

МРНТИ 28.17.33
УДК 004.6

<https://doi.org/10.51889/2021-3.1728-7901.18>

А.Т. Тохметов^{1*}, А.Д.Тусупов¹, Л.А.Танченко¹

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан
*email: attohmetov@mail.ru

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРИ СОЗДАНИИ РАСШИРЕННОЙ ГИГАБИТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ

Аннотация

В статье описывается применение анализа данных, позволяющего на основании обработанных экспериментальных данных получить новые знания о поведении и возможностях гигабитной пассивной оптической сети (GPON-сети). Приводится описание испытательного стенда GPON-сети. В работе были изучены характеристики полупроводниковых оптических усилителей, используемых для увеличения дальности действия GPON-сетей, а также их зависимости от входных мощностей и длины волны сигнала. Для обработки данных были использованы пакет автоматизации математических расчетов MatLab и пакет для численного анализа данных и научной графики OriginLab. Показано, что применение усилителя EDFA (оптического усилителя на волокне, легированном эрбием) в архитектуре гигабитной пассивной оптической сети является наилучшим выбором и позволяет расширить дальность действия GPON-сети с 20 километров до 60 километров.

Ключевые слова: анализ данных, технология GPON, оптические сети, масштабирование сети.

Аңдатпа

А.Т. Тохметов^{1*}, А.Д.Тусупов¹, Л.А.Танченко¹

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан

КЕҢЕЙТІЛГЕН ГИГАБИТТІК ОПТИКАЛЫҚ ЖЕЛІНІ ҚҰРУ КЕЗІНДЕГІ ДЕРЕКТЕРДІ ТАЛДАУ

Мақалада өңделген эксперименттік мәліметтер негізінде гигабиттік пассивті оптикалық желінің (GPON желісі) мінез-құлқы мен мүмкіндіктері туралы жаңа білім алуға мүмкіндік беретін деректерді талдаудың қолдануы сипатталған. GPON желісінің сынақ стендінің сипаттамасы келтірілген. Жұмыста GPON желілерінің ауқымын ұлғайту үшін қолданылатын жартылай өткізгіш оптикалық күшейткіштердің сипаттамалары, сондай-ақ олардың кіріс қуаты мен сигналдың толқын ұзындығына тәуелділігі зерттелді. Деректерді өңдеу үшін MatLab математикалық есептеулерді автоматтандыру пакеті және OriginLab сандық деректерді талдау және ғылыми графика пакеті қолданылды. Гигабиттік пассивті оптикалық желінің архитектурасында EDFA күшейткішін (эрбиймен легіріленген талшықтағы оптикалық күшейткіш) қолдану ең жақсы таңдау болып табылады және GPON желісінің ауқымын 20 шақырымнан 60 шақырымға дейін кеңейтуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: деректерді талдау, GPON технологиясы, оптикалық желілер, желіні масштабтау.

Abstract

DATA ANALYSIS WHEN CREATING AN EXTENDED GIGABIT OPTICAL NETWORK

Tokhmetov A.T.^{1*}, Tusupov A.D.¹, Tanchenko L.A.¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

The article describes the application of data analysis, which allows, based on the processed experimental data, to obtain new knowledge about the behavior and capabilities of a gigabit passive optical network (GPON network). The description of the test bench of the GPON network is given. The paper studied the characteristics of semiconductor optical amplifiers used to increase the range of GPON networks, as well as their dependence on the input power and signal wavelength. For data processing, the MatLab mathematical calculation automation package and the OriginLab package for numerical data analysis and scientific graphics were used. It is shown that the use of an EDFA amplifier (an optical amplifier on an erbium-doped fiber) in the architecture of a gigabit passive optical network is the best choice and allows expanding the range of the GPON network from 20 kilometers to 60 kilometers.

Keywords: data analysis, GPON technology, optic networks, scaling the network.

Введение

Передача потока информации по волоконно-оптическим линиям связи - на сегодняшний день самый быстрый и качественный способ передачи данных на большие расстояния. Высокая пропускная способность оптического волокна позволяет передавать информацию на высокой скорости, недостижимой для других систем связи. Одним из путей развития волоконно-оптических

коммуникационных сетей являются технология PON (Passive Optical Network) - технология пассивных оптических сетей [1, 2].

Сущность технологии PON – это использование всего одного приемо-передающего модуля OLT (Optical Line Terminal) для передачи информации множеству абонентских устройств ONT (Optical Network Terminal) и приема информации от них. К одному порту OLT присоединяется целый волоконно-оптический сегмент древовидной архитектуры, охватывающий множество абонентов [3]. В промежуточных узлах дерева устанавливаются пассивные оптические разветвители (сплиттеры), не требующие никакого питания и обслуживания (рисунок 1).



