

На правах рукописи



КУТЛЮЯРОВ Руслан Владимирович

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ
В ВОЛН БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ
ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ
И НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ КЕРРОВСКОГО ТИПА**

**Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2013

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор
Султанов Альберт Ханович

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, профессор
Бурдин Владимир Александрович
ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и
информатики», проректор по науке
и инновациям

д-р техн. наук, профессор
Морозов Олег Геннадьевич
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный ис-
следовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ»,
заведующий кафедрой телевидения
и мультимедийных систем

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт систем обра-
ботки изображений Российской академии
наук», г. Самара**

Защита диссертации состоится «6» декабря 2013 г. в 10.00 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.07
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
в актовом зале 1-го корпуса по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «1» ноября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Волоконно-оптические сети связи являются одним из самых динамично развивающихся направлений телекоммуникаций. Растущие потребности в пропускной способности магистральных линий связи приводят к необходимости повышения битовой скорости в канале и применения технологии уплотнения каналов по длине волны (технология *WDM*). При этом ключевыми факторами, ограничивающими качество приема оптических сигналов в волоконно-оптических системах связи, являются хроматическая дисперсия, нелинейности в волокне, шум волоконных усилителей и поляризационные эффекты, в частности, поляризационно-модовая дисперсия (ПМД). Традиционно нелинейные эффекты исследуют отдельно от поляризационных, а ПМД исследуют и моделируют в предположении линейности передачи. Однако в магистральных линиях связи большой протяженности (сотни и тысячи километров) нелинейности и ПМД взаимодействуют таким образом, что их отдельное рассмотрение становится некорректным.

Значимость поляризационных эффектов возрастает с уменьшением длительности импульсов в канале связи и с увеличением длины линии связи. Таким образом, при проектировании и модернизации магистральных линий связи с канальными скоростями 40 Гбит/с и более обязательно должно приниматься во внимание совместное воздействие нелинейных и поляризационных эффектов.

Степень разработанности темы. Активное исследование совместного действия нелинейных эффектов и двулучепреломления связано с развитием математического аппарата уравнения Шредингера в векторной форме и его модификации – расширенного уравнения С.В. Манакова, называемого уравнением Манакова-ПМД. Уравнение Манакова-ПМД было выведено и опубликовано К. Меньюком в 1996 – 1997 г.г. В общем случае, указанные уравнения не имеют аналитического решения и решаются численно. Наибольший практический интерес представляют исследования о взаимодействии ПМД с такими нелинейными эффектами как фазовая самомодуляция и фазовая кросс-модуляция (ФКМ).

Исследования в области нелинейной передачи в волоконном световоде с дисперсией, поляризационными эффектами проводились в работах таких учёных как В.Е. Захаров, А.Б. Шабат, С.В. Манаков, Ю.С. Кившарь, И.Р. Габитов, В.А. Бурдин, А.Х. Султанов, И.Л. Виноградова, *C.R. Menyuk, D. Marcuse, G.P. Agrawal, Q. Lin, B.S. Marks, M. Karlsson* и многих других.

Исследования влияния ПМД на искажение сигнала вследствие фазовой самомодуляции были проведены в работах Е. Ибрагимова, К. Меньюка для случая оптического сигнала с одной несущей. При этом было показано, что в некоторых случаях возможно улучшение качества приема сигнала при наличии ПМД в линии по сравнению со случаем отсутствия ПМД.

