

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 96–114
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.008>
UDC / УДК / ЭОЖ 656.2

IMPLEMENTATION OF PASSIVE OPTICAL NETWORK (PON) TECHNOLOGY IN THE ALATAU DISTRICT

R. Shakirov

"Alatau Logistics" LLP, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com

Rakhmetulla Shakirov — manager, "Alatau Logistics" LLP, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4679-0247>.

© R. Shakirov

Abstract. This study focuses on passive optical network (PON) technologies with FTTH architecture, providing high-speed Internet access for subscribers. The relevance of the topic is determined by the increasing demand for broadband networks and the need to optimize network solutions for urban and suburban areas. The aim of the research is to analyze existing PON architectures, identify their advantages and limitations, and develop recommendations to improve the efficiency of FTTH networks. The research tasks included studying the theoretical foundations of PON and FTTH, analyzing GPON, EPON, and WDM-PON standards, conducting experimental measurements of optical line parameters, network load modeling, and evaluating data transmission quality. Methods used include analytical and comparative analysis, modeling, testing with OTDR and measurement tools, and review of archival and modern literature. The results demonstrated that a properly designed PON network ensures stable and reliable data transmission with high bandwidth. Analysis of the strengths and weaknesses of various architectures allowed the development of recommendations for network optimization, including network type selection, planning of splits, and monitoring methods. The conclusion confirms that PON FTTH is a promising solution for providing high-speed Internet access, and the research results can be applied both in theoretical studies and in practical design and modernization of optical networks.

Keywords: PON, FTTH, GPON, EPON, WDM-PON, broadband access

For citation: Shakirov R. (2026). Implementation of Passive Optical Network (PON) Technology in the Alatau District // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 96–114. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.008> (In Russ.).

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

АЛАТАУ АУДАНЫНА ПАССИВ ОПТИКАЛЫҚ ЖЕЛІЛЕР (PON) ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЕНГІЗУ

Р.Б. Шакиров

"Alatau Logistics" ЖШС, Алматы, Қазақстан.
E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com

Рахметулла Шакиров — менеджер, "Alatau Logistics" ЖШС, Алматы, Қазақстан.
E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4679-0247>.

© Р.Б. Шакиров

Аннотация. Бұл зерттеу PON технологиялары мен FTTH архитектурасын қарастырады, ол абоненттерге жоғары жылдамдықтағы интернетке қосылуды қамтамасыз етеді. Зерттеу тақырыбының өзектілігі қалалық және ауылдық аймақтарда кең жолақты желілерге сұраныстың артуымен және желілік шешімдерді оңтайландыру қажеттілігімен анықталады. Зерттеудің мақсаты – бар PON архитектураларын талдау, олардың артықшылықтары мен шектеулерін анықтау, сондай-ақ FTTH желілерінің тиімділігін арттыруға арналған ұсыныстар әзірлеу. Зерттеу барысында келесі міндеттер шешілді: PON және FTTH теориялық негіздерін зерттеу, GPON, EPON және WDM-PON стандарттарын талдау, оптикалық желі параметрлерін эксперименттік өлшеу, желі жүктемесін модельдеу және деректерді беру сапасын бағалау. Қолданылған әдістерге аналитикалық және салыстырмалы талдау, модельдеу, OTDR және өлшеу құралдарын пайдалана отырып сынау, сондай-ақ архивтік және заманауи әдебиеттерді қарау жатады. Зерттеу нәтижелері дұрыс жобаланған PON желісі жоғары өткізу қабілетімен тұрақты және сенімді деректер тасымалын қамтамасыз ететінін көрсетті. Өртүрлі архитектуралардың артықшылықтары мен кемшіліктерін талдау желіні оңтайландыру бойынша ұсыныстар әзірлеуге мүмкіндік берді, соның ішінде желі түрін таңдау, тармақтарды жоспарлау және бақылау әдістерін қолдану. Қорытынды PON FTTH желілері жоғары жылдамдықтағы интернетке қосылудың перспективалы шешімі болып табылатынын растайды және зерттеу нәтижелері теориялық зерттеулерде және оптикалық желілерді жобалау мен жанарту тәжірибесінде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: PON, FTTH, GPON, EPON, WDM-PON, кең жолақты қолжетімділік

Дәйексөздер үшін: Шакиров Р.Б. (2026). Алатау ауданына пассив оптикалық желілер (PON) технологиясын енгізу // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 96–114 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.008> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПАССИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ (PON) В АЛАТАУСКОМ РАЙОНЕ

Р.Б. Шакиров

ТОО "Alatau Logistics", Алматы, Казахстан.

E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com

Рахметулла Шакиров — менеджер, ТОО "Alatau Logistics", Алматы, Казахстан.

E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4679-0247>.

© Р.Б. Шакиров

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию технологий пассивного оптического доступа (PON) с архитектурой FTTH, обеспечивающей высокоскоростное подключение абонентов к интернету. Актуальность темы определяется растущей потребностью в широкополосных сетях и необходимости оптимизации сетевых решений для городских и пригородных территорий. Цель исследования заключается в анализе существующих архитектур PON, выявлении их преимуществ и ограничений, а также разработке рекомендаций по повышению эффективности сетей FTTH. В работе решались следующие задачи: изучение теоретических основ PON и FTTH, анализ стандартов GPON, EPON и WDM-PON, проведение экспериментальных измерений параметров оптических линий, моделирование нагрузки сети и оценка качества передачи данных. Используемые методы включают аналитический и сравнительный анализ, моделирование, тестирование с применением OTDR и измерительных приборов, а также изучение архивных материалов

и современных публикаций. Результаты исследования показали, что правильно спроектированная сеть PON обеспечивает стабильную и надежную передачу данных при высокой пропускной способности. Анализ преимуществ и недостатков различных архитектур позволил выработать рекомендации по оптимизации сети, включая выбор типа сети, планирование разветвлений и методы мониторинга. Заключение подтверждает, что PON FTTH является перспективным решением для обеспечения высокоскоростного доступа к интернету, а результаты работы могут быть использованы как в теоретических исследованиях, так и на практике при проектировании и модернизации оптических сетей.

Ключевые слова: PON, FTTH, GPON, EPON, WDM-PON, широкополосный доступ

Для цитирования: Шакиров Р.Б. (2026). Внедрение технологии пассивных оптических сетей (PON) в Алатауском районе // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 96–114. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.008> (На русс.).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Современные телекоммуникационные сети сталкиваются с необходимостью обеспечения высокоскоростного доступа к Интернету и мультимедийным услугам для индивидуальных и корпоративных абонентов. Одной из ключевых проблем при этом является так называемая «последняя миля» — участок сети между центральным узлом и конечным пользователем, который традиционно ограничен пропускной способностью и связан с высокими затратами на строительство и обслуживание (Гольдштейн, 2013: 67–69; Никульский, 2013: 49–50).

Выбор темы исследования обусловлен актуальностью внедрения пассивных оптических сетей (PON), как одной из наиболее перспективных технологий широкополосного доступа. Несмотря на существующие разработки и многочисленные публикации по архитектуре и стандартам PON (Скляров, 2013: 110–116; Комашинский, 2013: 34–38), до сих пор остаются вопросы, связанные с оптимизацией пропускной способности, мониторингом сети и повышением надежности работы. Таким образом, существует явная проблемная ситуация — недостаток комплексных исследований, которые учитывали бы как технические характеристики сетей, так и методы их тестирования и эксплуатации.

Объектом исследования являются пассивные оптические сети доступа FTTH на базе технологий PON. Предмет исследования — архитектура, стандарты и методы тестирования PON, включая измерение затухания и использование оптического рефлектометра для локализации проблемных участков сети.

Цель исследования состоит в анализе особенностей построения и эксплуатации сетей PON с учетом их преимуществ и ограничений, а также разработке рекомендаций по эффективному развертыванию и обслуживанию этих сетей.

Для достижения цели ставятся следующие задачи:

- Рассмотреть основные стандарты и архитектуры PON (APON, BPON, EPON/GPON, GPON, WDM PON) и их технические характеристики.
- Проанализировать методы измерения оптических потерь и локализации неисправностей в PON с использованием оптического тестера и рефлектометра.
- Сравнить преимущества и недостатки технологии PON с архитектурами Ethernet FTTH.
- Выявить проблемные вопросы эксплуатации сетей PON и предложить пути их решения для повышения эффективности и надежности работы сети.

Методы исследования включают анализ научной литературы, сравнительный анализ стандартов и архитектур PON, моделирование и оценку характеристик сети, а также методику измерения оптических параметров с использованием тестеров и рефлектометров.

Гипотеза исследования заключается в том, что правильное проектирование, внедрение и эксплуатация сетей PON с учетом современных стандартов и методов мониторинга позволяет обеспечить эффективное использование ресурсов сети, высокую надежность и перспективность ее развития.

Значение исследования заключается в возможности применения полученных результатов для оптимизации телекоммуникационных сетей операторов связи, повышения качества обслуживания абонентов и внедрения новых мультимедийных сервисов.

Материалы и методы.

Материалом исследования являются пассивные оптические сети (PON) с архитектурой FTTH, используемые для широкополосного доступа. В качественном аспекте рассматриваются различные типы сетей PON (APON, BPON, EPON/GEAPON, GPON, WDM PON) и их компоненты: оптические линии передачи, оптические разветвители, терминалы абонентов (ONT) и оптические линейные терминалы (OLT). В количественном отношении анализ проведен на примере сетей с числом абонентов от 50 до 500, длиной оптической линии от 1 до 20 км и разветвлением до 32 портов на каждом узле. Такая характеристика материала позволяет оценить эффективность технологий PON в различных условиях эксплуатации и выявить потенциальные проблемы сети.