Рисунок 1. Условная архитектура PON-сети

Архитектура сети доступа GPON (Gigabit PON) – гигабитных пассивных оптических сетей – является развитием технологии PON. При этом реализуется как увеличение полосы пропускания сети PON, так и повышение эффективности передачи различных мультисервисных приложений. Согласно рекомендациям Международного союза электросвязи (ITU-T G.984) GPON-сеть поддерживает оптический бюджет мощности в 28 дБ, что на практике приводит к ограничениям фактора разветвления OLT к числу ONU - 1:32 и ограничению дальности действия сети не более 20 км [4].

Гибридная TDM/WDM GPON-сеть является эффективным решением для оптических сетей доступа. Этот метод доступа сочетает преимущества технологий временного мультиплексирования (TDM) и спектрального уплотнения (WDM), что позволяет повысить эффективность сети. Это сочетание технологий позволяет передавать данные, уплотненные во времени, по всем спектрально уплотненным каналам, что приводит к увеличению количества абонентов.

Как уже отмечалось выше, из-за бюджетных потерь сети архитектура GPON имеет ограниченный радиус действия в 20 км. Из-за этого ограничения трудно возникают проблемы с обслуживанием клиентов, расположенных на более дальних расстояниях от центрального узла связи. Поэтому проблема удлинения радиуса действия GPON-сети является актуальной и требует своего решения. Рассмотрим некоторые исследования в этой области.

Проект PIEMAN (Photonic Integrated Extended Metro and Access Network) являлся проектом Европейского Союза [5]. В данном проекте выполнялись исследования на гибридной TDM/WDM GPON-сети с 32 каналами, где каждый канал имеет пропускную способность в 10 Гбит/с прямого и обратного потока до каждого абонента. Для усиления сигнала использовался полупроводниковый оптический усилитель EDFA. Исследователям удалось добиться удлинения радиуса действия сети до 100 км для прямого и обратного потока. Однако вскоре выяснилось, что обратный поток по своим параметрам не соответствует требованиям Международного союза электросвязи (ITU-T). Оказалось, что обратный поток находился в режиме пульсирующего трафика и требовал принятия дополнительных мер по стабилизации потока. Из-за неполного подавления шумом в диапазоне возникали перекрестные помехи, которые накладывали существенные ограничения на фактор разветвления [6]. В работе [7] экспериментально исследовалась GPON-сеть с четырьмя общепринятыми TDM приемо-передатчиками с симметричными трафиками в 2,5 Гбит/с для прямого и обратного потоков. Для усиления сигнала использовался полупроводниковый оптический усилитель (ППОУ) - Рамановский усилитель. Результаты показали достижимость расширения зоны досягаемости сети до 60 км с фактором разветвления 1:128. Однако технология усиления сигнала с помощью Рамановского усилителя оказалась очень дорогой в эксплуатации, так требовал наличия мощного лазера накачки. Кроме того, Рамановский усилитель показал низкий ДДВМ (динамический диапазон для входных мощностей) для обратного потока. В работе [8] для получения расширенной GPON-сети был использован ППОУ на длине волны 1,3 мкм. ППОУ показал умеренный коэффициент шума (7 дБ) и высокий коэффициент усиления (30 дБ). Была показана возможность реализации GPON-сети с расширенной зоной досягаемости до 60 км с одним каналом для прямого и обратного потока с оптическим разветвлением 1:32.

Методология исследования

В ходе исследования определялись основные параметры усилителя оптического сигнала, оказывающие наибольшее влияние на возможности гигабитной оптической сети: коэффициент оптического усиления, мощность насыщения и шум-фактор.

Коэффициент оптического усиления G оптического усилителя равен отношению мощности оптического сигнала на выходе к мощности оптического сигнала на входе этого усилителя [9]:

$$G = \frac{P_{S\ out}}{P_{S\ in}}, \quad g = p_{S\ out} - p_{S\ in} \quad (1)$$

где $P_{S\ in}$ и $P_{S\ out}$ – мощности сигналов на входе и выходе усилителя (маленькие буквы относятся к уровням мощности, выраженным в логарифмических единицах $p = 10 \cdot \lg(P/1 \text{ мВт})$ [дБм]).

Мощность насыщения $P_{out\ sat}$ определяет максимальную выходную мощность усилителя. Чем больше это значение, тем больше радиус действия сети (расстояние безретрансляционного участка). Этот параметр варьируется в зависимости от модели оптического усилителя.

Шум-фактор NF характеризует качество оптического сигнала и определяется как уменьшение отношения сигнал-шум при прохождении сигнала через тракт обработки сигнала. В применении к оптическому усилителю NF выражается формулой:

$$NF = \frac{OSNR_{in}}{OSNR_{out}} = \frac{\frac{P_{S\ in}}{P_{N\ in}}}{\frac{P_{S\ out}}{P_{N\ out}}} \quad (2)$$

где $(OSNR_{in})$ - отношение сигнал-шум на входе усилителя, $(OSNR_{out})$ - отношение сигнал-шум на выходе усилителя. В свою очередь, $OSNR$ - это отношение мощности полезного сигнала к мощности шума в спектральном интервале $\Delta\gamma$, определяемом окном фильтра или демультиплексора на приемной стороне [10]. Часто значение шум-фактора, как и значение коэффициента усиления, указывается в децибелах: $nf = 10 \cdot \lg NF$ [дБ].

