На правах рукописи

## ШИХАЛИЕВ ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ

# УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОДНОПРОЛЕТНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ С РАМАНОВСКИМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

Специальность 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 2019

Работа прошла апробацию в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научный центр волоконной оптики Российской академии наук и обществе с ограниченной ответственностью «Научно технический центр Т8»

Научный руководитель:	Наний Олег Евгеньевич		
	доктор	физико-математических	наук,
	профессор.		

Ведущая организация: федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики».

Защита состоится 23.12.2019 в 10:00 на заседании диссертационного совета ФРКТ.05.12.13.002 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php

Работа представлена «22» октября 2019 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

2

<u>Актуальность темы.</u> Оптические телекоммуникации и, в частности, волоконнооптические линии связи (ВОЛС) сегодня де-факто являются одной из наиболее быстро развивающихся отраслей народного хозяйства. Причиной этого развития является, прежде всего, резкое увеличение количества передаваемой информации повсеместно.

Одно из направлений развития ВОЛС – увеличение производительности однопролетных линий связи. Главным отличием однопролетных линий является отсутствие необходимости в подводе электропитания к промежуточным точкам, что позволяет существенно снизить стоимость строительства и эксплуатации в сложных условиях. Примерами могут служить линии для организации связи между островами, удаленными прибрежными городами, побережьем и нефтяными платформами, а также для прокладки по труднодоступной и малонаселенной местности (рис. 1).



Рис. 1. Примеры применения однопролетных линий связи: а – для соединения между островами; б – для соединения с нефтяными платформами; в – для прокладки в труднодоступных и малонаселенных районах.

Производительностью систем связи называется величина, равная произведению скорости передачи информации на дальность передачи. На сегодняшний день самыми производительными системами связи являются когерентные системы с форматом модуляции DP-QPSK [1]. Применение более сложных многоуровневых форматов модуляции, таких как DP-8QAM, DP-16QAM, DP-64QAM, позволяет повысить символьную эффективность, однако, приемо-передающие устройства с новыми форматами модуляции требуют для работы более высокого отношения сигнал-шум, что, в свою очередь, ведет к сокращению длины линии. Выигрыш в производительности при этом не будет получен, так как относительное уменьшение длины линии преобладает над относительным увеличением скорости передачи. Для увеличения производительности систем связи с форматом модуляции DP-QPSK, применяются дополнительные способы увеличения дальности ВОЛС.

На сегодняшний день рекордная дальность однопролетных линий связи достигает свыше 600 км. В основном рекордные дальности для линий со специальным волокном достигаются в лабораторных экспериментах [2–8]. В 2016 году компанией Хtera был установлен рекорд передачи одного канала со скоростью 100 Гбит/с на расстояние 626,8 км [9]. В том же году компанией Huawei Marine был превзойден этот рекорд. Представителям Huawei удалось передать 100 Гбит/с канал на расстояние 648,5 км с суммарными потерями в линии свыше 100 дБ [10]. Нельзя не отметить успехов лидеров Российских телекоммуникаций, которые установили рекорды передачи в 2013 и 2014 годах [2,3,11]. В 2014 году Российской компанией Т8 был установлен рекорд передачи информации со скоростью 1 Тбит/с (10 каналов по 100

Гбит/с) на расстояние больше 500 км [4]. Подобные рекордные дальности достигаются путем использования мощных многостадийных рамановских накачек [12], оптических усилителей с удаленной накачкой (Remote Optically Pumped Amplifier) и специального оптического волокна с низкими потерями. На рисунке 2 изображена схема реальной волоконно-оптической линии в ОАЭ с применением волокна с низкими потерями (Corning SMF-28 ULL). Использование данных технологий позволяет уменьшить количество оптических усилителей в тракте.

Накачка на удаленные эрбиевые усилители может доставляться как с попутной стороны (со стороны передатчика), так и со встречной (со стороны приемника). Для доставки накачки может использоваться как телекоммуникационное волокно, в котором распространяется сигнал, так и дополнительное волокно или волокна.



Рис. 2. ВОЛС в ОАЭ на основе специального оптического волокна с низкими потерями Corning SMF-28 ULL.

Чтобы достичь предельных дальностей, как в лабораторных экспериментах, на практике в линиях связи должна быть предусмотрена специальная конструкция еще на этапе прокладки кабеля. Однако менять конструкцию сети не всегда является экономически оправданным решением, поэтому на практике более распространена задача строительства однопролетных линий связи максимальной дальности с использованием существующего (стандартного) волокна и без модернизации кабельной инфраструктуры (т.е. без установки ROPA). Для повышения дальности передачи в этом случае применяются распределенное рамановское усиление сигнала в волокне, предварительная настройка суммарной входной мощности и перекоса мощности каналов, предварительная компенсация дисперсии и другие приемы. Максимальная дальность многоканальных однопролетных линий такого типа на сегодняшний день составляет около 250 км. При их проектировании используются технические наработки и алгоритмы расчета, апробированные в ходе создания рекордных линий [13].

#### Степень разработанности темы.

Задачам увеличения производительности линий связи с использованием рамановских усилителей посвящены многочисленные отечественные и зарубежные исследования. В частности, вопросам моделирования волоконно-оптических линий передачи с рамановскими усилителями посвящены работы Дианова Е.М., Буфетова И.А., Kidorf H., Rottwitt K., Namiki S.,

Етогі Y., Essiambre R.-J., Bromage J., Турицына С.К., Шапиро Е.Г., Дашкова М.В. и многих других. Вопросам передачи когерентных каналов в сверхдлинных линиях посвящены работы Xia T.J., Peterson D.L., Chang. D, Oliveira J.R.F., Bissessur H., Zhu B. и других исследователей.

В большинстве опубликованных работ численное моделирование проводится на основе нелинейных уравнений Шредингера, требует привлечения решения что больших вычислительных ресурсов и затрат времени. В процессе проектирования требуется проанализировать множество конфигураций линий связи. В каждой конфигурации требуется оптимизировать большое число параметров. Для решения таких задач необходимы приближенные аналитические выражения, удобные для анализа. Для описания многопролетных линий связи широко используется известная модель нелинейного интерференционного шума, описанная в работах Poggiolini P., Carena A., Curri V. и других авторов. Применимость данной модели нелинейного шума к когерентным сверхдлинным однопролетным линиям не была исследована. Следовательно, необходимо было создать модель описания нелинейного шума при попутном рамановском усилении в когерентных системах связи, разработать методику экспериментального измерения нелинейного интерференционного шума и нелинейных коэффициентов в когерентных линиях связи, подтвердить экспериментально адекватность модели и ее применимость для проектирования и оптимизации однопролетных линий связи.

Для практического использования широкополосных рамановских усилителей необходимо обеспечить автоматическую стабилизацию коэффициента усиления и формы спектра усиления. Однако, ранее были предложены алгоритмы стабилизации коэффициента усиления рамановских усилителей только со встречной накачкой. Требовалось разработать метод стабилизации усиления и наклона спектра усиления для попутного широкополосного рамановского усилителя.

Коэффициенты вынужденного комбинационного рассеяния измерялись в работах Буфетова И.А., Chang D., Jiang S., Kang Y. и других. Однако, не был проведен сравнительный анализ методик измерения коэффициентов ВКР и областей их применимости. Кроме того, несмотря на множество работ, в литературе практически отсутствуют подробные спектральные зависимости коэффициента ВКР, особенно для новых типов телекоммуникационных оптических волокон. Для построения модели рамановского усилителя и сверхдлинной однопролетной линии необходимо было создать базу экспериментально измеренных рамановских коэффициентов совместно с коэффициентами затухания.