Основные вопросы исследования включают:

- Каковы особенности архитектуры и стандарты сетей PON?
- Какие методы измерения оптических характеристик позволяют оценить качество и надежность сети?
- Каковы ограничения технологий PON и пути их оптимизации?

Предложенная гипотеза заключается в том, что правильная организация сети PON с учетом технических стандартов и применения современных методов тестирования обеспечивает высокую эффективность, надежность и перспективность развития FTTH-сетей (Никульский, 2013: 49–50).

Этапы исследования включают:

- Анализ литературы и современных стандартов PON.
- Выбор объектов исследования и определение количественных характеристик абонентской сети.
- Проведение измерений оптических параметров с использованием оптического рефлектометра и тестеров.
- Обработка и анализ полученных данных, сравнительный анализ архитектур и стандартов PON.
- Формирование рекомендаций по оптимизации работы сети и повышению ее надежности.

Методы исследования включают:

- Аналитический метод — изучение научной литературы, стандартов и нормативных документов по PON;
- Сравнительный анализ — сопоставление различных архитектур и стандартов сетей PON, их преимуществ и ограничений;
- Экспериментальный метод — измерение оптических параметров сети с использованием OTDR (оптического рефлектометра) и тестеров для выявления затуханий и неисправностей;
- Метод моделирования — оценка пропускной способности и надежности сети в различных сценариях эксплуатации;
- Архивный и документальный анализ — использование технических отчетов и архивных материалов операторов связи для выявления практических проблем при эксплуатации сетей.

Новизна исследования заключается в комплексном подходе: одновременно рассматриваются стандарты и архитектуры PON, методы тестирования и эксплуатации

сети, что позволяет выявить узкие места и предложить пути их оптимизации. Применение современных измерительных методов в сочетании с анализом реальных эксплуатационных данных позволяет обеспечить достоверность и практическую значимость выводов.

Результаты и обсуждение.

Одна из главных задач, стоящих перед современными телекоммуникационными сетями доступа – так называемая проблема «последней мили», предоставление как можно большей полосы пропускания индивидуальным и корпоративным абонентам при минимальных затратах.

Суть технологии PON заключается в том, что между приемопередающим модулем центрального узла OLT (Optical line terminal) и удаленными абонентскими узлами ONT (Optical network terminal) создается полностью пассивная оптическая сеть, имеющая топологию дерева. В промежуточных узлах дерева размещаются пассивные оптические разветвители (сплиттеры) – компактные устройства, не требующие питания и обслуживания. Один приемопередающий модуль OLT позволяет передавать информацию множеству абонентских устройств ONT. Число ONT, подключенных к одному OLT, может быть настолько большим, насколько позволяет бюджет мощности и максимальная скорость приемопередающей аппаратуры (Петренко, 2013: 12–15; Бубличенко, 2013: 110–116; Горнак, 201: 220–225).

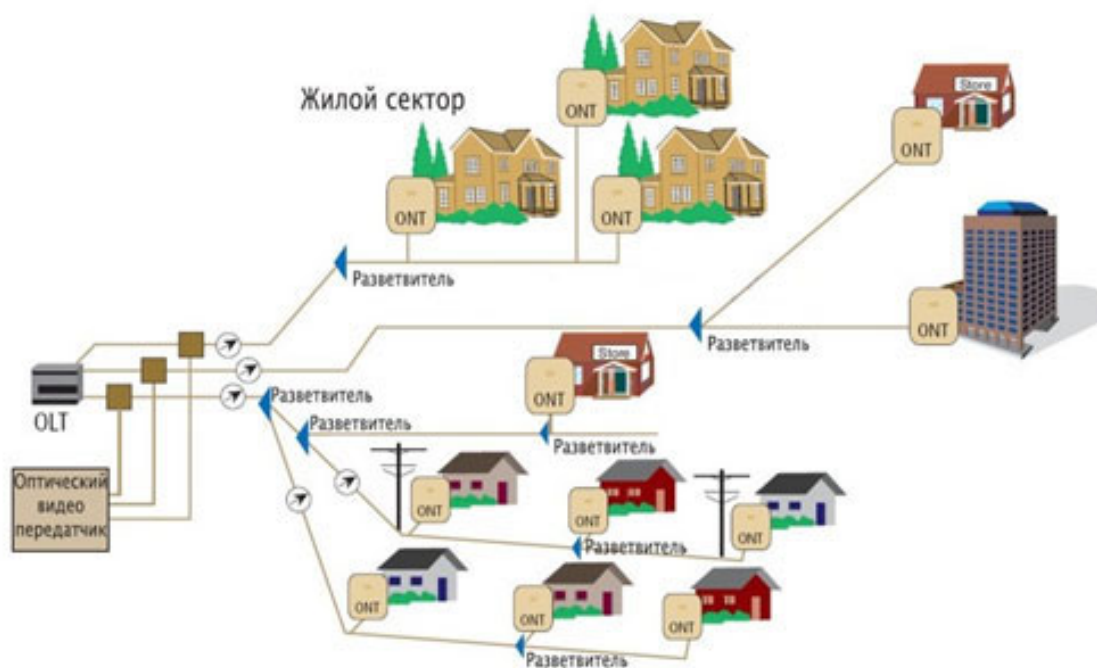


Рис. 1. Архитектура PON сети

Для передачи прямого и обратного каналов используется одно оптическое волокно, полоса пропускания которого динамически распределяется между абонентами, или два волокна в случае резервирования. Нисходящий поток (downstream) от центрального узла к абонентам идет на длине волны 1490 нм и 1550 нм для видео. Восходящие потоки (upstream) от абонентов идут на длине волны 1310 нм с использованием протокола множественного доступа с временным разделением (TDMA).

Для построения PON используется топология «точка – многоточка» и сама сеть имеет древовидную структуру. Каждый волоконно-оптический сегмент подключается к одному приемопередатчику в центральном узле (в отличие от топологии «точка - точка», что также дает значительную экономию в стоимости оборудования. Один волоконно-оптический сегмент сети PON может охватывать до 32 абонентских узлов в радиусе до 20 км для технологий EPON / BPON и до 128 узлов в радиусе до 60 км для технологии GPON

(Рис. 2). Каждый абонентский узел рассчитан на обычный жилой дом или офисное здание и в свою очередь может охватывать сотни абонентов. Все абонентские узлы являются терминальными, и отключение или выход из строя одного либо нескольких абонентских узлов никак не влияет на работу остальных (Табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика технологий PON

	APON	BPON	EPON (GEPON)	GPON
Стандарт	G.983	ITU G.983	IEEE 802.3ah	ITU G.984.6
Полоса пропускания для нисходящего потока	155 Мбит/с	622 Мбит/с	1,244 Гбит/с	2,488 Гбит/с
Полоса пропускания для восходящего потока	155 Мбит/с	155 Мбит/с	1,244 Гбит/с	1,244 Гбит/с
Емкость		32	32	64
Максимальная длина передачи, км		20	20	60
Затухание линии PON			26 дБ	22 дБ

Центральный узел PON может иметь сетевые интерфейсы ATM, SDH (STM-1), Gigabit Ethernet для подключения к магистральным сетям. Абонентский узел может предоставлять сервисные интерфейсы 10/100Base-TX, FXS (2, 4, 8 и 16 портов для подключения аналоговых ТА), E1, цифровое видео, ATM (E3, DS3, STM-1с).

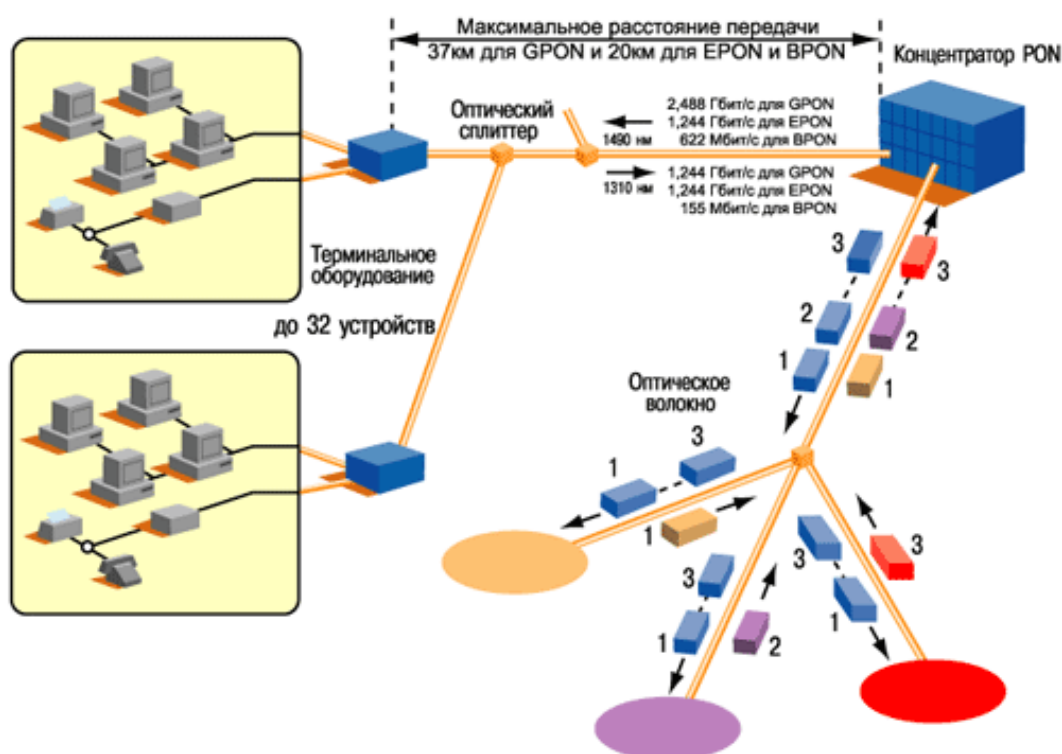


Рис. 2. Сравнение технологий

Подгруппа технологий пассивных оптических сетей (PON) – это семейство быстроразвивающихся, наиболее перспективных технологий широкополосного мультисервисного множественного доступа по оптическому волокну. Суть технологии