Работа цифровых систем связи считается нормальной только в том случае, если коэффициент битовых ошибок BER не превышает определенный допустимый уровень, зависящий от используемого сетевого стандарта. В аппаратуре оптических систем измерение коэффициента битовых ошибок необходимо производить в каждом оптическом канале, что занимает много времени. Поэтому для сокращения времени контроля канала без перерыва передачи информации используется метод на основе оценки Q -фактора ($Quality$ – качество). Q -фактор определяется по формуле:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (3)$$

где μ_1 и μ_0 - графическая зависимость значения сигнала («1» и «0») и дисперсии шума σ_1 и σ_0 относительно уровня принятия решения о передаче логической «1» или «0».

Схема экспериментальной установки для определения досягаемости оптических усилителей для прямого и обратного потока показана на рисунке 2, где два аттенюатора имитируют потери в линиях связи и в ветвях доступа, заданные фильтром WDM и потерями в ветвях соответственно.

Для изучения процессов, происходящих при передаче сигнала в гибридной TDM/WDM GPON-сети, был построен экспериментальный стенд (рисунок 3), на котором моделировалось поведение GPON-сети с заданными потерями в ветвях доступа и в линиях связи. Установка состоит из центрального узла с приемо-передающим модулем OLT, 60-километрового оптического волокна (SMF-28), расширительной коробки для оптических усилителей, устройств мультиплексора/демультиплексора, пассивного оптического разветвителя (1:32) и абонентского узла ONT.

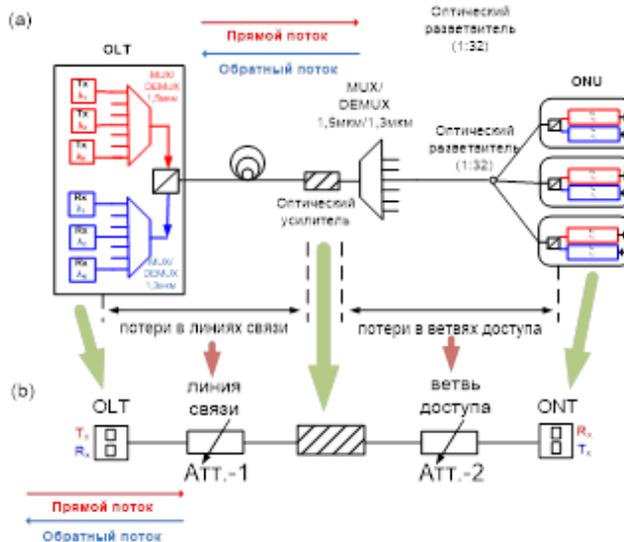


Рисунок 2.

(a) Экспериментальная установка для определения досягаемости усилителей.
 (b) Упрощенная схема установки

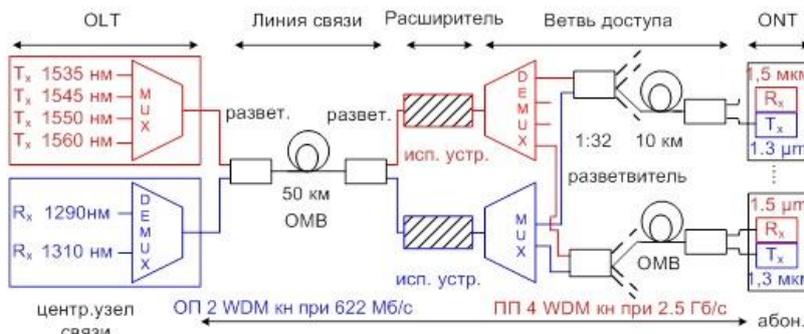


Рисунок 3. Испытательный стенд расширенной WDM/TDM GPON сети

Установка передатчика OLT для прямого потока состоит из четырех лазерных источников, настроенных на длину волны 1535 нм, 1544 нм, 1550 нм и 1560 нм. Все четыре канала объединены через 3 дБ-соединитель и подключены на скорости 2,5 Гбит/с к модулятору. Модулированные каналы усиливаются выходным каскадным операционным усилителем EDFA. Каналы демультиплексируются, рассогласовываются между собой, а затем заново мультиплексируются и подключаются к сети. Установка приемника ONT для прямого потока состоит из предварительного усилителя EDFA, регулируемого фильтра с полосой пропускания 0,6 нм и аттенюатора для управления мощностью принимаемого сигнала, чтобы предотвратить перегрузку на фотодиод анализатора цифровой связи (АЦС). АЦС используется для измерения Q -фактора (коэффициент качества) и визуализации глазковой диаграммы сигнала. Q -фактор 15,6 дБ соответствует частоте появления ошибочных битов – 10^{-9} [11].