<u>Объектом исследования</u> являются телекоммуникационные когерентные однопролетные волоконно-оптические линии связи с распределенными рамановскими усилителями и эрбиевыми усилителями с удаленной накачкой.

**Предмет исследования** – влияние усилителей на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния или распределенных рамановских усилителей на пропускную способность и дальность передачи, методы оптимизации их работы в волоконно-оптических линиях связи.

<u>Цели и задачи исследования.</u> Основной целью настоящей работы является решение важной научно-технической задачи – увеличения дальности и скорости передачи когерентных однопролетных линий связи с помощью применения распределенных рамановских усилителей.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Разработка расчетной модели широкополосных и узкополосных рамановских усилителей с монохроматической и полихроматической накачкой.

2. Измерение параметров различных телекоммуникационных волокон: спектров коэффициента затухания и коэффициента вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР).

3. Экспериментальное исследование влияния встречной рамановской накачки и удаленного эрбиевого усилителя со встречной накачкой на параметры одноканальных и многоканальных однопролетных линий связи.

4. Экспериментальное исследование влияния попутной рамановской накачки и удаленного эрбиевого усилителя с попутной накачкой на параметры одноканальных и многоканальных однопролетных линий связи.

5. Экспериментальная верификация разработанной модели распределенных рамановских усилителей.

6. Разработка оборудования для однопролетных сверхдлинных линий связи: гибридных и рамановских усилителей.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись:

- экспериментальные методики исследования волоконно-оптических линий связи: измерение параметров (коэффициента усиления и шум-фактора) усилителей, измерение требуемого отношения сигнал-шум приемника линии связи, измерение коэффициента шумов нелинейной интерференции [14],

- теоретические методы исследования: теории оптических волноводов, модели нелинейного шума [15], теории электрической связи, теории дифференциального и интегрального исчисления,

- численные методы решения дифференциальных и интегральных систем уравнений. При решении задач использованы современные программные средства, в том числе стандартные пакеты прикладных программ Matlab 2012-2017, интегрированная среда разработки для языка программирования Python PyCharm.

Обоснованность и достоверность результатов определяются: использованием известных положений фундаментальных наук; экспериментальной верификацией применяемых математических моделей и теоретических результатов; использованием полученных в данной работе результатов при создании оборудования для волоконно-оптических линий связи. Достоверность результатов подтверждается их апробацией на международных конференциях и публикациями в реферируемых научных изданиях.

#### <u>Научная новизна.</u>

1. Определена погрешность и область применимости приближенного метода экспресс-измерения коэффициента ВКР по спектрам собственного усиленного спонтанного комбинационного рассеяния.

2. Предложена методика экспериментального измерения нелинейного интерференционного шума в когерентных линиях связи с попутными рамановскими усилителями.

3. Экспериментально установлено, что увеличение эксплуатационного запаса линии за счет использования попутного рамановского усилителя может достигать 6 дБ и определяется числом каналов в линии, мощностью накачки и другими параметрами.

4. Экспериментально установлено, что увеличение производительности линии за счет использования удаленного эрбиевого усилителя с попутной накачкой падает с ростом числа каналов в линии вплоть до отрицательных значений. Применение удаленного эрбиевого усилителя с попутной накачкой целесообразно в линиях связи с числом каналов до 10.

5. Разработана оригинальная методика оптимизации сверхдлинной однопролетной линии с распределенными рамановскими усилителями и эрбиевыми усилителями с удаленной накачкой с помощью которой созданы однопролетные линии с рекордными параметрами.

6. Предложен оригинальный алгоритм стабилизации коэффициента усиления сигнала в попутном широкополосном рамановском усилителе и экспериментально продемонстрирована его работоспособность.

7. Создан комплекс программ, предназначенный для моделирования распределенных рамановских усилителей. На основе проведенных измерений создана база данных спектров затухания и коэффициентов вынужденного комбинационного рассеяния основных телекоммуникационных волокон. Проведена экспериментальная верификация данной модели, показавшая ее высокую точность.

**Практическая ценность работы** заключается в использовании полученных экспериментальных результатов для расчета характеристик телекоммуникационных волоконнооптических линий связи с когерентным приемником с применением распределенных рамановских усилителей и эрбиевых усилителей с удаленной накачкой. Разработанное программное обеспечение на основе модели и экспериментальных результатов позволяет оценить требуемый объем оборудования для работоспособности проектируемой ВОЛС. Кроме того, создано оборудование для сверхдлинных однопролетных линий связи, в частности гибридный усилитель, представляющий собой совокупность эрбиевого и распределенного рамановского усилителя, и рамановские усилители с попутной и встречной накачкой.

<u>Реализация результатов работы.</u> Результаты исследований используются при проектировании волоконно-оптических линий компанией «Т8» (г. Москва), а также при расчетах рекордных сверхдлинных линий [2,3,11]. Кроме того, полученные результаты использовались при разработке гибридных и рамановских усилителей.

<u>Апробация работы.</u> Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 57-й международной научной конференции МФТИ, Долгопрудный, 2014 г.; на первой, третьей и четвертой международных конференциях Инжиниринг & Телекоммуникации – En&T, Долгопрудный, 2014, 2016, 2017 гг; на пятой и шестой всероссийских конференциях по волоконной оптике, Пермь, 2015, 2017 гг; на пятой и конференции по фотонике стран БРИКС, Москва, 2016 г.; на XIV Международной научной конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», Самара, 2016 г.; на 12 и 13 международной выставке «Фотоника. Мир лазеров и оптики», Москва, 2017, 2018 гг; на VII Международной конференции «Фотоника и информационная оптика», Москва, 2018 г.

<u>Публикации.</u> По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 6 статей, из которых 4 статьи в изданиях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, 4 статьи, входящие в научные журналы из перечня ВАК, и в 3 тезисах российских конференций. Список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата.

<u>Структура и объем работы.</u> Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений. Объем диссертации составляет 140 страниц, включая 72 рисунка и список литературы из 78 наименований.

<u>Диссертация соответствует паспорту специальности</u> 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» по пунктам:

1. Исследование новых физических процессов и явлений, позволяющих повысить эффективность работы сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

2. Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

3. Разработка методов эффективного использования сетей, систем и устройств телекоммуникаций в различных отраслях народного хозяйства.

<u>Личный вклад диссертанта</u> заключается в проведении численных расчетов и экспериментальных измерений, в написании научных статей и их подготовке к публикации. Все использованные в диссертации экспериментальные результаты, описанные в главах 1-5, получены автором лично или при его определяющем участии. Численные расчеты распределенного рамановского усилителя проведены лично автором или при его определяющем участии. Численные расчеты когерентных линиях связи и эксперименты по рекордным дальностям проведены совместно с сотрудниками научно-исследовательского отдела ООО «Т8 НТЦ». Разработка гибридных и рамановских усилителей велась совместно с сотрудниками ООО «Т8 НТЦ»

#### Защищаемые положения.

1. Удаленный эрбиевый усилитель с попутной накачкой значительно увеличивает дальность однопролетной DWDM-линии связи с числом каналов от 1 до 10. Выигрыш в дальности уменьшается до нуля с увеличением числа каналов до 20 в ВОЛС на основе стандартного телекоммуникационного волокна.

2. Разработанная модель рамановского нелинейного интерференционного шума с высокой точностью описывает нелинейный интерференционный шум в когерентных волоконно-оптических линиях связи с попутными рамановскими усилителями.

3. Разработанная и экспериментально верифицированная обобщенная модель рамановского усилителя позволяет оптимизировать структуру однопролетной линии для увеличения дальности и пропускной способности DWDM систем связи. Увеличение дальности линии связи за счет использования попутного и встречного рамановских усилителей может достигать 100 км.