пассивных оптических сетей, вытекающая из ее названия, состоит в том, что ее распределительная сеть строится без каких-либо активных компонентов: разветвление оптического сигнала осуществляется с помощью пассивных делителей оптической мощности – сплиттеров (Рис. 3). Следствием этого преимущества является снижение стоимости системы доступа, уменьшение объема необходимого сетевого управления, высокая дальность передачи и отсутствие необходимости в последующей модернизации распределительной сети (Никитин, 2014: 47–49; Никульский, 2014: 23–27; Долотов, 2014: 67–73).

Суть технологии PON заключается в том, что между приемопередающим модулем центрального узла OLT (optical line terminal) и удаленными абонентскими узлами ONT (optical network terminal) создается полностью пассивная оптическая сеть, имеющая топологию дерева. В промежуточных узлах дерева размещаются пассивные оптические разветвители (сплиттеры) с коэффициентом разветвления до 1:64 или даже 1:128. – компактные устройства, не требующие питания и обслуживания. Один приемопередающий модуль OLT позволяет передавать информацию множеству абонентских устройств ONT. Число ONT, подключенных к одному OLT, может быть настолько большим, насколько позволяет бюджет мощности и максимальная скорость приемопередающей аппаратуры.

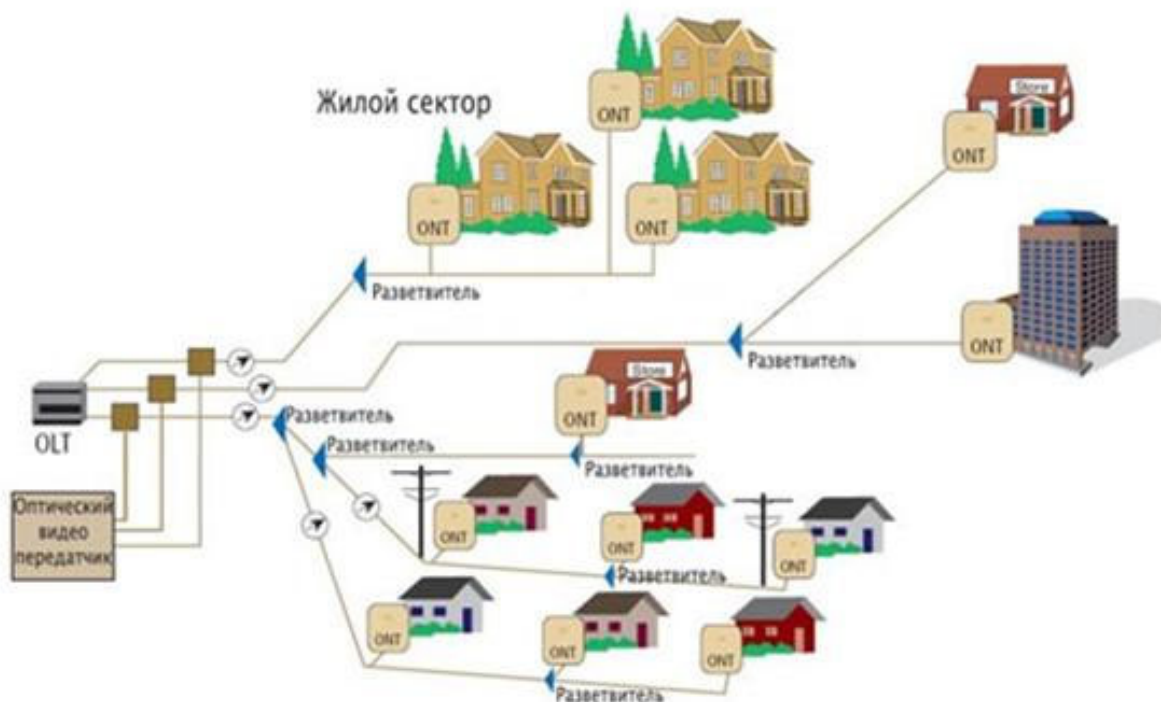


Рис. 3. Архитектура PON сети

Для передачи прямого и обратного канала используется одно оптическое волокно, полоса пропускания которого динамически распределяется между абонентами, или два волокна в случае резервирования. Нисходящий поток (downstream) от центрального узла к абонентам идет на длине волны 1490 нм и 1550 нм для видео. Восходящие потоки (upstream) от абонентов идут на длине волны 1310 нм с использованием протокола множественного доступа с временным разделением (TDMA). В некоторых случаях используется дополнительная длина волны нисходящего потока (downstream), что позволяет предоставлять традиционные аналоговые и цифровые телевизионные услуги пользователям без применения телевизионных приставок с поддержкой IP.

Для построения PON используется топология «точка – многоточка» и сама сеть имеет древовидную структуру. Каждый волоконно-оптический сегмент подключается к

одному приемопередатчику в центральном узле (в отличие от топологии “точка-точка”), что также дает значительную экономию в стоимости оборудования. Один волоконно-оптический сегмент сети PON охватывает до 32 абонентских узлов в радиусе до 20 км для технологий EPON / BPON и до 128 абонентских узлов в радиусе до 60 км для технологии GPON (Рис. 4). Каждый абонентский узел рассчитан на обычный жилой дом или офисное здание и в свою очередь может охватывать сотни абонентов. Все абонентские узлы являются терминальными, и отключение или выход из строя одного или нескольких абонентских узлов никак не влияет на работу остальных.

Архитектура FTTH на базе PON обычно поддерживает протокол Ethernet. Центральный узел PON может иметь сетевые интерфейсы ATM, SDH (STM-1), Gigabit Ethernet для подключения к магистральным сетям. Абонентский узел может предоставлять сервисные интерфейсы 10/100Base-TX, FXS (2, 4, 8 и 16 портов для подключения аналоговых телефонных абонентов), E1, цифровое видео, ATM (E3, DS3, STM-1).

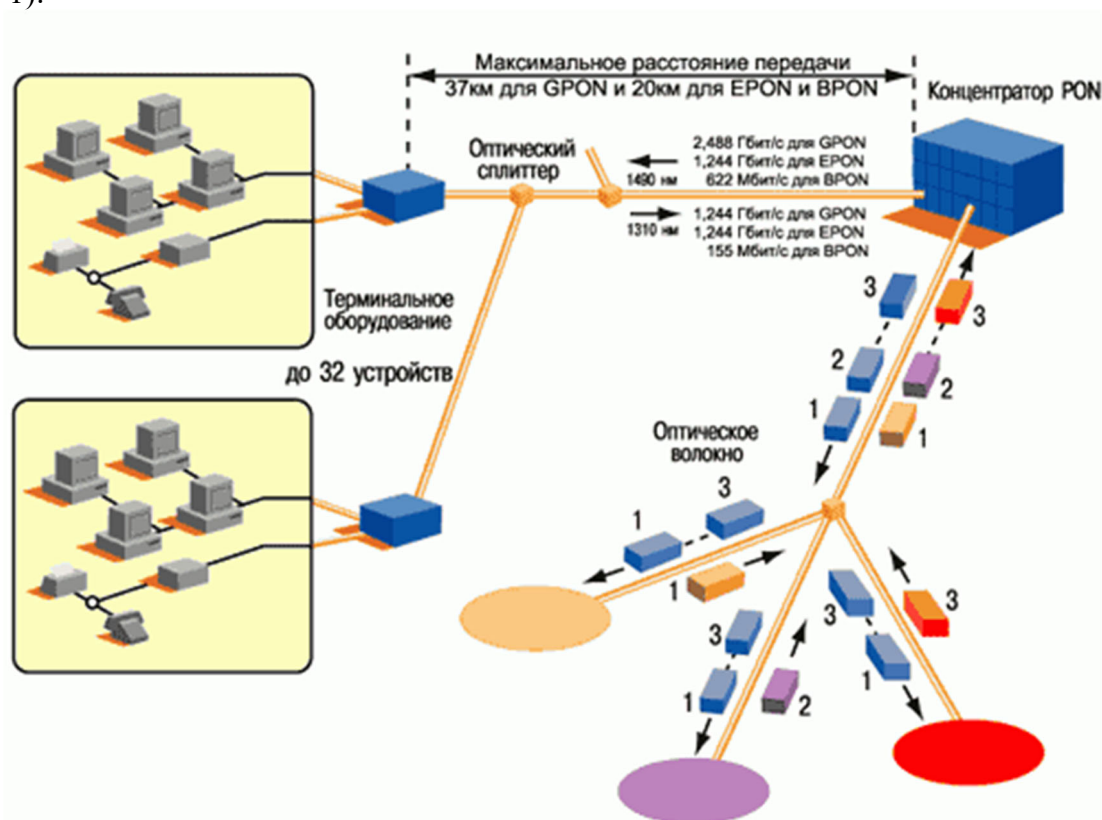


Рис. 4. Принцип временного разделения абонентов в технологии PON

На рисунке 5 изображена типичная пассивная оптическая сеть PON, в которой используются различные терминаторы оптической сети (optical network termination, ONT) или устройства оптической сети (optical network unit, ONU). ONT предназначены для использования отдельным конечным пользователем. Устройства ONU обычно располагаются на цокольных этажах или в подвальных помещениях и совместно используются группой пользователей. Голосовые сервисы, а также услуги передачи данных и видео доводятся от ONU или ONT до абонента по кабелям, проложенным в помещении абонента (Гаскевич, 2014: 80–86; Алексеев, 2014: 88).