Исследования влияния ПМД на искажение сигнала вследствие фазовой кросс-модуляции были проведены в работах Р. Хосравани, К. Меньюка, Г. Агравала, К. Лина. В этих работах был рассмотрен случай одновременной передачи двух канальных сигналов на различных несущих частотах, т.е. простейший вариант реализации *WDM*-сигнала. При этом был качественно описан эффект «сколь-

жения» битовой последовательности одного канала относительно бит другого канала вследствие хроматической дисперсии и связанное с этим нелинейное вращение поляризации сигналов. Также было указано на возможность улучшения качества приема сигнала при наличии слабой ПМД и нелинейностей по сравнению со случаем присутствия только нелинейностей. Однако аналитический подход, использованный К. Лином, был связан с рядом достаточно грубых допущений: во-первых, пренебрегалось внутриканальной ПМД, вызывающей уширение импульса, что некорректно при высоких значениях ПМД в линии; во-вторых, предполагалось, что дисперсия и нелинейности не изменяют форму импульсов сигнала на качки существенным образом, что некорректно при высоких значениях пиковой мощности сигнала на качки и существенной длине пролетов между компенсаторами дисперсии, в-третьих, из рассмотрения был исключен шум в оптических усилителях. Было показано, что наличие ПМД сокращает разницу в усредненном уровне переходных помех, вызванных ФКМ, между параллельно и ортогонально-поляризованными каналами. Также было показано, что в некоторых случаях наличие ПМД позволяет снизить переходные помехи, вызванные ФКМ. Однако не была исследована зависимость проявления этого эффекта от практически важных параметров передачи, таких как мощность, угол между исходными векторами поляризации двух сигналов. Кроме того, в существующей литературе нет свидетельств о проявлении такого эффекта при применении линейного кодирования с возвратом к нулю. Таким образом, актуальной задачей является исследование взаимодействия нелинейных эффектов и ПМД и его влияния на качество приема сигнала в зависимости от параметров передачи *WDM*-сигнала и различных конфигураций линии связи.

Объектом исследования являются цифровые каналы волоконно-оптических сетей связи большой протяженности (порядка 300 км и более), использующие в качестве среды распространения сигнала волокно с ненулевой смещенной дисперсией (*NZDSF*-волокно) и волокно, компенсирующее дисперсию, обладающие хроматической дисперсией, свойствами нелинейности и случайного двулучепреломления.

Предметом исследования являются эффекты, возникающие при совместном действии в канале связи большой дальности нелинейностей керровского типа и ПМД, зависимость этих эффектов от параметров передачи сигнала и характеристик канала связи и их влияние на качество передачи сигнала.

Целью работы является повышение качества передачи цифровых сигналов в волоконно-оптических линиях большой дальности за счет снижения нелинейных искажений вследствие поляризационных эффектов.

Задачи исследования

1. Разработка метода оценки качества передачи *WDM*-сигнала, позволяющего получить количественные характеристики результатов взаимодействия ПМД и нелинейностей керровского типа в волоконно-оптических линиях передачи.

2. Разработка метода снижения искажений, вызванных нелинейностями керровского типа, при передаче *WDM*-сигнала, с помощью скремблирования поляризации на передающей стороне в линиях с малой величиной ПМД.

3. Определение частоты скремблирования поляризации, при которой достигается наилучшее качество передачи *WDM*-сигнала в условиях керровских нелинейностей и слабой ПМД при скремблировании поляризации на передающей стороне.

4. Разработка метода синтеза многослойного диэлектрического фильтра для выделения каналов из *WDM*-сигнала на основе периодической структуры с гауссовским профилем показателя преломления.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод оценки качества передачи *WDM*-сигнала, основанный на имитационном моделировании линии связи, отличающийся от применяемых на практике учетом совместного действия ПМД и керровских нелинейностей, а также учетом зависимости от угла между векторами поляризации канальных сигналов, позволяющий количественно оценить эффект взаимодействия ПМД и нелинейностей керровского типа, в том числе показать, что в результате взаимодействия ПМД может скомпенсировать нелинейные искажения и привести к повышению *Q*-фактора.

2. Впервые предложена для снижения искажений, вызванных нелинейностями керровского типа, при передаче *WDM*-сигнала по линиям со слабой ПМД, процедура скремблирования поляризации на передающей стороне, позволяющая повысить *Q*-фактор принимаемого сигнала без дополнительной обработки сигнала на приемной стороне.