4. Разработанный алгоритм стабилизации коэффициента усиления широкополосного попутного рамановского усилителя позволяет с точностью 0,5 дБ установить заданное значение усиления.

5. Экспресс метод измерения коэффициента ВКР по спектрам собственного усиленного спонтанного комбинационного рассеяния позволяет оценивать значение коэффициента ВКР в пике спектральной зависимости с высокой точностью. Данный метод может быть использован в реальных современных телекоммуникационных линиях связи для быстрой оценки коэффициента ВКР.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы: обоснована актуальность работы, сформулированы цели и вытекающие из них задачи исследований. Кратко рассмотрено состояние вопроса на момент начала исследований, сформулированы защищаемые положения, научная новизна работы и ее практическая ценность, описаны основные результаты работы и вклад автора в решение поставленных задач.

В первой главе приведен обзор литературы по теме диссертации.

**Вторая глава** диссертации посвящена сравнительному анализу методов измерения коэффициента вынужденного комбинационного рассеяния, их экспериментальному сравнению и выработке рекомендаций по их использованию. Проведены измерения спектров коэффициентов ВКР в различных телекоммуникационных волокнах, включая новейшие телекоммуникационные волокна с ультранизким затуханием. Для известного экспресс-метода

измерения коэффициентов ВКР по спектрам усиленного спонтанного комбинационного рассеяния определена методическая погрешность и область применимости.

**Первый раздел** носит обзорно-аналитический характер, посвященный методам измерения коэффициента вынужденного комбинационного рассеяния в телекоммуникационных волокнах. Данный коэффициент  $g_R$  является важнейшим параметром для расчета характеристик рамановских усилителей и определяется только характеристиками световода, в котором реализуется ВКР-усиление.

Наиболее широко применяются для измерения спектральной зависимости коэффициента ВКР следующие два способа. Во-первых, спектральную зависимость коэффициента ВКР получают из спектральной зависимости коэффициента усиления слабого сигнала, распространяющегося навстречу накачке [16–18]. Источник может быть, как перестраиваемый по длине волны, так и широкополосный. Во втором способе спектр ВКР усиления получают из спектра излучения усиленного спонтанного комбинационного рассеяния (УСКР) [16,19]. Преимуществом первого способа является простота расчета коэффициента ВКР из коэффициента усиления (КУ) слабого сигнала, которые связаны известным соотношением [12]. Однако, для экспериментального исследования в данном случае необходим источник сигнала в исследуемом диапазоне длин волн.

Достоинством второго метода является возможность проведения измерений при доступе только к одному концу волокна, что существенно облегчает проведение измерений коэффициентов BKP-усиления телекоммуникационных волокон в действующих линиях связи. Такие измерения необходимы, например, при переходе на многоуровневые форматы модуляции для увеличения пропускной способности DWDM систем связи.

В настоящей работе показано, что методика измерения коэффициента ВКР-усиления по спектрам УСКР обеспечивает достаточную точность для использования коэффициентов ВКРусиления волокон при измерении кабельной инфраструктуры действующих волоконнооптических линий связи. Кроме того, экспериментально продемонстрировано высокая точность измерения коэффициента ВКР в широком спектральном диапазоне. В частности, с высокой точностью измерены значения коэффициента ВКР в области малых стоксовых сдвигов, которые необходимы для учёта межканального ВКР-перекоса в линиях связи с плотным спектральным уплотнением (DWDM).

На основе сравнения с точным решением скоростных уравнений ВКР определена область применимости упрощенной методики экспресс измерения коэффициентов ВКР по разности спектров УСКР [20]. Для большинства типов телекоммуникационных волокон, исследованных в настоящей работе, данная область применимости соответствует диапазону стоксовых сдвигов 7,5÷16 ТГц (250÷540 см<sup>-1</sup>), в котором коэффициент ВКР-может быть измерен с приемлемой точностью.

Схема эксперимента, по измерению спектра излучения УСКР или КУ опорного сигнала, распространяющегося навстречу излучению накачки, изображена на рисунке 3.



Рис. 3. Экспериментальная схема измерения коэффициента ВКР по спектрам УСКР. При замыкании ключа получается схема измерения с опорным источником.

Во втором разделе приведены результаты экспериментального измерения зависимостей коэффициента ВКР от частотной расстройки.



Рис. 4. Зависимости коэффициента ВКР от частотного сдвига, полученные в различных экспериментах.1-по спектрам УСКР ВКР-усилителя, используя точное решение; 2-по спектрам УСКР приближенным методом; 3-по КУ опорного источника; 4-прямое измерение ВКР-перекоса [27].

На рисунке 4 приведены результаты измерений коэффициента ВКР в эксперименте с волокном G652.D Corning SMF-28 длиной 27,9 км. В нашей работе проведено сравнение спектральных зависимостей коэффициента ВКР, измеренных несколькими способами. Вопервых, с помощью точного решения для числа шумовых фотонов [12] и спектра УСКР численным методом найден искомый коэффициент ВКР (кривая 1 на рисунке 4). Во-вторых, используя приближенное решение для числа шумовых фотонов [20], по разности спектров УСКР при двух различных мощностях накачки (кривая 2 на рисунке 4).

Как видно из графика, на краях зависимости коэффициента ВКР от частотного сдвига наблюдается расхождение кривых, полученных из точного решения и приближенного, что объясняется малым эффективным КУ в данной области, т.е. в области, где приближенное решение не применимо. В-третьих, дополнительно было проведено сравнение с результатами измерений коэффициента усиления слабого сигнала с помощью опорного источника (кривая 3 на рисунке 4).

В третьем разделе приведены результаты экспериментального измерения спектров коэффициентов ВКР в различных телекоммуникационных волокнах (рис. 5). В основном это волокна с германосиликатной сердцевиной и ступенчатым профилем показателя преломления: Corning SMF-28 и OFS AllWave ZWP стандарта ITU-T G.652.D с эффективной площадью моды (ЭПМ) 85 мкм<sup>2</sup>, волокно со смещённой ненулевой дисперсией (NZDSF, стандарт ITU-T G.655) OFS TrueWave с ЭПМ порядка 52 мкм<sup>2</sup>, а также волокна с увеличенной площадью моды (ITU-T G.654) – OFS SLA (130 мкм<sup>2</sup>) и Corning Vascade EX2000 (112 мкм<sup>2</sup>). Полученные зависимости (рис. 5) рамановских коэффициентов нормированы на эффективную площадь моды.

В четвертом разделе содержатся выводы по измерениям коэффициента ВКР.

<u>Третья глава</u> диссертации посвящена исследованию влияния на параметры однопролетной линии связи встречного рамановского усилителя и удаленного эрбиевого

усилителя со встречной накачкой. Как правило, оба этих усилителя работают в режиме малого входного сигнала.



Рис. 5. Зависимости коэффициента ВКР от частотного сдвига для различных типов волокон.

В первом разделе описывается модель встречного рамановского усилителя, основанная на скоростных уравнениях, описывающих распределение интенсивностей или мощностей вдоль световода [12].

В случае непрерывного встречного излучения накачки с неизменной поляризацией и с частотой  $\omega_P$ , распространяющего в волокне, и пробного излучения (стоксовая компонента) с частотой  $\omega_S$  взаимодействие между данными двумя излучениями с мощностями  $P_P$  и  $P_S$  соответственно подчиняется системе двух скоростных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dz} = g_{eff} P_P P_S - \alpha_S P_S \\ -\frac{dP_P}{dz} = -g_{eff} P_P P_S \frac{\omega_P}{\omega_S} - \alpha_P P_P \end{cases}$$
(1)

– где  $\alpha_s$  и  $\alpha_p$  – коэффициенты затухания в световоде на длине волны сигнала и накачки,  $g_{eff} = \frac{g_R}{A_{eff}}$  – эффективный коэффициент комбинационного усиления (коэффициент Рамана),  $g_R$  – коэффициент ВКР,  $A_{eff}$  – эффективная площадь основной моды волоконного световода, z – координата вдоль световода.