В семействе сетей PON существует несколько разновидностей, отличающихся, в первую очередь, базовым протоколом передачи. Причем стандарты PON активно совершенствуются в направлении увеличения скорости передачи и дальности связи.

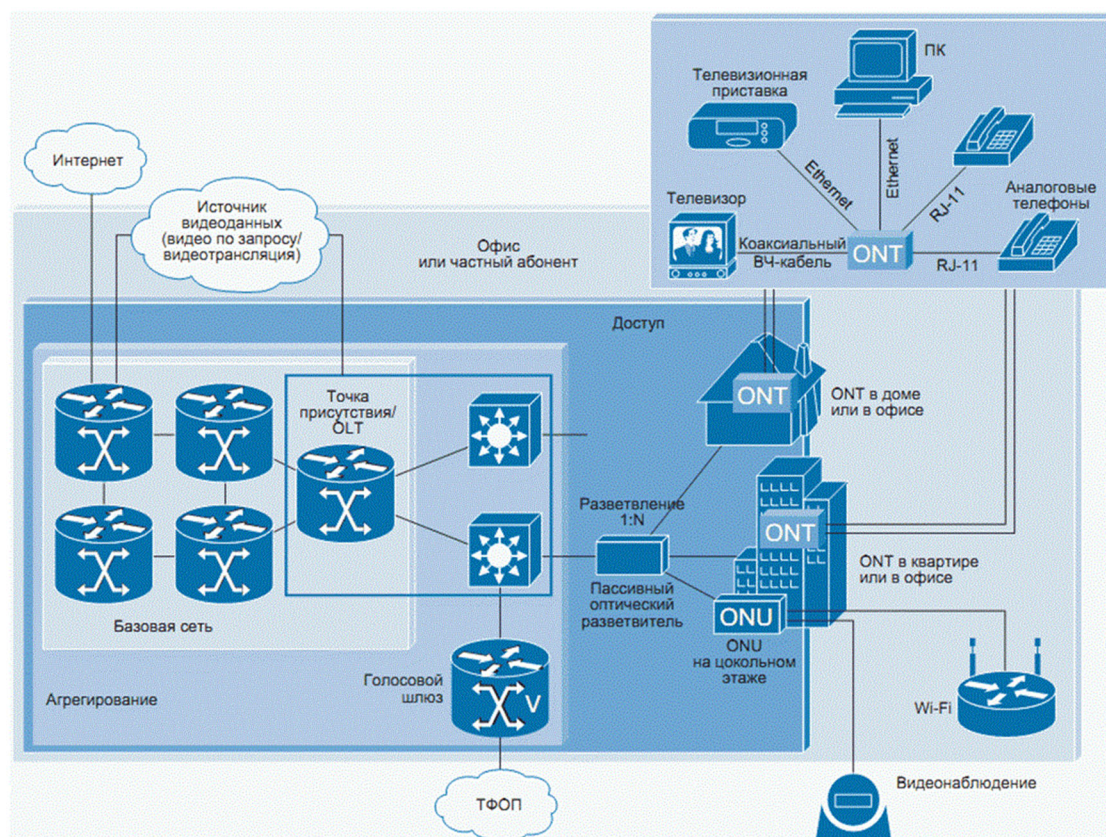


Рис. 5. Структура типичной пассивной оптической сети PON

Стандарт сети APON был создан международным консорциумом FSAN (Full Service Access Network) в 1995 году. В состав сети APON входят:

- один сетевой узел OLT (Optical Line Terminal),
- до 32 абонентских терминалов ONU (Optical Network Unit),
- пассивные оптические ответвители (splitter).

В стандарте APON обеспечивалась скорость передачи прямого и обратного потоков по 155 Мбит/с (симметричный режим) или 622 Мбит/с в прямом потоке и 155 Мбит/с в обратном (асимметричный режим). Во избежание наложения данных, поступающих от разных абонентов, OLT направляло на каждый ONU служебные сообщения с разрешением на отправку данных. Прямой и обратный каналы организуются в одном оптическом волокне за счет волнового уплотнения – передача к абонентам ведется на длине волны 1550 нм, а в обратном направлении – 1310 нм. Скорость передачи информации для индивидуального пользователя составляет 20 Мбит/с, а максимальное удаление пользователя от узла доступа – 20 км. В настоящее время APON в своем первоначальном виде практически не используется.

Стандарт BPON появился в результате эволюционного совершенствования технологии PON. В BPON скорость прямого и обратного потоков доведена до 622 Мбит/с в симметричном режиме или 1244 Мбит/с и 622 Мбит/с в асимметричном режиме. Предусмотрена возможность передачи трех основных типов информации (голос, видео, данные), причем для потока видеoinформации выделена длина волны 1550 нм. BPON позволяет организовывать динамическое распределение полосы между отдельными абонентами. После разработки более высокоскоростной технологии GPON, применение BPON практически утратило смысл чисто экономически (Алексеев, 2015: 56–60).

Стандарт EPON (Ethernet PON) появился в результате использования технологии Ethernet в локальных сетях и построение на их основе оптических сетей доступа. Такие сети, в основном, рассчитаны на передачу данных со скоростью прямого и обратного потоков 1

Гбит/с на основе IP-протокола для 16 (или 32) абонентов. Исходя из скорости передачи, в статьях и литературных источниках часто фигурирует название GEAPON (Gigabit Ethernet PON), которое также относится к стандарту IEEE 802.3ah. Дальность передачи в таких системах достигает 20 км. Для прямого потока используется длина волны 1490 нм, 1550 нм резервируется для видео приложений. Обратный поток передается на 1310 нм. Во избежание конфликтов между сигналами обратного потока применяется специальный протокол управления множеством узлов (Multi-Point Control Protocol, MPCP). В GEAPON также поддерживается операция bridging - обмена информацией между пользователями.

Технология GPON которая наследует линейку APON – BPON, но с более высокой скоростью передачи – 1244 Мбит/с и 2488 Мбит/с (в асимметричном режиме) и 1244 Мбит/с (в симметричном режиме) считается наиболее удачной для больших операторов, строящих большие разветвленные сети с системами резервирования. За основу GPON был принят базовый протокол SDH (а точнее SDH на протоколе GFP) со всеми вытекающими преимуществами и недостатками. В GPON возможно подключение до 32 (или 64) абонентов на расстоянии до 20 км (с возможностью расширения до 60 км). GPON поддерживает трафик ATM, IP, речь и видео (инкапсулированные в кадры GEM — GPON Encapsulated Method), а также модули SDH. Сеть работает в синхронном режиме с постоянной длительностью кадра. Линейный код NRZ со скремблированием обеспечивают высокую эффективность полосы пропускания. Единственным серьезным недостатком GPON является высокая стоимость оборудования.

Технология WDM PON является следующим эффективным шагом по увеличению скорости передачи построенных систем PON за счет применения систем оптического уплотнения WDM. В рекомендации ITU-T G.983.2 описана возможность передачи сигналов на выделенных для каждого абонента длинах волн. В сети передается общий поток, а каждый абонентский терминал имеет оптический фильтр для выделения своей длины волны. Технически возможно обеспечить производительность системы со скоростями около 4-10 Гбит/с по каждому каналу. После такой реконструкции провайдеры получают возможность настраивать пропускную способность в соответствии с требованиями клиента и успешно добавлять или удалять устройства ONU без вмешательства в общую систему. То есть, в будущем внедрение систем WDM PON принесет реальные преимущества операторам при незначительных затратах.

Отдельные разновидности PON имеют свои преимущества и недостатки, но в целом BPON, основанный на платформе ATM, уже не обеспечивает высокую скорость передачи и практически не имеет перспектив. Технология GPON является более удачной для сетей большой протяженности и емкости. Базовая платформа SDH обеспечивает хорошую защиту информации в сети, широкую полосу пропускания и другие преимущества. Однако более сложное и дорогостоящее оборудование хорошо окупается при высокой степени загрузки.

В GEAPON, в отличие от GPON, отсутствуют специфические функции поддержки TDM, синхронизации и защитных переключений, что делает эту технологию самой экономичной из всего семейства. Особенно это касается небольших операторов, ориентированных на IP-трафик, а впоследствии и IPTV. К тому же предполагается дальнейшее развитие этого ряда – 10GEAPON (по аналогии с 10 Gb Ethernet). Поэтому из-за наилучшего соотношения цена/качество при среднем размере сети, в нашей стране вариант GEAPON получил наибольшее распространение (Табл. 2).