Установка передатчика ONU для обратного потока состоит из двух регулируемых лазерных источников, настроенных на длину волны 1290 нм и 1310 нм, объединенных через 3 дБ-соединитель и подключенных к модулятору. Усилитель EDFA используется как выходной каскадный операционный усилитель. Каналы демультиплексируются, рассогласовываются между собой, затем снова мультиплексируются и подключаются к сети. Установка приемника OLT для обратного потока состоит из регулируемого фильтра с полосой пропускания 2 нм и устройства контроля коэффициента ошибочных битов. Частота появления ошибочных битов ниже 10^{-9} считается безошибочной.

В качестве оптических усилителей использовали усилитель EDFA, объемные ППОУ, ППОУ-КТ (полупроводниковые усилители на квантовых точках) для прямого потока, а для обратного потока ППОУ-КЯ (полупроводниковые усилители на квантовых ямах) и ППОУ-КТ. Список оптических усилителей и их основные характеристики приведены в таблице 1 [12].

Таблица 1. Список оптических усилителей, используемых в экспериментальных измерениях для прямого потока (ПП) и обратного потока (ОП).

	Оптический усилитель	Название образца	Рабочий диапазон длин волн [мкм]	Угол наклона волновода [°]	Ширина [мм]	Длина [мм]
ПП	EDFA	AFC SR2384	1,55	–	–	–
	объемный	Alcatel	1,55	7	2	0,7
	ППОУ-КТ	Alcatel	1,55	7	1,75	1
ОП	ППОУ-КЯ	Covega	1,3	7	2	3
	ППОУ-КТ	DO957	1,3	8	2	4

Результаты и обсуждение

Экспериментальные значения оптических сигналов и их зависимости были оцифрованы, выражены в графическом виде и проанализированы в плане расширения дальности действия GPON-сети. Для обработки данных были использованы пакет автоматизации математических расчетов MatLab и пакет для численного анализа данных и научной графики OriginLab.

При построении GPON-сети во главу угла ставится вопрос об оптическом бюджете мощности сети. Оптический бюджет - это величина затухания в сети, при которой полученный сигнал еще достаточно мощный, чтобы приемник сигнала мог его принять без ошибок. Оптический бюджет мощности GPON-сети равен разнице между мощностью передатчика OLT и чувствительностью приёмника в ONU, выраженной в дБ [13].

Поэтому вначале определим оптический бюджет нашей TDM/WDM GPON-сети и измерим величину расширения сети при использовании различных оптических усилителей – на сколько возросла вследствие этого оптическая мощность сети. Полученные результаты расширения оптического бюджета исследуемой GPON-сети показаны на рисунке 4 (красная кривая – сеть с усилителем EDFA, черная кривая - сеть с объемным ППОУ, синяя кривая - сеть с ППОУ-КТ).

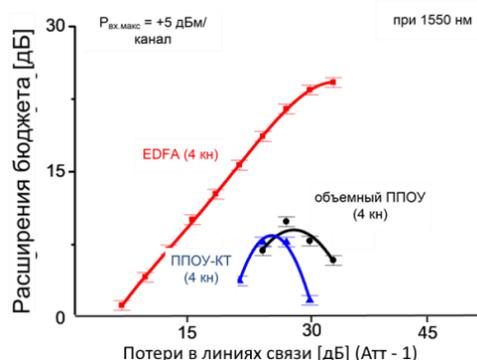


Рисунок 4. Сравнение расширений бюджета для различных усилителей для прямого потока

Для прямого потока оптические усилители работали на длинах волн 1535, 1544, 1550 и 1560 нм, а результаты зафиксированы для Q-факторов больших, чем 15,6 дБ. Расширение бюджета (РБ) рассчитывалось как разница между потерями в линии связи с усилителем и без усилителя:

$$РБ = Att_1|_{Q>15,6}^{с усил.} - Att_1|_{Q>15,6}^{без усил.} \quad (4)$$

Входная мощность в усилитель составляет +5 дБ, при отсутствии потерь в линиях связи. Это соответствует стандарту G.984 ITU-T Международного союза электросвязи для лазерных диодов [14].

Из рисунка 4 видно, что расширение бюджета сети с усилителем EDFA возрастает с увеличением потерь на линии. Таким образом, можно сказать, что расширение бюджета зависит от понижения входных канальных мощностей на усилитель. Это объясняется свойствами коэффициента усиления EDFA, который (как показано на рисунке 5) увеличивается с понижением входных мощностей $P_{вх}$.