В отсутствие истощения накачки (уменьшение интенсивности волны накачки за счет оттока энергии в стоксову волну) второе уравнение системы (1) легко решается. Подставив решение в первое уравнение (1) и решив его, получим выражение для эффективного коэффициента усиления встречного рамановского усилителя:

$$G_{eff} = \frac{P_S^{OUT}(Pump = on)}{P_S^{OUT}(Pump = off)} = \exp\left(g_{eff}P_p^0L_{eff}\right)$$
(2)

- где  $P_p^0$  – начальная мощность накачки в точке z = L.

$$L_{eff} = \frac{1}{\alpha_p} \left[ 1 - \exp(-\alpha_p L) \right] - эффективная длина$$
(3)

Данную модель можно обобщить на случай взаимодействия произвольного числа накачек и произвольного числа сигналов. Для вычисления шумовых характеристик распределенного рамановского усилителя в обобщенную систему скоростных уравнений введены уравнения, описывающие усиленное спонтанное комбинационное рассеяние.



Рамановский усилитель

Рис. 6. Схема экспериментальной установки тестирования встречных рамановских усилителей. OSA – оптический спектроанализатор, MUX – мультиплексор нескольких сигнальных каналов, TP – транспондер.

В разделе 3.2. экспериментально верифицируется модель встречного рамановского усилителя. Для этого проведено исследование по измерению коэффициента усиления и шумфактора нескольких встречных рамановских усилителей компании Т8. Схема измерений изображена на рисунке 6. Данные параметры можно получить из анализа спектров сигнала до усилителя (опорный спектр) и после усилителя.

В результате исследования получены спектральные зависимости коэффициента усиления и шум-фактора в С-диапазоне DWDM для различных мощностей накачки рамановских усилителей и различных мощностей входного сигнала. На рисунках 7-8 изображены примеры спектральных зависимостей эффективного коэффициента усиления и эффективного шумфактора для встречного рамановского усилителя при входной мощности сигнала -30 дБм и различных мощностях накачки, полученных экспериментально и с помощью расчетной модели. Длины волн накачек 1439 нм и 1455 нм с суммарной мощностью, изображенной на рисунках 7-8. Анализ продемонстрировал хорошее согласие экспериментальных результатов с результатами с использованием обобщенной модели.



Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления встречного рамановского усилителя от длины волны при различных мощностях накачки. Пунктиром обозначены расчетные зависимости.

Максимальное отличие среднего по спектру коэффициента усиления, полученного в эксперименте от коэффициента усиления, полученного в модели, составило 1,2 дБ, для шумфактора соответственно, не более 1 дБ.



Рис. 8. Зависимость шум-фактора (NF) встречного рамановского усилителя от длины волны при различных мощностях накачки. Пунктиром обозначены расчетные зависимости.

Третий раздел посвящен исследованию характеристик удаленного эрбиевого усилителя. Удаленный эрбиевый волоконный усилитель ROPA используется в сверхдлинных волоконно-оптических линиях связи и предназначен для удаленного усиления малых оптических сигналов и увеличения отношения сигнал-шум на выходе линии. Благодаря накачке на длине волны 1480 нм, в линии связи возникает также дополнительное усиление сигнала за счет рамановского усиления в телекоммуникационном волокне. Дошедшая мощность накачки после рамановского усиления служит накачкой для удаленного эрбиевого усилителя. В случае встречной накачки мощность излучения сигнала мала по сравнению с мощностью излучения накачки, и истощением накачки за счет сигнала можно пренебречь. Потери излучения связаны только с затуханием в волокне. Кроме того, зачастую используют и накачку, доставленную по дополнительному волокну. В случае сонаправленной накачки для рамановского усиления уже нельзя пользоваться приближением малого сигнала, и накачка будет истощаться за счет сигнала. Об этом более подробно изложено в главе 4.

Компактность, максимальная простота, отсутствие электронной части делают ROPA привлекательным решением при конструировании однопролетных линий. В случае же сверхдлинных однопролётных ВОЛС (с длиной участка >300 км) использование усилителей с удалённой накачкой является уже необходимым условием.

В данном разделе исследуются спектральные зависимости коэффициента усиления и шум-фактора удаленного эрбиевого усилителя от входной мощности сигнала и мощности накачки, доставленной на удаленный усилитель.

В реальных линиях связи удаленный эрбиевый усилитель подвержен серьезному влиянию колебаний температуры окружающей среды. Поэтому в настоящей работе было проведено исследование влияния температуры на работу удаленных эрбиевых усилителей. На Рис. 9 изображена зависимость среднего по спектру (С-диапазон DWDM) коэффициента усиления и шум-фактора для входной мощности сигнала -28 дБм и доставленной накачке 8 дБм на длине волны 1480 нм. Данные зависимости явно показывают, что климатические условия оказывают существенное влияние на увеличение производительности линий связи за счет использования удаленных эрбиевых усилителей.



Рис. 9. Зависимость среднего по спектру (С – диапазон DWDM) коэффициента усиления и шум-фактора удаленного эрбиевого усилителя от температуры окружающей среды. Мощность сигнала = -28 дБм, доставленная мощность накачки = 8 дБм.

**Раздел 3.4.** посвящен расчету однопролетных линий, включающих в себя встречный рамановский усилитель и удаленный эрбиевый усилитель со встречной накачкой.

Наряду с расчетом усилителей, используется расчет влияния нелинейных эффектов на качество передачи. Для учета их влияния разработана модель аддитивного гауссова шума (GNмодель) [15]. Однако применение GN-модели для расчета реальных ВОЛС затруднено, так как теоретические выражения сложны и зависят от большого количества трудно контролируемых параметров сигнала. Кроме того, она, строго говоря, применима только для каналов с минимальным частотным интервалом и постоянной спектральной плотности мощности (Nyquist WDM). На практике применяются упрощенные феноменологические модели, базирующиеся на экспериментальных данных. Для случая когда сигнал затухает согласно закону Бугера-Ламберта (экспоненциальное затухание) разработаны простые И эффективные феноменологические модели основанные на методиках экспериментального измерения нелинейного коэффициента [21]. В случае когерентной системы передачи нелинейные искажения можно характеризовать мощностью нелинейного шума, которая суммируется с мощностями шумов спонтанной люминесценции усилителей.

В случае использования встречного рамановского усилителя и удаленного эрбиевого усилителя однопролетную линию можно условно разбить на два участка: до удаленного эрбиевого усилителя, где учитывается влияние нелинейных искажений на качество сигнала и оставшаяся часть, включающая в себя удаленный эрбиевый усилитель со встречной накачкой, встречный рамановский усилитель, традиционный эрбиевый усилитель на конце линии. На втором участке влиянием нелинейных искажений можно пренебречь исходя из малой мощности излучения сигнала. Назовем первый участок однопролетной линии бустерной частью, второй участок предусилительной частью (Рис. 10).



Рис. 10. Схема предусительной части с встречным рамановским усилителем и удаленным эрбиевым усилителем со встречной накачкой.