Технология PON имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- невысокая стоимость построения сети;
- экономия оптико-волоконного кабеля на участке;
- низкие расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание сети;
- возможность постепенного наращивания сети;

- перспективность создания распределительной инфраструктуры, обеспечивающей в будущем развитие любых мультимедийных услуг с практически неограниченной полосой пропускания;

- высокая надежность за счет использования пассивного оборудования.

Таблица 2 – Сравнительная таблица по характеристикам стандартов PON

Характеристики	APON (BPON)	EPON (GEPON)	GPON
Институты стандартизации / альянсы	ITU-T SG15 / FSAN	IEEE / EFMA	ITU-T SG15 / FSAN
Дата принятия стандарта	октябрь 1998	июль 2004	октябрь 2003
Стандарт	ITU-T G.981.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
Скорость передачи, прямой/обратный поток, Мбит/с	155/155 622/155 622/622	1000/1000	1244/155, 622, 1244 2488/622, 1244, 2488
Базовый протокол	ATM	Ethernet	SDH (GFP)
Линейный код	NRZ	8B/10B	NRZ
Максимальный радиус сети, км	20	20 (>30 ¹)	20
Максимальное число абонентских узлов на одно волокно	32	16	64 (128 ²)
Приложения	любые	IP, данные	любые
Коррекция ошибок FEC	предусмотрена	нет	необходима
Длины волн прямого/обратного потоков, нм	1550/1310 (1480/1310)	1550/1310 (1310/13103)	1550/1310 (1480/1310)
Динамическое распределение полосы	есть	поддержка ⁴	есть
IP-фрагментация	есть	нет	есть
Защита данных	шифрование открытыми ключами	нет	шифрование открытыми ключами
Резервирование	есть	нет	есть
Оценка поддержки голосовых приложений и QoS	высокая	низкая	высокая
Динамический диапазон, дБ:			
– класс А	5-20		5-20
– класс В	10-25		10-25
– класс С	15-30		15-30
Интерфейс PX-10 (10 км)		5-20	
Интерфейс PX-20 (20 км)		10-24	

Примечания:

¹ - обсуждается в проекте;

² - стандарт допускает наращивание сети до 128 ONT;

³ - допускается передача в прямом и обратном направлении на одной и той же длине волны;

⁴ - осуществляется на более высоких уровнях.

Отметим типовые проблемные вопросы, с которыми сталкиваются провайдеры, при развертывании пассивной оптической сети PON.

Общая полоса пропускания. Полоса пропускания в дереве оптоволоконных линий сети PON используется как можно большим числом абонентов. Хотя технология GPON обеспечивает общую пропускную способность нисходящего потока, равную 2,5 Гбит/с, она не может соответствовать росту будущих требований абонентов в долгосрочной перспективе, поскольку потребности в пропускной способности растут экспоненциально. Особенно, если некоторую часть полосы пропускания необходимо резервировать для потоковых услуг (например, IPTV).

Шифрование. Поскольку PON — это технология с общей средой передачи, то необходимо шифрование всех потоков данных. В технологии GPON проводится шифрование AES с 256-разрядными ключами только нисходящего потока. Однако использование стандарта AES снижает производительность сети, т.к. для при шифровании необходима передача существенного объема служебной информации вместе с каждым пакетом.

Высокая рабочая скорость оконечных устройств. В связи с использованием в пассивных оптических сетях PON общей передающей среды, каждое оконечное устройство (ONT или OLT) вынуждено работать на единой максимальной скорости передачи данных. Даже если абоненту необходима скорость 25 Мбит/с, каждая конечная точка оптической сети (ONT) в дереве PON должна работать на скорости стандарта (2,5 Гбит/с для GPON). Работа электронных и оптических устройств со скоростью, в 100 раз превышающей необходимую скорость передачи данных, повышает цену компонентов.

Необходимость большей мощности оптического сигнала. При каждом разветвлении в соотношении 1:2 энергетический потенциал линии связи падает на 3,4 дБ. Следовательно, при разветвлении в соотношении 1:64 энергетический потенциал линии связи уменьшается на 20,4 дБ (эквивалентно отношению мощностей 110). В этом случае, все оптические передатчики должны обеспечивать в 110 раз большую мощность оптического сигнала по сравнению с архитектурой FTTH «точка-точка» при передаче на то же расстояние.

Доступ к абонентским линиям. Отделение абонентских линий (Local Loop Unbundling (LLU) — это метод, применяемый в сетях операторов телефонии для обеспечения доступа альтернативным операторам к абонентским медным линиям связи. Сети PON пока не удовлетворяют требованиям LLU, поскольку имеется только одна оптоволоконная линия для подключения группы абонентов, которая, следовательно, не может быть разделена на физическом уровне, а только на логическом уровне. Эта особенность пассивной оптической сети на базе PON предполагает массовую продажу услуг основного оператора без предоставления прямого абонентского доступа посредством отделения абонентских линий (LLU).

Неоптимальное использование ресурса сети. Обычно при развертывании сети FTTH выполняется одновременное подключение оптоволоконных линий связи для всех потенциальных абонентов в данном районе. Абоненты могут подписаться на сервис FTTH только после развертывания всех оптоволоконных линий. При развертывании услуг для частных абонентов провайдеры редко достигают 100 % подписки. Обычно этот показатель близок к 30%, что означает, что часть структуры PON простаивает, а сеть в целом используется не оптимально.

Сложность обслуживания, поиска и устранения неисправностей. Пассивные оптические разветвители не могут передавать информацию о неисправностях в центр управления сетью. Поэтому сложно обнаружить неисправность оптоволоконной линии между разветвителем и точкой терминирования оптической сети (ONT) абонента. Это значительно усложняет поиск и устранение неисправностей в сетях PON и повышает затраты на их эксплуатацию. Так же при повреждении точки терминирования оптической сети (ONT) она может передавать в дерево оптоволоконных линий постоянный световой сигнал, что приводит к нарушению связи для всех абонентов этой сети, причем найти поврежденное устройство очень трудно.

Вместе с тем указанные проблемные вопросы не являются критичными и по мнению многих аналитиков, рынок систем PON будет поступательно развиваться в течение ближайших трех-четырех лет, после чего начнется массовое внедрение систем в жилищном секторе.

Пример использования технологии PON для разворачивания телекоммуникационной сети в коттеджном поселке приведен на рисунке 6.

В решении Ethernet FTTH для коммутации линий подразумевается использование коммутаторов с оптическими портами или оптическими трансиверами.

В основе первых европейских проектов сетей Ethernet FTTH лежала архитектура, при которой коммутаторы, расположенные на цокольных этажах многоквартирных домов, были объединены в кольцо по технологии Gigabit Ethernet. Кольцевая структура обеспечивала прекрасную устойчивость к различного рода повреждениям кабеля и была

весьма рентабельной, но к ее недостаткам можно было отнести разделение полосы пропускания внутри

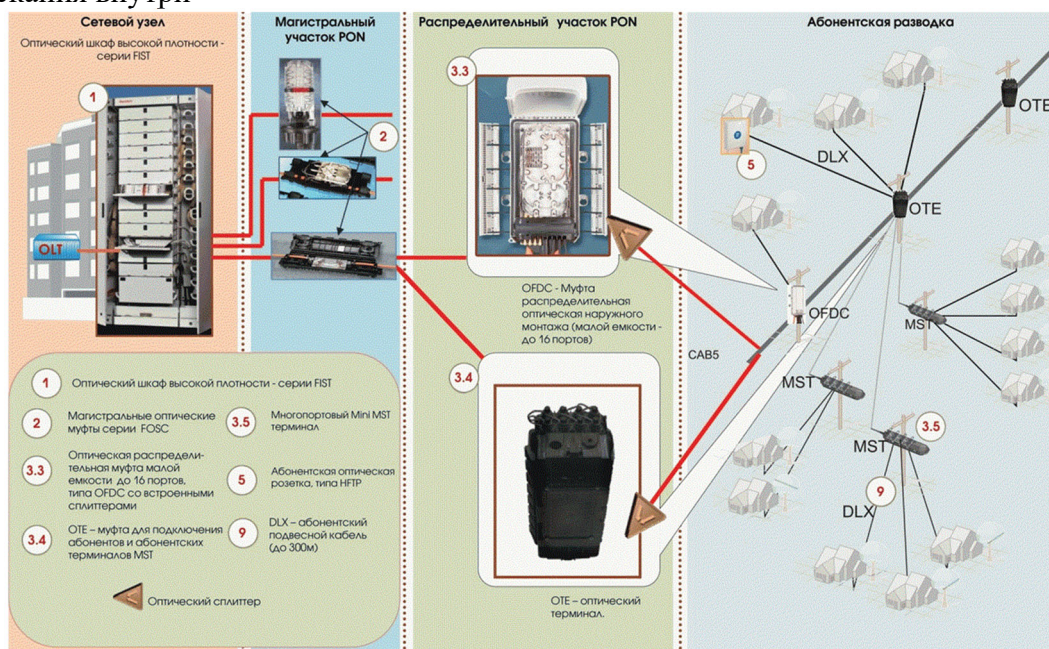


Рис. 6. Пример использования технологии PON для разворачивания телекоммуникационной сети в коттеджном поселке

каждого кольца доступа (1 Гбит/с), что давало в перспективе сравнительно небольшую пропускную способность, а также вызывало трудности масштабирования архитектуры.