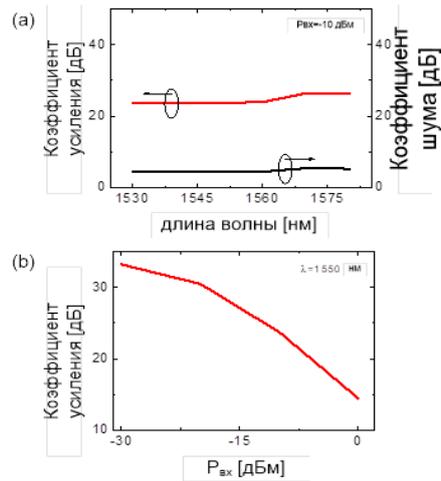


Рисунок 5. Зависимость коэффициента усиления и коэффициента шума усилителя EDFA от длины волны и входных мощностей

Кроме того, на рисунке 4 показаны зависимости расширения бюджета от потерь в линиях связи для объемного ППОУ (кривая черного цвета) и для ППОУ-КТ (кривая синего цвета). Полупроводниковые оптические усилители функционируют одновременно с четырьмя каналами, и результаты измерения показаны для длины волны 1550 нм. Бюджет усилителей увеличивается с увеличением потерь на линии (Атт-1) до тех пор, пока не достигнет максимального значения 8 дБ. Затем с дальнейшим увеличением потерь на линии бюджет усилителя будет уменьшаться.

Для измерения расширения бюджета сети с усилителями ППОУ-КЯ и ППОУ-КТ для обратного потока с двумя каналами на разных длинах волн использовалась та же установка. Показатели расширения бюджета сети в зависимости от потерь в ветвях доступа (Атт-2) показаны на рисунке 6. Потери в ветвях доступа – это потери в фильтре, в оптическом разветвителе и собственные потери в ветвях доступа [13]. Для обратного потока оптические усилители работают одновременно на длинах волн 1290 нм и 1310 нм, результаты получены для частоты появления ошибочных битов (ЧПОБ) не ниже 10^{-9} . Расширение бюджета (РБ) рассчитывалось как разница между потерями в линии связи с усилителем и без усилителя:

$$РБ = Атт_2 \Big|_{BER \leq 10^{-9}}^{с усил.} - Атт_2 \Big|_{BER \leq 10^{-9}}^{без усил.} \quad (5)$$

Входная мощность в усилитель составляла +5 дБ при отсутствии потерь в ветвях доступа.

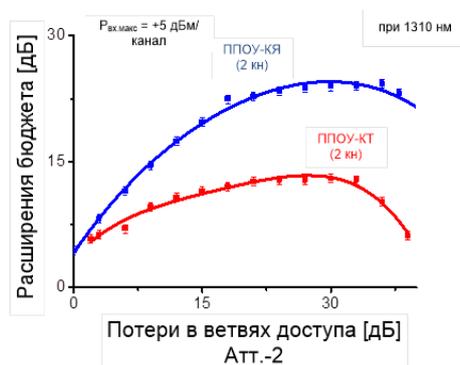


Рисунок 6. Сравнение расширений бюджета для различных усилителей для обратного потока

Зависимость расширения бюджета от потерь в ветвях доступа для сети с ППОУ-КЯ (кривая синего цвета) показана на рисунке 6, и была измерена одновременно с двумя рассогласованными каналами. Расширение бюджета сети с ППОУ-КЯ увеличивается с увеличением потерь в ветви доступа (Атт-2)

до тех пор, пока расширение бюджета не достигнет максимального уровня в 25 дБ. Затем, при дальнейшем увеличении потерь в ветвях доступа величина расширения бюджета понижается. Когда потери в ветвях доступа составляют 0 дБ (канальная входная мощность равна +5 дБм), то расширение бюджета сети с ППОУ-КЯ составляет около 4 дБ. Расширение бюджета увеличивается с увеличением потерь в ветвях (или понижением канальной входной мощности) до тех пор, пока расширение бюджета не достигнет максимального значения в 25 дБ для потерь в ветвях в 30 дБ.

Усилители ППОУ-КЯ устойчивы к высоким входным мощностям и имеют незначительные перекрестные помехи. Импульс сигнала искажается небольшим всплеском импульса и интерференционными эффектами (рисунок 7). Но эти искажения не так сильно влияют на качество сигнала, что позволяет приемнику принимать сигнал при ЧПОБ не выше значения 10^{-9} . Максимальный коэффициент усиления в режиме малого сигнала находится около значения 29 дБ (рисунок 7 (а)), а максимальное расширение бюджета сети составляет около 25 дБ (рисунок б).