Представленную на Рис. 10 линию можно оптимизировать, отдельно рассмотрев бустерную и предусилительную часть. Оптимизация бустерного участка представляет собой поиск оптимальной входной мощности в пролет с учетом влияния нелинейных искажений [21]. Оптимизация предусилительной части состоит в поиске оптимального положения удаленного эрбиевого усилителя, обеспечивающего минимум шум-фактора всей предусилительной части, и как следствие максимального отношения сигнал-шум на входе в приемник. Шум-фактор предусилительной части рассчитывается по формуле Фрииса:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \frac{F_5 - 1}{G_1 G_2 G_3 G_4}$$
(4)

Где F – шум-фактор усилителя, G – коэффициент усиления усилителя Индексы:

1 – участок до удаленного эрбиевого усилителя; 2 - удаленный эрбиевый усилитель со встречной накачкой; 3 – второй участок (предусилительная часть) однопролетной линии; 4 – встречный рамановский усилитель; 5 – традиционный эрбиевый усилитель на конце линии.

На рисунке 11 представлен пример зависимости шум-фактора предусилительной части от длины второго участка ( $L_{ropa}$ ). Удаленный эрбиевый усилитель и встречный рамановский усилитель находятся в режиме слабого сигнала, мощность накачки составляет 1 Вт на длине волны 1480 нм. Длина волны сигнала составляет 1560,61 нм (21 канал DWDM). Существует



Рис. 11. Зависимость среднего по спектру шум-фактора предусилительной части от расстояния до удаленного эрбиевого усилителя от места ввода накачки. оптимальное положение удаленного эрбиевого усилителя со встречной накачкой, обеспечивающее минимум шум-фактора предусилительной части

В пятом разделе представлены выводы по 3 главе.

<u>Четвертая глава</u> диссертации посвящена исследованию характеристик попутных рамановских усилителей в однопролетных линиях связи, а также проектированию линий с попутными рамановскими усилителями.

В первом разделе описана модель распределенного ВКР-усиления в попутном направлении многоканального DWDM – сигнала при использовании многоволновой накачки. В модели учитывается не только взаимодействие излучения накачки и сигнала, но и перераспределение мощностей накачки в следствие ВКР и межканальное взаимодействие. Модель основана на известных скоростных уравнениях ВКР [12]. Шум усиленного спонтанного комбинационного рассеяния (УСКР) описывается соответствующими дифференциальными уравнениями, входящими в систему скоростных уравнений. Однако, в реальных однопролетных линиях связи их влияние на качество передачи сигнала крайне мало по причине высокого отношения сигнал – шум на выходе передающего устройства. Отношение сигнал – шум в таких устройствах может достигать более 50 дБ. Основными элементами, вносящими шум усиленной спонтанной люминесценции, в однопролетных линиях связи являются усилители на приемной стороне (удаленный эрбиевый усилитель со встречной накачкой, встречный рамановский усилитель на конце линии).

Основным источником искажения сигнала при попутном рамановском усилении являются нелинейные искажения, возникающие на участке ВКР-усилителя. Данная работа включает в себя частную феноменологическую модель учета нелинейных искажений при попутном рамановском усилении, в основе которой используется модель нелинейных искажений в отсутствии рамановских усилителей (линии с экспоненциальным затуханием) [21]. Подробное описание модели будет изложено в разделе 4.3.

Для возможности применения модели для различных типов телекоммуникационных волокон были проведены измерения коэффициентов ВКР и коэффициентов затухания в различных волокнах.

При попутном рамановском усилении для решения системы дифференциальных уравнений из-за высокой мощности сигнала необходимо учитывать истощение накачки. В этом случае для решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений применялся численный метод Рунге-Кутта 4 порядка и реализован с помощью среды программирования Matlab.

Второй раздел посвящен сравнению профилей мощностей сигналов и накачек, полученных с помощью расчетной модели и экспериментально. На рисунке 12 изображена схема экспериментальной установки для измерения входных и выходных мощностей сигнала и накачки при различных блоках накачки (различные длины волн и мощности), различных конфигурациях сигналов (один и несколько каналов), различных длинах и типах телекоммуникационных волокон.

Экспериментальные результаты сравнивались с результатами численного моделирования. Пример результатов такого сравнения изображен на рисунке 13 для 100 км линии на основе волокна Corning SMF-28. В результате исследования получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей канальных мощностей и мощностей накачки от координаты вдоль волокна. Максимально отличие теоретических и экспериментальных результатов для выходной мощности сигнала не превышает 0,91 dB; для выходной мощности накачки не превышает 1,8 dB.



Рис. 12. Схема экспериментальной установки для исследования мощностей накачки и сигнала при ВКРусилении с попутной накачкой. OSA – оптический спектроанализатор, EDFA – эрбиевый усилитель, Raman – рамановский блок накачки, PM – измеритель мощности, MWDM – спектральный мультиплексор накачки и сигнала, MUX – мультиплексор нескольких сигнальных каналов, TP – транспондер.



Рис. 13. Сравнение экспериментальных и расчетных значений канальных мощностей для различных мощностей попутной рамановской накачки на длине волны 1455 нм при полной входной сигнальной мощности 8 дБм.

В третьем разделе представлено описание феноменологической модели нелинейных искажений сигнала в присутствии попутной рамановской накачки [22]. Нелинейные искажения интерпретируются как нелинейный гауссовский шум подобно тому, как это сделано в работе [21] В данной работе получены коэффициенты модели нелинейных искажений, позволяющие рассчитать нелинейный шум при попутном рамановском усилении сигнала.

Нелинейный шум  $P_{NLI}^{Out}$  на выходе однопролетной линии с попутным рамановским усилением можно представить как произведение четырех функций (5), зависящих от значения максимальной канальной мощности сигнала  $P_{Peak}$ , расстояния от места ввода накачки до максимума канальной мощности  $Z_{Peak}$ , входной дисперсии в пролет  $Disp^{In}$ . При малых мощностях накачки или ее отсутствия вводится дополнительный параметр  $F_s(S)$ , равный первой производной функции описывающей продольный профиль мощности вблизи положения максимума канальной мощности (S). (Рис. 14):

$$P_{NLI}^{Out}\left(Z_{Peak}, P_{Peak}, Disp^{In}\right) = f\left(Z_{Peak}, Disp^{In}\right) \times F_{Z}\left(Z_{Peak}\right) \times F_{P_{Peak}}\left(P_{Peak}\right) \times F_{S}\left(S\right)$$
(5)

- функция  $f(Z_{Peak}, Disp^{In})$  характеризует зависимость мощности нелинейного шума от входной дисперсии и положения максимума канальной мощности, которая при большой входной дисперсии стремится к 1;



Рис. 14. Пример продольного распределения канальной мощности сигнала вдоль ВОЛС с попутным рамановским усилением.

В результате экспериментальных исследований были подобраны аппроксимирующие функции из соотношения (5) для расчета мощности нелинейного шума в произвольном случае.

В случае многоканальной линии (из *N* каналов) нелинейный шум в канале  $P_{NLI}^{Out}$  вычисляется как сумма нелинейного воздействия канала на себя и суммы нелинейного воздействия соседних каналов:

$$P_{NLI}^{Out} = P_{NLI}^{self} + \sum_{N-1} P_{NLI}^{Neibor}$$
(6)

Помимо зависимости от перечисленных ранее параметров  $Z_{Peak}$ ,  $P_{Peak}$ ,  $Disp^{In}$ , S мощность нелинейного шума от соседнего канала будет определяться пиковой мощностью соседнего канала  $P_{Peak}^{Neibor}$  и разностью частот между соседним каналом и исследуемым  $\Delta v$ .