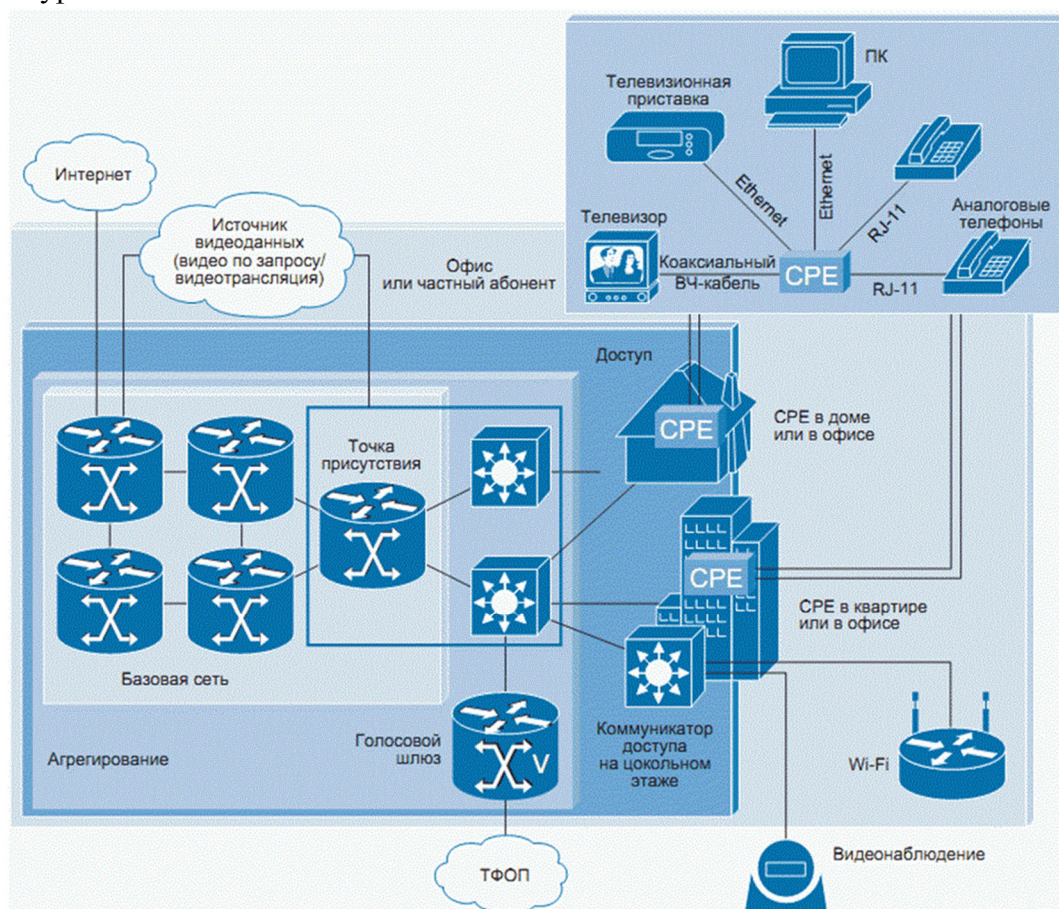


Рис. 7. Архитектура сети Ethernet FTTH типа «звезда»

Затем широкое распространение получила архитектура Ethernet типа «звезда» (Рис. 7). Такая архитектура предполагает наличие выделенных оптоволоконных линий (обычно одномодовых, одноволоконных линий с передачей данных Ethernet по технологии 100BX или 1000BX) от каждого оконечного устройства к точке присутствия (point of presence, POP), где происходит их подключение к коммутатору. К портам коммутатора подключаются устройства конечных пользователей. Такой подход обеспечивает высокий уровень надежности за счет возможности резервирования оптических каналов, и обеспечивает преимущество с существующей «медной» инфраструктурой.

Рассмотрим преимущества решений Ethernet FTTH перед архитектурой на базе PON. Практически неограниченная дискретная полоса пропускания. Оптоволоконная линия может обеспечить практически неограниченную полосу пропускания, что позволяет достичь максимальной гибкости в наращивании предоставляемых сервисов в будущем, когда потребность в пропускной способности возрастет. Архитектура Ethernet FTTH позволяет провайдеру гарантировать каждому абоненту необходимую пропускную способность и создавать в сети индивидуальные профили полосы пропускания для каждого клиента. Большой радиус действия. В типовых конфигурациях сетей доступа Ethernet FTTH применяются недорогие одноволоконные линии, использующие технологию 100BX или 1000BX, с заданным максимальным радиусом действия 10 км. Для работы на больших расстояниях имеются оптические модули, позволяющие увеличить мощность оптического сигнала, а также оптоволоконные пары с оптическими модулями, которые можно подключить к порту любого Ethernet-оборудования. Гибкое масштабирование сети. В случае появления новых абонентов можно добавить дополнительные карты Ethernet с высокой степенью модульности. Напротив, при использовании архитектуры на базе PON подключение первого абонента к оптическому дереву требует наличия наиболее дорогостоящего порта OLT, а при добавлении абонентов к тому же дереву PON стоимость подключения каждого абонента только увеличивается за счет приобретения ONT. Технологическая независимость оптико-волоконного канала. Хотя текущие конфигурации Ethernet FTTH могут использовать технологию Gigabit Ethernet, она может стать неактуальной в течение последующих 30-40 лет. Однако одномодовая оптоволоконная линия является средой, способной поддерживать любую новую технологию передачи. В отдельных случаях для подключения корпоративных абонентов используются оптоволоконные технологии, например SONET/SDH или Fibre Channel. Эти технологии могут быть легко развернуты по тем же оптоволоконным линиям, что и Ethernet FTTH, с использованием той же Ethernet-платформы агрегирования. Гибкое масштабирование скорости обслуживания абонентов. Поскольку одномодовые оптоволоконные линии не зависят от используемой технологии и скорости передачи данных, можно легко увеличить скорость для одного абонента, не влияя на работу других. Это означает, что абонент, использующий технологию Fast Ethernet, может перейти на Gigabit Ethernet за счет переключения оптоволоконной линии абонента на другой порт коммутатора и замены только Ethernet-устройства абонента. Отделение абонентских линий — это свойство, присущее архитектурам Ethernet FTTH. Реализация принципа отделения абонентских линий явилась главным критерием выбора технологии FTTH некоторыми компаниями в Европе, поскольку они стремились построить сети, где доступ к инфраструктуре оптоволоконной сети доступа могли бы иметь несколько провайдеров. Безопасность обеспечивается за счет того, что выделенная оптоволоконная линия является защищенной средой на физическом уровне. Кроме того, коммутаторы Ethernet, используемые у провайдеров, призваны обеспечить разделение физического уровня портов и логического уровня абонентов и имеют функции защиты, которые в состоянии предотвратить попытки вторжений.

К недостаткам Ethernet FTTH можно отнести узкую полосу пропускания и недостаточные возможности масштабирования телекоммуникационного ресурса.

При тестировании сети PON оператора обычно волнуют два основных вопроса:

1. Реальное затухание в оптической линии между центральным узлом и абонентским устройством (действующим или готовящимся к подключению).

2. Местоположение проблемного участка, если реальное затухание в линии оказалось выше ожидаемого (расчетного или опорного).

Для ответа на первый вопрос достаточно провести простые измерения с помощью оптического тестера. Второй вопрос более сложен и требует применения оптического рефлектометра (OTDR), а также определенного опыта расшифровки рефлектограмм.

Как правило, желательно, чтобы все необходимые измерения могли проводиться на работающей сети PON без отключения абонентов (кроме, возможно, тестируемого). Такое тестирование осуществляется на нерабочей длине волны с применением дополнительных устройств (волновых мультиплексоров DWDM, фильтров), чтобы излучение измерительной аппаратуры не вносило помех в полезный сигнал. Как уже упоминалось, в сети PON для прямого канала (от центра к абонентам) используется длина волны 1490 или 1550 нм (для видео), для обратного – 1310 нм. Для тестирования сети PON обычно используют длину волны 1625 нм.

Излучение измерительной аппаратуры (тестера, рефлектометра) вводится в волокно сразу после OLT с использованием волнового мультиплексора (DWDM). Это излучение способно вызвать помехи на оптическом приемнике абонентского устройства, поэтому перед каждым абонентским устройством ONT необходимо установить фильтр. Для того чтобы можно было проводить тестирование без отключения сети, волновой мультиплексор и фильтры должны быть стационарно включены в оптический тракт, (Рис. 8).

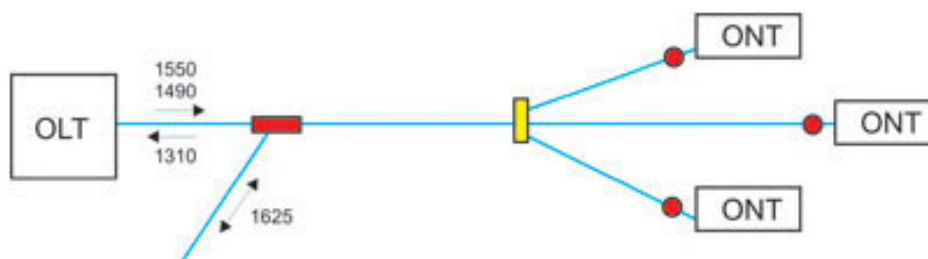


Рис. 8. Схема подключения волнового мультиплексора и фильтров к PON

Для измерения затухания в оптической линии между OLT и ONT используется оптический тестер на 1625 нм. Передатчик тестера подключается к свободному концу волнового мультиплексора на OLT. Приемник тестера подключается к свободному концу волокна перед фильтром, (Рис. 9).