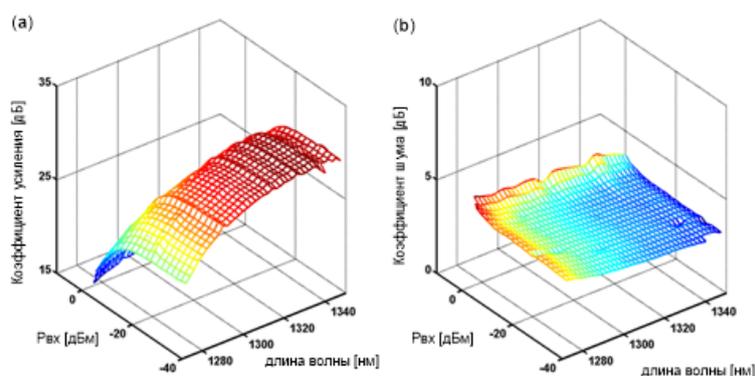


Рисунок 7. Зависимость коэффициента усиления (а) и коэффициента шума (б) ППОУ-КЯ от входных мощностей и от длины волны

Зависимость расширения бюджета сети от потерь в ветвях доступа для ППОУ-КТ на длине волны 1310 нм (кривая красного цвета на рисунке б) была получена при работе усилителя с двумя рассогласованными каналами одновременно. Расширение бюджета сети с усилителем ППОУ-КТ увеличивается с увеличением потерь в ветви доступа ($Att-2$). При умеренных потерях в ветви доступа расширение бюджета сети достигает максимального значения в 13 дБ. Затем, при дальнейшем увеличении потерь в ветвях доступа, расширение бюджета сохраняется на постоянном уровне до значения потерь в ветвях доступа в 33 дБ.

Максимальный коэффициент усиления для ППОУ-КТ в режиме малого сигнала находится около значения 15 дБ (рисунок 8 (а)). Усилители ППОУ-КТ устойчивы к высоким входным мощностям и имеют незначительные перекрестные помехи. Вследствие шумов импульс сигнала немного искажается (рисунок 8 (б)). Но эти искажения несильно влияют на качество сигнала, что позволяет приемнику принимать сигнал при ЧПОБ не ниже значения 10^{-9} .

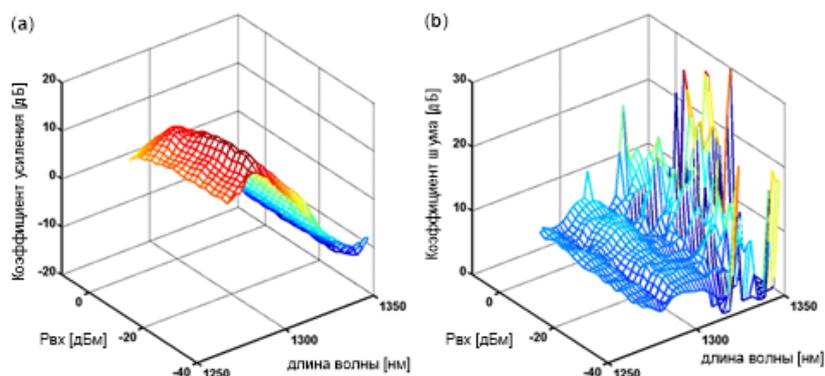


Рисунок 8. Зависимость коэффициента усиления (а) и коэффициента шума (б) ППОУ-КТ от входных мощностей и от длины волны

В приемнике оптического сигнала полученная информация должна быть восстановлена с приемлемой частотой появления ошибочных битов (ЧПОБ). Чувствительность приёмника при подключении передатчика и приемника напрямую (непрерывно) и чувствительность приемника при подсоединении усилителя перед приемником могут различаться, так как усилитель искажает полезный сигнал шумами и интерференционными эффектами. Разница между чувствительностями приёмника с испытываемым усилителем и прямым подключением передатчика и приемника называется расхождением мощностей.

Расхождение мощностей (PM) рассчитывается как разница между мощностями чувствительности приёмника с усилителем и без усилителя при качестве сигнала $Q^2 \geq 15,6$ дБ.

$$PM = P_{\text{чув.прием}}^{\text{с усил}}|_{BER \leq 10^{-9}} - P_{\text{чув.прием}}^{\text{без усил}}|_{BER \leq 10^{-9}} \quad [\text{дБ}] \quad (6)$$

Диапазон расхождения мощностей для Q -фактора выше 15,6 дБ определяется как динамический диапазон входных мощностей (ДДВМ). ДДВМ усилителя показывает полезный диапазон между малыми и большими входными мощностями в усилитель. Чувствительность приёмника для прямого потока составляла около -33,7 дБм. Зависимости расхождения мощностей от канальной входной мощности для усилителей EDFA (кривая красного цвета), объемный ППОУ (кривая черного цвета) и ППОУ-КТ (кривая синего цвета) для прямого потока показаны на рисунке 9.