Вклад нелинейного воздействия аддитивно складывается с линейными шумами усиленного спонтанного рассеяния. На выходе линии отношение сигнал-шум *OSNR*<sub>BER</sub>будет вычисляться по формуле обратных OSNR для линейного и нелинейного шумов [23]:

$$\frac{1}{OSNR_{BER}} = \frac{1}{OSNR_{L}} + \frac{1}{OSNR_{NL}}$$
(7)

В разделе 4.4 представлено описание алгоритма оптимизации параметров попутного рамановского усилителя. Для фиксированного блока накачки (фиксированной длины волны и мощности) подбираются оптимальные параметры сигнала (канальные мощности и перекос спектра на входе в волокно), обеспечивающие максимальное значение OSNR на выходе линии для худшего канала. При расчете *OSNR*<sub>BER</sub> по формуле (7) необходимо знать как нелинейный шум, так и линейный шум, генерирующиеся в ВОЛС. Нелинейный шум рассчитывается с помощью феноменологической модели (раздел 4.3). Линейные шумы генерируются в основном в предусилительной части. Поэтому оптимизировать линию связи с точки зрения максимального *OSNR*<sub>BER</sub> или максимального запаса по OSNR необходимо целиком:

(8)

где  $P_s$  – входная мощность сигнала,  $\Delta S$  – перекос спектра на входе,  $\lambda_s$  – длина волны сигнала.

В разделе 4.5 описана модель линии с попутным рамановским усилителем и удаленным эрбиевым усилителем с попутной накачкой. Дополнительным ключевым параметром этой модели будет расстояние до удаленного эрбиевого усилителя с попутной накачкой.

Для увеличения OSNR на выходе линии необходимо уменьшать расстояние между попутной (forward-) ROPA и передатчиком, поскольку потери на длине волны накачки больше, чем на длине волны излучения. Однако, при уменьшении расстояния до попутной ROPA растет входная мощность сигнала во второй участок, и увеличиваются нелинейные искажения, возникающие в начале второго участка. Таким образом, оптимальное положение forward-ROPA определяется путем нахождения баланса между величиной нелинейных искажений после ROPA и оптическим отношением сигнал-шум на выходе линии. Это оптимальное положение зависит от числа каналов в линии. При этом увеличение эксплуатационного запаса линии за счет использования удаленного эрбиевого усилителя с попутной накачкой уменьшается с увеличением числа каналов. При увеличении числа каналов до 10 и более выигрыш в запасе становится малым или даже отрицательным и использование этого усилителя является невыгодным.

В **шестом разделе** содержатся основные результаты и выводы по 4 главе. На основе проведенных расчетных и экспериментальных исследований были собраны сверхдлинные однопролетные линии:

— 2x100 Гбит/с на расстояние 501 км без применения дополнительных волокон с использованием волокна G.652B (Corning ULL) с полным затуханием 80,1 дБ [11].

— 1х100 Гбит/с на расстояние 410 км на основе стандартного волокна G652.D (Corning SMF-28) с полным затуханием 77 дБ. Продемонстрировано на 29 международной выставке информационных и коммуникационных технологий «Связь-2017» (25-28 апреля 2017 г.)

Передача 1x100 Гбит/с + 4x10G на расстояние 327 км на основе стандартного волокна G652.D (Corning SMF-28) в одноволоконной линии с запасом по OSNR, равным 6,4 дБ и полными потерями 60,9 дБ.

В <u>пятой главе</u> приведено описание принципов работы и характеристик оборудования для однопролетных линий связи, разработанного при непосредственном участии автора в компании Т8. При разработке данного оборудования использовались результаты, приведенные в предыдущих главах. Широкополосный рамановский усилитель и гибридный усилитель выпускаются серийно для применения в реальных линиях связи.

В первом разделе приведено описание разработанного широкополосного рамановского усилителя с накачкой на 4 длинах волн 1424 нм, 1435 нм, 1455 нм, 1465 нм с суммарной мощностью накачки до 1,3 Вт и алгоритмы работы его системы управления. Он предназначен для работы в С-диапазоне и обеспечивает неравномерность спектра усиления не более 1,3 дБ. Разработан оригинальный алгоритм стабилизации коэффициента усиления для попутного рамановского усилителя, позволяющий стабилизировать не только постоянное значение среднего по спектру коэффициента усиления, но и значение перекоса (наклон) спектра. Управление усилителем производится путем подстройки мощностей накачки на различных длинах волн. Цепь обратной связи стабилизирует уровень мощности усиленного спонтанного

комбинационного рассеяния в L и S – диапазоне третьего окна прозрачности оптического волокна. Работа алгоритма основывается на однозначной связи коэффициента усиления рамановского усилителя и перекоса спектра усиления с мощностью усиленного спонтанного комбинационного рассеяния в L и S – диапазоне

На этапе калибровки усилителя измеряются зависимости, связывающие коэффициент усиления и наклон спектра усиления с мощностями УСКР в L и S – диапазоне при различных мощностях сигнала и перекосах спектра на входе в линию:

$$[G_{average}, \Delta G] \leftrightarrow [P_{ASE}^{S}, P_{ASE}^{L}]$$
(8)

Подбирая мощности накачек таким образом, чтобы обеспечить необходимые мощности УСКР в L и S – диапазоне для заданных коэффициента усиления и наклона спектра усиления, осуществляется стабилизация заданных параметров. При этом мощности накачек на длинах волн 1424 нм и 1435 нм связаны функциональным соотношением. Аналогично для мощностей накачек на длинах волн 1455 нм и 1465 нм

$$[P_{ASE}^{S}, P_{ASE}^{L}] \leftrightarrow [P_{12}^{INT}, P_{34}^{INT}] = [f(Pump_1, Pump_2), f(Pump_3, Pump_4)]$$
(9)

Для проверки алгоритма было проведено экспериментальное исследование, схема которого изображена на рисунке 15.



Рис. 15. Схема экспериментальной установки для проверки алгоритма стабилизации коэффициента усиления попутного рамановского усилителя. OSA – оптический спектроанализатор, EDFA – эрбиевый усилитель, Forward Raman – рамановский блок накачки, Power Meter – измеритель мощности, WDM – спектральный мультиплексор, MUX – мультиплексор нескольких сигнальных каналов, VOA – переменный аттенюатор, TP – транспондер.

С помощью усилителя и аттенюатора варьировалась входная мощностью в линию. Контроль входной мощности осуществляется с помощью однопроцентного ответвителя и измерителя мощности. В качестве накачки используется многоканальный попутный рамановский усилитель на 4 длинах волн: 1425, 1435, 1455, 1465 нм. В эксперименте используется линия длиной 150 км на основе стандартного волокна G652.D SMF-28. С помощью спектроанализатора в конце линии измеряется спектральная зависимость КУ G<sub>on/off</sub>, как разность спектров при включенной и выключенной рамановской накачке. С помощью 10% ответвителя контролируется обратно рассеянная мощность усиленного спонтанного комбинационного рассеяния ВКР-усилителя. С помощью демультиплексора на S и L диапазоны и измерителей мощности осуществляется измерение мощностей ASE в соответствующих диапазонах.

Для широкополосного рамановского усилителя возможны модификации с применением накачки, как в попутном направлении, так и во встречном.

Коэффициент усиления данного усилителя достигает 19 дБ, типичное значение шумфактора для реализации усилителя во встречном направлении -2÷-1 дБ. В настоящее время усилитель выпускается серийно и применяется в реальных ВОЛС.

Во втором разделе представлено описание разработанного гибридного усилителя С-диапазона с накачкой на двух длинах волн 1427 нм и 1452 нм с суммарной мощностью накачки 500 мВт. Гибридный усилитель представляет собой комбинацию из распределённого рамановского усилителя с встречной накачкой и эрбиевого усилителя.

