегментах сети, разработку интеллектуальных систем управления и оркестрации для консолидированных сетей.

Следует заключить, что внедрение LR-PON является стратегически обоснованным и экономически целесообразным шагом для построения масштабируемых, гибких, рентабельных сетей доступа нового поколения.

Список литературы:

1. Коридзе А., Тимченко С., Шувалов В. Технология LR-PON: о целесообразности использования на сетях доступа // Первая миля. – 2019. – № 5 (82). – С. 32-39.
2. Кудрявцева А.В., Нетес В.А. Анализ методов резервирования в оптических сетях дальнего радиуса действия // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 69-74.
3. Шувалов В.П., Коридзе А.Н. Экономические аспекты обеспечения надежности сетей доступа большого радиуса действия // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие». – Санкт-Петербург: 2022. – С. 116-118.
4. Шувалов В.П., Яковлев А.С. Сравнительный анализ двух методик расчета коэффициента простоя оптической сети доступа большого радиуса действия (LR-PON) // Современные проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. – Новосибирск: 2022. – С. 95-98.
5. Gupta J. Power budget- and srlg-aware cost-efficient partial protection planning models and architectures for Long-reach passive Optical Networks // Optical Switching and Networking. – 2022. – Vol. 46. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55987409> (дата обращения: 21.10.2025).

References:

1. Koridze A., Timchenko S., Shuvalov V. LR-PON Technology: On the Feasibility of Using it on Access Networks // First Mile. – 2019. – No. 5 (82). – Pp. 32-39.
2. Kudryavtseva A.V., Nates V.A. Analysis of Methods of Reservation in Long-Range Optical Networks // Telecommunications and Information Technologies. – 2021. – V. 8. – No. 1. – P. 69-74.
3. Shuvalov V.P., Koridze A.N. Economic Aspects of Ensuring the Reliability of Long-Range Access Networks // Collection of Selected Articles Based on the Materials of Scientific Conferences by the National Development Research Institute. – Saint Petersburg: 2022. – Pp. 116-118.
4. Shuvalov V.P., Yakovlev A.S. Comparative Analysis of Two Methods for Calculating the Idle Time of a Long-Range Optical Access Network (LR-PON) // Modern Problems of Telecommunications. Materials of the Russian Scientific and Technical Conference. – Novosibirsk: 2022. – Pp. 95-98.
5. Gupta J. Power budget- and srlg-aware cost-efficient partial protection planning models and architectures for Long-reach passive Optical Networks // Optical Switching and

Networking. – 2022. – Vol. 46. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55987409> (date of request: 21.10.2025).