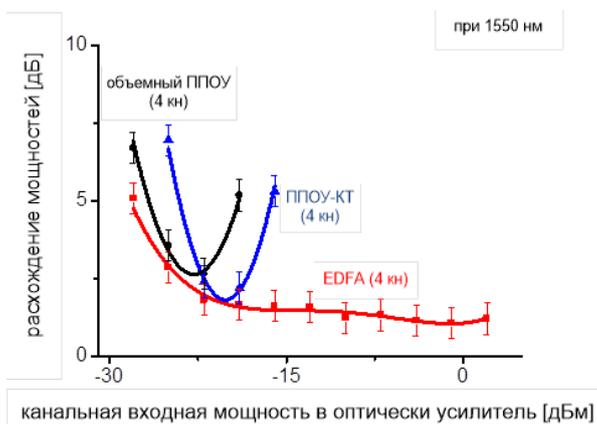


Рисунок 9. Сравнение расхождений мощностей для усилителей EDFA, объемного ППОУ и ППОУ-КТ

Для усилителя EDFA при умеренных уровнях входных мощностей до -22 дБм расхождение мощностей поддерживается на низком значении около 1 дБ. Для малых значений входных мощностей, меньших чем -22 дБм, расхождение мощностей увеличивается до 5 дБ. Усиленный сигнал усилителем EDFA показывает низкий уровень искажения и отсутствие интерференционных эффектов на высоких уровнях входных мощностей, а также отсутствие перекрестных помех при функционировании четырех каналов.

Для объемного ППОУ и ППОУ-КТ зависимость расхождения мощностей от канальной входной мощности при функционирующих четырех каналах показаны для длины волны 1550 нм (рисунк 9). Усиленные сигналы на высоких входных мощностях искажены сильными интерференционными эффектами и перекрестными помехами и не могут превысить качества сигнала выше $Q^2 \geq 15,6$ дБ. ППОУ-КТ достигают этого качества сигнала только при канальной входной мощности ниже -16 дБм, а объемный ППОУ достигает при -19 дБм. Для обеих кривых расхождение мощностей составляет 5 дБ. Высокий уровень расхождения мощностей происходит из-за влияния на качество сигнала интерференционных эффектов и перекрестных помех. На очень низкой канальной входной мощности сигналы в объемных ППОУ и ППОУ-КТ искажаются шумами.

Заключение

Подведем итоги экспериментальных исследований по удлинению оптического бюджета для расширенной сети GPON для прямого потока (таблица 2) и для обратного потока (таблица 3).

Таблица 2. Сравнение результатов экспериментальных измерений характеристик оптических усилителей для прямого потока.

Усилитель	макс. удлинение бюджета [дБ]	при потерях в ветвях [дБ]	среднее расхождение мощности [дБ]	P_{ex} [дБ]	ДДВМ [дБ]	расхождение мощности [дБ]
EDFA	24	32	<1	+2÷-20	30	отсутствует
ППОУ-КТ	9	25	>2	-20	9	<5.5
объем. ППОУ	9	28	>2	-23	9	error-floor

Таблица 3. Сравнение результатов экспериментальных измерений характеристик оптических усилителей для обратного потока.

Усилитель	макс. удлинение бюджета [дБ]	при потерях в ветвях [дБ]	среднее расхождение мощности [дБ]	P_{ex} [дБ]	ДДВМ [дБ]	расхождение мощности [дБ]
ППОУ-КЯ	25	30	<1	-8÷-27	>36	отсутствует
ППОУ-КТ	13	21÷33	<1	+3÷-27	>34	отсутствует

Полученные результаты показали, что применение оптических усилителей в архитектуре GPON-сети позволяет расширить дальность действия такой сети с 20 до 60 километров. При этом усилитель EDFA по сравнению с другими усилителями показал себя как оптимальный вариант для преодоления потерь мощности в сети, т.к. он имеет высокий коэффициент усиления, широкий динамический диапазон, отсутствие интерференционных эффектов при высоких уровнях входных мощностей и отсутствие перекрестных помех.

Методы анализа экспериментальных данных позволили изучить и улучшить возможности существующих коммуникационных сетей, построенных на основе технологии GPON. В данной работе были изучены характеристики полупроводниковых оптических усилителей, используемых для увеличения дальности действия GPON-сетей, а также их зависимости от входных мощностей и длины волны оптического сигнала. Анализ этих зависимостей раскрывает механизмы функционирования промежуточных устройств оптической сети и позволяет получить новые знания о возможностях исследуемой системы. Эти знания, в свою очередь, позволяют решить основную задачу – увеличение дальности действия GPON-сетей.

Список использованной литературы

- 1 Никульский И.Е. Технологии PON: вчера, сегодня, завтра / И.Е. Никульский // Вестник связи – 2009. - № 3. - С. 23-27.
- 2 Меккель А. М. Технологии пассивной оптической сети / А. М. Меккель // Фотон-Экспресс - 2015. - № 7. - С. 28-32.
- 3 Keiser G. Optical Communications Essentials / Georg Keiser. - McGraw-Hill Publishing, 2003. – 348 p.
- 4 ITU-T, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics, ITU-T Recommendation G.984, 2008.
- 5 Rohde H., Randel S. Project PIEMAN: a European approach to a symmetrical 10 Gbit/s, 100 km, 32 λ and 512 split PON, Proc. SPIE 6353, Optical Transmission, Switching, and Subsystems IV, 635304 (21 September 2006); <https://doi.org/10.1117/12.688820>.
- 6 Baekelandt B., Melange C., Ossieur P., Bauwelinck J., De Ridder T., Qiu X., Vandewege J., Smith D., Davey R. Impact of crosstalk on multi-wavelength high split PON networks // BroadBand Europe. Antwerp, Belgium (3-6 December 2007); <https://doi.org/10.229052>.
- 7 Nasset D., Kelly T., Appathurai S. and Davey R. Extended Reach GPON Using High Gain Semiconductor Optical Amplifiers // 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication OFC/NFOEC – 2008. – P. 56-61.