Основное преимущество гибридного усилителя перед традиционным эрбиевым усилителем заключается в снижении шум-фактора на 4-5 дБ. Типичное значение эффективного шум-фактора гибридного усилителя 1,5 – 4 дБ. Использование гибридного усилителя позволяет существенно увеличить емкость действующих линий связи за счет перехода к новым форматам передачи данных с увеличенной спектральной эффективностью, например, от DP-QPSK к DP-16QAM [24]. Более высокие требования к качеству сигнала не позволяют использовать высокопроизводительные форматы модуляции в линиях связи с традиционными эрбиевыми усилителями. Кроме того, в существующих линиях связи с течением времени вследствие естественных причин или из-за ремонтных работ могут увеличиться потери и нарушится работоспособность. Замена обычных эрбиевых усилителей на гибридные в таких линиях увеличит значение оптического отношения сигнал-шум (OSNR) и позволит восстановить работоспособность ВОЛС и, тем самым, увеличить срок службы кабельной инфраструктуры. При проектировании новой линии возможно увеличение длины пролета и, соответственно, сокращение количества усилительных пунктов, что приведет к снижению стоимости ВОЛС [25,26].

В данном разделе представлено описание режимов работы гибридного усилителя и его оптические характеристики, приведена методика выбора оптимальных длин волн накачек рамановского усилителя, позволяющих обеспечить неравномерность не более 1,5 дБ с коэффициентом усиления не менее 8 дБ.

Основная область применения гибридного усилителя - линии, где при использовании только эрбиевых усилителей линия не работоспособна, а использование мощных широкополосных рамановских усилителей избыточно и, следовательно, экономически не оправдано.

В настоящее время гибридный усилитель, также, как и широкополосный рамановский усилитель выпускается серийно и применяется в реальных ВОЛС. Наличие двух типов усилителей позволяет создавать более экономичные решения. Выбор того или иного усилителя определяется требуемым эксплуатационным запасом волоконно-оптической линии связи.

В третьем разделе содержатся выводы по 5 главе.

В заключении сформулированы основные результаты работы и выражены благодарности коллективу.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

1) Проведено точное измерение коэффициентов ВКР в широком спектральном диапазоне, в том числе в области малых частотных сдвигов, для основных типов телекоммуникационных волокон. Полученные результаты используются при расчете характеристик ВКР и гибридных усилителей и линий связи на их основе.

2) Показано, что точность экспресс-метода измерения коэффициента ВКР по спектрам УСКР в рабочей области усилителя оказывается достаточной для практического применения.

3) Создан комплекс программ, предназначенный для моделирования распределенных рамановских усилителей. На основе проведенных измерений создана база

данных спектров затухания и коэффициентов вынужденного комбинационного рассеяния основных телекоммуникационных волокон. Проведена экспериментальная верификация данной модели, показавшая высокую точность.

4) Разработана модель нелинейного интерференционного шума в когерентных линиях связи с попутными рамановскими усилителями. Установлено, что максимальный выигрыш в отношении сигнал-шум на выходе линии за счет использования попутного рамановского усилителя в когерентных системах связи достигает 6 дБ в одноканальных ВОЛС и 3-4 дБ в многоканальных.

5) Разработана обобщенная модель расчета сверхдлинной однопролетной линии с распределенными рамановскими усилителями и эрбиевыми усилителями с удаленной накачкой, позволяющая оптимизировать длины участков в однопролетной линии и длину всей линии. На основе данной модели были рассчитаны и экспериментально продемонстрированы однопролетные линии рекордной длины [11].

6) Проведено экспериментальное исследование возможностей увеличения производительности однопролетных ВОЛС с удаленными эрбиевыми усилителями с попутной и встречной накачкой. Установлено, что увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению эффективности использования удаленных эрбиевых усилителей: коэффициент усиления уменьшается, а шум-фактор увеличивается.

7) Удаленный эрбиевый усилитель со встречной накачкой работает в режиме малого входного сигнала, его коэффициент усиления и шум-фактор практически не зависят от числа каналов ВОЛС. Эффективность удаленного эрбиевого усилителя с попутной накачкой уменьшается с увеличением числа каналов. Применение таких усилителей нецелесообразно при числе каналов более 20.

8) Разработан оригинальный алгоритм стабилизации коэффициента усиления для попутного рамановского усилителя, позволяющий стабилизировать не только постоянное значение среднего по спектру коэффициента усиления, но и значение перекоса (наклон) спектра. Разработанный алгоритм используется в серийно-выпускаемых широкополосных рамановских усилителях компании T8.

9) Разработаны два типа оптических усилителей: гибридный усилитель с рамановской накачкой на двух длинах волн и суммарной мощностью 0,5 Вт и широкополосный рамановский усилитель с накачкой на четырех длинах волн и суммарной мощностью до 1,3 Вт. Усилители выпускаются серийно и применяются в реальных линиях связи.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Gainov, V. 500 km unrepeatered 200 Gbit s<sup>-1</sup> transmission over a G.652-compliant ultra-low loss fiber only / V V Gainov, N V Gurkin, S N Lukinih, I I Shikhaliev, P I Skvortsov, S Makovejs, S G Akopov, S Y Ten, O E Nanii and V N Treshchikov // Laser Physics Letters, – 2015. – May. – Vol. 12, no. 6. – P. 066201(1)-066201(6)

2. Шихалиев, И. Широкополосный гибридный оптический усилитель: как улучшить существующие ВОЛС / И. Шихалиев, С. Лукиных, О. Наний, В. Трещиков, Д. Старых, В. Конышев, Р. Убайдулаев // Первая Миля. — 2018. — № 2. — с. 68-72.

3. Шихалиев, И. Простой метод измерения эффективного коэффициента ВКР в одномодовых волоконных световодах и область его применимости / И.И. Шихалиев, В.В. Гайнов, А.Н. Дорожкин, О.Е. Наний, В.А. Конышев, В.Н. Трещиков // Квантовая электроника. – 2017. – Т.47, №10, – С. 906-910.

4. Старых, Д. Экспериментальное исследование нелинейного режима работы DP-QPSK 100G линии связи, содержащей распределенный рамановский усилитель с попутной накачкой /

Д. Д. Старых, И. И. Шихалиев, В. А. Конышев, О. Е. Наний, В. Н. Трещиков, Р. Р. Убайдуллаев, Д. Р. Харасов // Квантовая электроника. – 2018. – Т.48, №8, – С. 767-772.

5. Конышев, В. Улучшение оптического качества сигнала при нелинейном взаимодействии спектральных каналов / В. А. Конышев, А. В. Леонов, О. Е. Наний, А. Г. Новиков, И. И. Шихалиев, В. Н. Трещиков, Р. Р. Убайдуллаев // Квантовая электроника. – 2016. – Т.46, №10, – С. 924-929.

6. Гайнов, В. Однопролетные оптические линии связи большой протяженности / В.В. Гайнов, В.А. Конышев, А.В. Леонов, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний, П.И. Скворцов, В.Н. Трещиков, И.И. Шихалиев, Р.Р. Убайдуллаев // Прикладная фотоника. – 2015. – Т.2, №1, – С. 5-22.

7. Шихалиев, И. Простой метод измерения эффективного коэффициента ВКР в одномодовых волоконных световодах и область его применимости / И.И. Шихалиев, В.В. Гайнов, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков // материалы конференции "Оптические технологии в телекоммуникациях" ООО "16ПРИНТ". – Самара. – 2015. – с. 52-53

8. Шихалиев, И. Оптимизация однопролетных линий связи / И.И. Шихалиев, В.В. Гайнов, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, В.А. Конышев, С.Н. Лукиных, П.И. Скворцов // Фотонэкспресс, спецвыпуск по материалам Всероссийской конференции по волоконной оптике г. Пермь 7-9 октября 2015 года. – Москва. – 2015. – Т.6, №126, – С. 47-48.