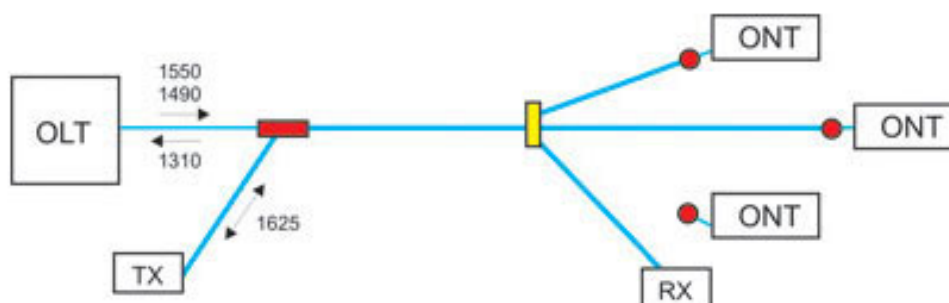


Рис. 9. Измерение затухания с отключением абонентского устройства

Можно измерять затухание и без отключения абонентского устройства. Для этого на ONT нужно использовать не фильтр, а волновой мультиплексор, как на центральном узле, (Рис. 10).

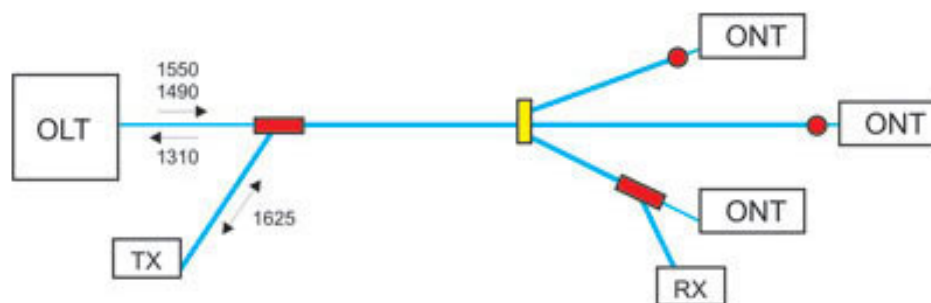


Рис. 10. Измерение затухания без отключения абонентского устройства

Затухание на длине волны 1625 нм несколько выше, чем на 1550 и 1490 нм (в среднем на 10 %). Поэтому тестирование затухания на длине волны 1625 нм дает оценку сверху для затухания на рабочих длинах волн. Если эта оценка укладывается в допустимый бюджет (23 дБ), то затухание на рабочих длинах волн заведомо удовлетворяет требованиям по бюджету. Если затухание на длине волны 1625 нм превышает допустимое значение, то для точного определения затухания на рабочих длинах волн необходимо провести перерасчет на основе паспорта оптического кабеля.

Измерение в PON с помощью оптического тестера позволяет получить реальное значение затухания на участке от OLT до ONT, но не дает ответа на вопрос, где находится проблемный участок, если это затухание оказалось выше ожидаемого (расчетного или опорного). Для локализации проблемного участка используется более сложное устройство – оптический рефлектометр (OTDR).

Рефлектометр с тестовым модулем на 1625 нм подключается к свободному концу волнового мультиплексора на OLT, (Рис. 11).

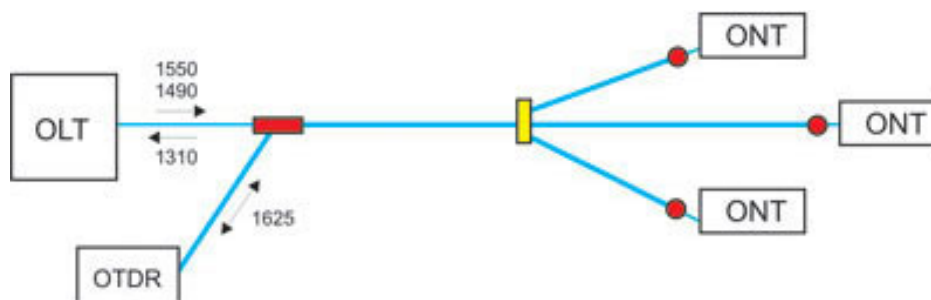
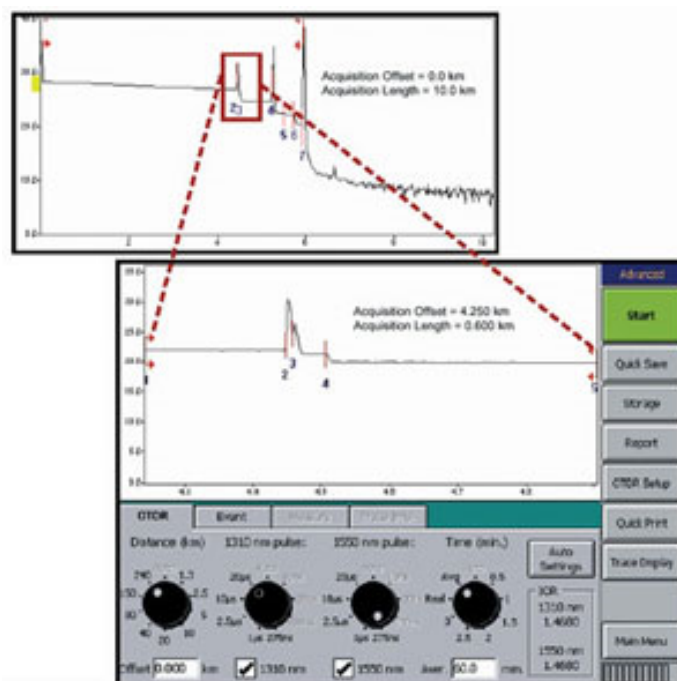


Рис. 11. Снятие рефлектограммы дерева PON

Излучение рефлектометра распространяется по дереву PON и за счет отражения на препятствиях и обратного рассеивания в оптическом волокне частично поступает обратно на вход рефлектометра. Таким образом, снимается рефлектограмма дерева PON – график затухания в линии в зависимости от расстояния. Каждый пик или скачок затухания на этом графике соответствует определенному элементу сети, либо событию в волокне.

Методика тестирования сети PON с использованием рефлектометра заключается в следующем. После каждого изменения топологии сети (подключения нового абонента, замены сплиттера и т.п.) снимается опорная (эталонная) рефлектограмма, соответствующая нормальному состоянию сети. При обнаружении проблем в сети (например, если затухание, измеренное оптическим тестером, оказалось выше расчетного) снимается новая рефлектограмма, которая сравнивается с опорной. Новые события на рефлектограмме локализуют местоположение проблемного участка, (Рис. 12).



Затухание:
 0.4 дБ/км,
 0.5 дБ на коннектор
 0.03 дБ на
 точку сварки
 3.5 дБ на
 сплиттер 1:2
 7.2 дБ на
 сплиттер 1:4
 10.7 дБ на
 сплиттер 1:8
 14.4 дБ на
 сплиттер 1:16

Рис. 12. Анализ новых событий на рефлектограмме.

С помощью рефлектометра можно вести мониторинг сети PON и обнаруживать деградации волокна еще до того, как возникнут проблемы. Для этого необходимо регулярно (например, раз в неделю) снимать рефлектограмму сети и сравнивать ее с опорной рефлектограммой. При появлении любых отклонений и тем более новых событий на рефлектограмме необходимо анализировать их возможные причины и при необходимости проводить адекватные профилактические мероприятия.

Основные преимущества технологии PON:

1. Экономия волокон. До 128 абонентов на одно волокно, протяженность сети до 60 км.
2. Эффективное использование полосы пропускания оптического волокна.
3. Скорость до 2,488 Гбит/с по нисходящему потоку и 1,244 Гбит/с по восходящему.
4. Надежность. В промежуточных узлах дерева находятся только пассивные оптические разветвители, не требующие обслуживания.
5. Масштабируемость. Древовидная структура сети доступа дает возможность подключать новых абонентов самым экономичным способом.
6. Возможность резервирования как всех, так и отдельных абонентов.
7. Гибкость. Использование ATM в качестве транспорта позволяет предоставлять абонентам именно тот уровень сервиса, который им требуется.
8. Данные по сети передаются в виде ячеек ATM.
9. Возможны симметричный и асимметричный режимы работы.

В процессе строительства сетей FTTx PON необходимо выполнять четыре основных измерения:

- однонаправленное измерение потерь в кабельной секции перед сваркой;
- двунаправленное измерение оптических возвратных потерь (ORL);
- двунаправленное измерение оптических потерь между двумя оконечными точками;
- двунаправленное снятие характеристик линии;
- снятие рефлектограммы каждого участка оптической линии, включая сплиттеры.

В процессе ввода в эксплуатацию сетей FTTx PON необходимо выполнять два основных измерения:

- измерение оптической мощности на выходе OLT;
- измерение оптической мощности прямого и обратного потоков ветви сети PON при добавлении каждого нового ONT.

Заключение.