- 8 Iannone P.P., Lee H.H., Reichmann K.C., Zhou X., Du M., Pálsdóttir B., Feder K., Westbrook P, Brar K., Mann J. and Spiekman L. Hybrid CWDM Amplifier Shared by Multiple TDM PONs // National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) – 2007. – P.13-19.
- 9 Connelly M. J. Semiconductor Optical Amplifiers / Michael J. Connelly. - Kluwer Academic, 2002. – 177 p.
- 10 Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев. - Москва: Экотрендз, 2000. - 268 с.
- 11 Horvath T., Radil J., Munster P., Bao N. Optical Amplifiers for Access and Optical Networks: A Tutorial. / Tomas Horvath, Jan Radil, Petr Munster, Ning-Hai Bao // Applied Sciences – 2020. - №10(17): 5912; <https://doi.org/10.3390/app10175912>
- 12 Довольнов Е.А. Кузнецов В.В., Миргород В.Г., Шарангович С.Н. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем передачи / Е.А. Довольнов, В.В. Кузнецов, В.Г. Миргород, С.Н. Шарангович. – Томск: ТГУ систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 156 с.
- 13 Гибадуллин Р.Ф., Никитин А.П., Перухин М.Ю. Построение сети на основе GPON / Р.Ф. Гибадуллин, А.П. Никитин, М.Ю. Перухин // Вестник технологического университета – 2017. - Т.20. - №5. - С.104-108.

References

- 1 Nikul'skij I.E. (2009) Tekhnologii PON: vchera, segodnya, zavtra [PON technologies: yesterday, today, tomorrow]. Vestnik svyazi, № 3, P.23-27. (in Russian)
- 2 Mekkel' A. M. (2015) Tekhnologii passivnoj opticheskoy seti [Passive optical network technologies]. Foton-Ekspress, № 7, P.28-32. (in Russian)
- 3 Keiser G. (2003) Optical Communications Essentials / Georg Keiser. - McGraw-Hill Publishing, 348 p.
- 4 ITU-T, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics, ITU-T Recommendation G.984, 2008.
- 5 Rohde H., Randel S. (2006) Project PIEMAN: a European approach to a symmetrical 10 Gbit/s, 100 km, 32 λ and 512 split PON, Proc. SPIE 6353, Optical Transmission, Switching, and Subsystems IV, 635304 (21 September 2006); <https://doi.org/10.1117/12.688820>.
- 6 Baekelandt B., Melange C., Ossieur P., Bauwelinck J., De Ridder T., Qiu X., Vandewege J., Smith D., Davey R. (2007) Impact of crosstalk on multi-wavelength high split PON networks // BroadBand Europe. Antwerp, Belgium (3-6 December 2007); <https://doi.org/12.8547/10.229052>.
- 7 Nessel D., Kelly T., (2008) Appathurai S. and Davey R. Extended Reach GPON Using High Gain Semiconductor Optical Amplifiers // 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication OFC/NFOEC. P.56-61.
- 8 Iannone P.P., Lee H.H., Reichmann K.C., Zhou X., Du M., Pálsdóttir B., Feder K., Westbrook P, Brar K., Mann J. and Spiekman L. (2007) Hybrid CWDM Amplifier Shared by Multiple TDM PONs. National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), P.13-19.
- 9 Connelly M. J. (2002) Semiconductor Optical Amplifiers / Michael J. Connelly. - Kluwer Academic, 177 p.
- 10 Ubajdullaev R.R. (2000) Volokonno-opticheskie seti [Fiber-optic networks]. M.: Ekotrendz, 268. (in Russian)
- 11 Horvath T., Radil J., Munster P., Bao N. (2020) Optical Amplifiers for Access and Optical Networks: A Tutorial. / Tomas Horvath, Jan Radil, Petr Munster, Ning-Hai Bao // Applied Sciences. №10(17): 5912; <http://doi.org/10.3390/app10175912>
- 12 Dovol'nov E.A. Kuznecov V.V., Mirgorod V.G., SHarangovich S.N. (2016) Mul'tipleksornoe i usilitel'noe oborudovanie mnogovolnovykh opticheskikh sistem peredachi [Multiplexer and amplifying equipment of multi-wave optical transmission systems]. Tomsk: Publ. of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 156. (in Russian)
- 13 Gibadullin R.F., Nikitin A.P., Peruhin M.YU. (2017) Postroenie seti na osnove GPON [Building a GPON-based network]. Kazan: Bulletin of the Technological University, №5 (20), 104-108. (in Russian)