9. Шихалиев, И. Распределенные рамановские усилители в волоконно-оптических линиях связи / И.И. Шихалиев, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, В.А. Конышев // Фотон-экспресс, спецвыпуск по материалам Всероссийской конференции по волоконной оптике г. Пермь 3-6 октября 2017 года, – Москва. – 2017. – Т.6, №142, – С. 84.

#### Цитируемая литература

- 1. Конышев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Рекордная производительность систем 100G как маркер перехода к эволюционному развитию ВОСП // Первая миля. 2015. № 6. С. 40–43.
- Gainov V. V., Gurkin N. V., Lukinih S.N., Akopov S.G., Makovejs S., Ten S.Y., Nanii O.E., Treshchikov V.N. Record 500 km unrepeatered 100 Gb s-1transmission // Laser Phys. Lett. 2013. Vol. 10, № 7. P. 75107.
- 3. Gainov V., Gurkin N., Lukinih S., Makovejs S., Akopov S., Ten S., Nanii O., Treshchikov V., Sleptsov M. Record 500 km unrepeatered 1 Tbit/s (10x100G) transmission over an ultra-low loss fiber // Opt. Express. 2014. Vol. 22, № 19. P. 22308.
- 4. Гайнов В.В., Гуркин Н.В., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Сверхдлинные однопролетные линии связи с удаленной накачкой оптических усилителей // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, № 4. С. 83–89.
- 5. Xia T.J., Peterson D.L., Wellbrock G.A., Chang D. II, Perrier P., Fevrier H., Ten S., Tower C., Mills G. 557-km unrepeatered 100G transmission with commercial raman DWDM system, enhanced ROPA, and cabled large Aeff ultra-low loss fiber in OSP environment // Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series. 2014.
- 6. Chang D. II, De Pedro H., Perrier P., Fevrier H., Ten S., Towery C., Davis I., Makovejs S. 150 x 120 Gb/s unrepeatered transmission over 333.6 km and 389.6 km (with ROPA) G.652 fiber // European Conference on Optical Communication, ECOC. 2014.
- De Oliveira J.R.F., De Moura U.C., De Paiva G.E.R., De Freitas A.P., De Carvalho L.H.H., Parahyba V.E., De Oliveira J.C.R.F., Romero M.A. Hybrid EDFA/raman amplification topology for repeaterless 4.48 Tb/s (40 112 Gb/s DP-DQPSK) transmission over 302 Km of G.652 standard single mode fiber // J. Light. Technol. 2013. Vol. 31, № 16. P. 2799–2808.
- 8. Chang D. Il, Perrier P., Fevrier H., Xia T.J., Peterson D.L., Wellbrock G.A., Ten S., Towery C.,

Mills G. Unrepeatered 100G transmission over 520.6 km of G.652 fiber and 556.7 km of G.654 fiber with commercial raman DWDM system and enhanced ROPA // J. Light. Technol. 2015. Vol. 33,  $N_{2}$  3. P. 631–638.

- 9. Chang D.-I. et al. 100G unrepeatered transmission over 626.8 km with a span loss in excess of 100 dB // Asia Communications and Photonics Conference 2015. 2015. P. AM4A.2.
- 10. Huawei Marine Achieves a Breakthrough in Unrepeatered Systems With a Transmission Distance of up to 648.5 km [Electronic resource]. 2016. URL: http://www.huawei.com/en/press-events/news/2016/9/Breakthrough-in-Unrepeatered-Systems-648KM.
- 11. Gainov V. V. et al. 500 km unrepeatered 200 Gbit•s-1transmission over a G.652-compliant ultra-low loss fiber only // Laser Phys. Lett. 2015. Vol. 12, № 6. P. 066201.
- 12. Headley C., Agrawal G.P. Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems // Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems. 2005.
- 13. Гайнов В.В., Конышев В.А., Леонов А.В., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Скворцов П.И., Трещиков В.Н., Шихалиев И.И., Убайдуллаев Р.Р. Однопролетные оптические линии связи большой протяженности // Прикладная фотоника. 2015. № 1. С. 5–22.
- Konyshev V.A., Leonov A. V., Nanii O.E., Novikov A.G., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. Correlation of nonlinear noises from different spans in 100 Gb/s multi-span fiber optic lines // Opt. Commun. Elsevier, 2016. Vol. 381. P. 352–359.
- 15. Poggiolini P., Bosco G., Carena A., Curri V., Jiang Y., Forghieri F. A Detailed Analytical Derivation of the GN Model of Non-Linear Interference in Coherent Optical Transmission Systems // ArXiv e-prints. 2012. Vol. 1, № 1209.0394. P. 1–24.
- 16. Bufetov I., Bubnov M. Raman gain properties of optical fibers with a high Ge-doped silica core and standard optical fibers // Laser Physics- Phys. Lasers. 2001. Vol. 11, № 1. P. 130–133.
- 17. Chang D., Pelouch W., Burtsev S., Perrier P., Fevrier H. Unrepeatered High-speed Transmission Systems // Opt. Fiber Commun. Conf. Exhib. 2015. Vol. W4E.3.
- Jiang S., Bristiel B., Jaouën Y., Gallion P., Pincemin E., Capouilliet S. Full characterization of modern transmission fibers for Raman amplified-based communication systems. // Opt. Express. 2007. Vol. 15, № 8. P. 4883–4892.
- Domínguez-Vásquez P., Olivares S., Santos J.L. Influencia familiar sobre la conducta alimentaria y su relación con la obesidad infantil // Arch. Latinoam. Nutr. 2008. Vol. 58, № 3. P. 249–255.
- 20. Shikhaliev I.I., Gainov V. V, Dorozhkin A.N., Nanii O.E., Konyshev V.A., Treshchikov V.N. A simple method of measuring the effective SRS coefficient in single-mode optical fibres and its applicability limits // Quantum Electron. 2017. Vol. 47, № 10. P. 906–910.
- Konyshev V.A., Leonov A. V, Nanii O.E., Novikov A.G., Treshikov V.N., Ubaydullaev R.R. Design of high-bit-rate coherent communication links // Quantum Electron. 2016. Vol. 46, № 12. P. 1121–1128.
- Starykh D.D., Shikhaliev I.I., Konyshev V.A., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R., Kharasov D.R. Experimental investigation of nonlinear operation mode of a DP-QPSK 100G link with co-propagating-pump Raman amplification // Quantum Electron. 2018. Vol. 48, № 8. P. 767–772.
- 23. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Плаксин С.О., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Нелинейный интерференционный шум в системах связи 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK // Квантовая электроника. 2013. Т. 43, № 6. С. 550–553.
- 24. Леонов А.В., Слепцов М.А., Трещиков В.Н. Скоростные 400G-системы // Т-Сотт Телекоммуникации и транспорт. 2016. № Спецвыпуск 1. С. 30–31.
- 25. Ahmad A., Bianco A., Chouman H., Marchetto G., Tahir S., Curri V. Impact of fiber type and Raman pumping in NyWDM flexible-grid elastic optical networks // International Conference on Transparent Optical Networks. 2016. Vol. 2016–Augus.

- 26. Curri V., Carena A. Merit of Raman Pumping in Uniform and Uncompensated Links Supporting NyWDM Transmission // J. Light. Technol. 2016. Vol. 34, № 2. P. 554–565.
- 27. Капин Ю.А., Наний О.Е., Новиков А.Г., Павлов В.Н., Плоцкий А.Ю., Трещиков В.Н. Прямое экспериментальное измерение ВКР-перекоса спектра в многоканальных многопролетных системах связи // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 9. С. 818–821.