В ходе исследования сетей пассивного оптического доступа (PON) с архитектурой FTTH была проведена комплексная работа, включающая теоретический анализ, экспериментальные измерения и моделирование. Цели исследования заключались в изучении особенностей построения PON, выявлении преимуществ и ограничений различных архитектур, оценке качества передачи данных и выработке рекомендаций по оптимизации сетей FTTH. Для достижения этих целей были использованы аналитический, сравнительный и экспериментальный методы, а также моделирование и анализ архивных материалов (Скляров и др., 2013: 110–116; Никульский, 2013: 49–50).

Проведенный анализ литературы и технических стандартов PON позволил систематизировать существующие подходы к построению оптических сетей, выявить ключевые параметры и требования к оборудованию, а также определить актуальные направления развития технологий широкополосного доступа. В частности, рассмотрены архитектуры GPON, EPON и WDM PON, их возможности по числу абонентов, дальности передачи и пропускной способности (Гольдштейн, 2013: 67–69; Комашинский и др., 2013).

Экспериментальная часть исследования, включавшая измерение параметров оптических линий с помощью OTDR и тестеров, позволила оценить реальное состояние сетей и выявить проблемные участки, влияющие на качество передачи данных. Результаты показали, что при соблюдении стандартов установки и эксплуатации PON достигается высокая надежность и стабильность работы сети, а применение современных методов тестирования обеспечивает своевременное выявление и устранение неисправностей.

В результате проведенного исследования подтверждена гипотеза о том, что правильная организация сети PON с учетом технических стандартов и использования современных методов контроля качества обеспечивает эффективное и надежное предоставление широкополосного доступа абонентам. Полученные результаты позволяют обобщить текущие знания о сетях PON и сделать вывод о целесообразности внедрения FTTH в городских и пригородных условиях, где требуется высокая пропускная способность и надежность передачи данных (Никульский, 2013: 49–50).

Практическое значение работы заключается в возможности применения предложенных рекомендаций при проектировании и модернизации сетей PON. В частности, результаты исследования могут быть использованы для выбора оптимальной архитектуры сети, планирования разветвлений, расчета нагрузки на оборудование и определения методов мониторинга качества линии. Это обеспечивает повышение эффективности эксплуатации сети и сокращение времени на обслуживание.

Перспективы дальнейшей работы связаны с интеграцией технологий PON с новыми стандартами передачи данных, включая 10G-PON и NG-PON2, а также с применением интеллектуальных методов мониторинга и анализа сети на основе больших данных и алгоритмов искусственного интеллекта. Также важным направлением является изучение экономической эффективности внедрения PON в различных регионах с учетом плотности населения, требований к качеству услуг и стоимости оборудования.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать вывод, что сети PON FTTH являются перспективным решением для обеспечения широкополосного доступа и стабильной передачи данных. Реализация целей и методов исследования подтвердила истинность выдвинутого тезиса, а полученные результаты способствуют расширению научного знания в области телекоммуникаций и создают основу для практического применения и дальнейших исследований в этой сфере.

ЛИТЕРАТУРА

- Гольдштейн, 2013 — А.Б. Гольдштейн, Н.А. Соколов. Подводная часть айсберга по имени NGN // Технологии и средства связи. — 2013. — № 1. — С. 67–69. [Russ.]
- Никульский, И.Е., 2013 — И.Е. Никульский. Модель оптической сети доступа GPON // Вестник связи. — 2013. — № 2. — С. 49–50. [Russ.]
- Скляр, 2013 — О.К. Скляр, Е.А. Заркевич, С.А. Устинов. Волоконно-оптические технологии как основа развития широкополосных сетей доступа // Технологии и средства связи. — 2013. — № 3. — С. 110–116. [Russ.]
- Комашинский, 2013 — В.И. Комашинский, И.Е. Никульский, О.А. Степуленок. Горизонты WDM-PON // Вестник связи. — 2013. — № 9. — С. 34–38. [Russ.]
- Петренко, 2013 — И.И. Петренко, Р.Р. Убайдуллаев. Пассивные оптические сети PON. Часть 3. Проектирование оптимальных сетей // LIGHTWAVE RUSSIAN EDITION. — 2013. — № 3. — С. 12–15. [Russ.]
- Бубличенко, 2013 — Н.С. Бубличенко. Широкополосный доступ в рамках архитектуры FTТх: эффективные решения компании // Первая миля (журнал "СТР"). — 2013. — № 5. — С. 110–116. [Russ.]
- Горнак, 2013 — А.В. Горнак. Новые горизонты PON // Технологии и средства связи. — 2013. — № 4. — С. 220–225. [Russ.]
- Никитин, 2014 — А.В. Никитин, В.О. Пяттаев, И.Е. Никульский, А.А. Филиппов. Концепция построения мультисервисной сети оператора связи // Вестник связи. — 2014. — № 5. — С. 47–49. [Russ.]
- Никульский, 2014 — И.Е. Никульский. Технологии PON: вчера, сегодня, завтра // Вестник связи. — 2014. — № 3. — С. 23–27. [Russ.]
- Долотов, 2014 — Д.В. Долотов. Оптические технологии в сетях доступа // Технологии и средства связи, спецвыпуск «Системы абонентского доступа». — 2014. — С. 67–73. [Russ.]
- Гаскевич, 2014 — Е.И. Гаскевич. Оптические сети многоэтажного дома. Ключевые характеристики и определения для кабельной подсистемы // Технологии и средства связи. — 2014. — № 3. — С. 80–86. [Russ.]
- Алексеев, 2014 — Е.Б. Алексеев, О.К. Скляр, С.А. Устинов. Спектральное уплотнение оптических каналов в современных ВОСП // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. — 2014. — № 1. — С. 88. [Russ.]
- Алексеев, 2015 — Е.Б. Алексеев, И.А. Булавкин, А.Г. Попов, В.И. Попов. Пассивные волоконно-оптические сети. Проектирование, оптимизация и обнаружение несанкционированного доступа // Технологии и средства связи. — 2015. — № 3. — С. 56–60. [Russ.]

REFERENCES

- Goldshtein, 2013 — Goldshtein, A.B., Sokolov, N.A. (2013). Podvodnaya chast' aysberga po imeni NGN // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2013. — № 1. — Pp. 67–69. [in Russ.]
- Nikul'skiy, 2013 — Nikul'skiy, I.E. (2013). Model' opticheskoy seti dostupa GPON // Vestnik svyazi. — 2013. — № 2. — Pp. 49–50. [in Russ.]
- Sklyarov, 2013 — O.K. Sklyarov, E.A. Zarkevich, S.A. Ustinov. Volokonno-opticheskie tekhnologii kak osnova razvitiya shirokopolosnykh setey dostupa // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2013. — № 3. — Pp. 110–116. [in Russ.]
- Komashinskiy, 2013 — V.I. Komashinskiy, I.E. Nikul'skiy, O.A. Stepulenok. Gorizonty WDM-PON // Vestnik svyazi. — 2013. — № 9. — Pp. 34–38. [in Russ.]
- Petrenko, 2013 — I.I. Petrenko, P.P. Ubaydullaev. Passivnye opticheskie seti PON. Chast' 3. Proektirovanie optimal'nykh setey // LIGHTWAVE RUSSIAN EDITION. — 2013. — № 3. — Pp. 12–15. [in Russ.]
- Bublichenko, 2013 — N.S. Bublichenko. Shirokopolosnyy dostup v ramkakh arkhitektury FTТх: effektivnye resheniya kompanii // Pervaya mile (zhurnal "STR"). — 2013. — № 5. — Pp. 110–116. [in Russ.]
- Gornak, 2013 — A.V. Gornak. Novye gorizonty PON // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2013. — № 4. — Pp. 220–225. [in Russ.]
- Nikitin, 2014 — Nikitin, A.V., Pyattaev, V.O., Nikul'skiy, I.E., Filippov, A.A. (2014). Kontseptsiya postroyeniya multiservisnoy seti operatora svyazi // Vestnik svyazi. — 2014. — № 5. — Pp. 47–49. [in Russ.]
- Nikul'skiy, 2014 — I.E. Nikul'skiy. Tekhnologii PON: vchera, segodnya, zavtra // Vestnik svyazi. — 2014. — № 3. — Pp. 23–27. [in Russ.]
- Dolotov, 2014 — D.V. Dolotov. Opticheskie tekhnologii v setyakh dostupa // Tekhnologii i sredstva svyazi, spetsvypusk «Sistemy abonentskogo dostupa». — 2014. — Pp. 67–73. [in Russ.]
- Gaskevich, 2014 — E.I. Gaskevich. Opticheskie seti mnogoetazhnogo doma. Klyuchevye kharakteristiki i opredeleniya dlya kabel'noy podsystemy // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2014. — № 3. — Pp. 80–86. [in Russ.]
- Alekseev, 2014 — E.B. Alekseev, O.K. Sklyarov, S.A. Ustinov. Spektral'noe uplotnenie opticheskikh kanalov v sovremennykh VOSP // FOTON-EKSPRESS. — 2014. — № 1. — P. 88. [in Russ.]
- Alekseev, 2015 — E.B. Alekseev, I.A. Bulavkin, A.G. Popov, V.I. Popov. Passivnye volokonno-opticheskie seti. Proektirovanie, optimizatsiya i obnaruzhenie nesanksionirovannogo dostupa // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2015. — № 3. — Pp. 56–60. [in Russ.]