3. Установлено наличие оптимальной частоты скремблирования поляризации на основе имитационного моделирования линии связи, позволяющей получить наивысшее значение *Q*-фактора сигнала.

4. Разработан метод синтеза оптических фильтров с гауссовой огибающей профиля показателя преломления для *WDM*-систем на основе многослойных диэлектрических структур, основанный на предварительном определении параметров периодического фильтра-прототипа, отличающийся использованием вновь полученных уравнений синтеза, позволяющий получить требуемые спектральные характеристики и существенно подавить переходные помехи от соседних каналов.

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов состоит в возможности их использования при проектировании каналов волоконно-оптических линий передачи, расчете их эксплуатационных параметров и настройке канального оборудования. Скремблирование поляризации сигнала на передающей стороне позволяет повысить качество принимаемого сигнала без дополнительной обработки на приемной стороне на 1,8 дБ. Разработанные интерференционные фильтры могут применяться в самых различных *WDM*-системах: мультисканальных системах *CWDM* и магистральных системах *DWDM* с целью понижения стоимости демультиплексоров и повышения качества приема сигнала. Применение гауссовской модуляции профиля показателя преломления позволяет подавить переходные помехи от соседнего канала на 8,4 дБ по сравнению с периодическим четвертьволновым фильтром.

Методология и методы исследования. Результаты работы получены с использованием математического аппарата и численных методов решения уравнений, зарекомендовавших себя в многочисленных исследованиях отечественных и

зарубежных ученых. При разработке математических основ используемой модели использовались положения теории поля, теории дифференциальных уравнений, теории рядов, теории матриц. При проведении компьютерного моделирования использовались численные методы решения уравнений: Фурье-метод расщепления по физическим параметрам и метод грубого шага.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод оценки качества передачи *WDM*-сигнала, *основанный* на численном моделировании линии связи, *отличающийся* от применяемых на практике учетом взаимодействия ПМД и нелинейностей керровского типа, а также исходного состояния поляризации канальных сигналов, *позволяющий* получить количественные характеристики этого взаимодействия и его влияния на качество передачи сигнала.

2. Метод снижения искажений, вызванных керровскими нелинейностями, при передаче *WDM*-сигнала, *основанный* на скремблировании поляризации на передающей стороне, *позволяющий* повысить качество принимаемого сигнала.

3. Результаты имитационного моделирования для определения частоты скремблирования поляризации, *позволяющей* максимально повысить качество принимаемого *WDM*-сигнала в условиях нелинейностей керровского типа и слабой ПМД.

4. Метод синтеза многослойного диэлектрического фильтра с гауссовской огибающей профиля показателя преломления для выделения каналов из *WDM*-сигнала, *основанный* на расчете параметров периодического фильтра-прототипа, *отличающийся* применением вновь полученных уравнений синтеза, *позволяющий* получить структуру фильтра, обладающего требуемыми спектральными характеристиками.

Достоверность полученных результатов основана на использовании в теоретических построениях законов и подходов, справедливость которых общепризнана, а также известного и корректного математического аппарата; вводимые допущения мотивированы фактами, известными из практики. Принятая к исследованию математическая модель волоконно-оптической линии протестирована на наличие основных свойств, характеризующих описываемые моделью нелинейные и поляризационные эффекты. Результаты компьютерного моделирования согласуются с результатами экспериментального исследования.

Апробация результатов. Основные результаты работы обсуждались на: XI и XIII Международных научно-технических конференциях «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, 2010 и 2012; Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», Уфа, 2009; научно-технических встречах в Дармштадтском техническом университете, г. Дармштадт, 2012, а также на семинарах кафедры телекоммуникационных систем УГАТУ.

Результаты работы применены при выполнении научно-исследовательской работы, реализуемой в рамках гранта Минобрнауки России по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме 14.В37.21.1974.

Текст программы для ЭВМ, созданной при работе над диссертацией, отправлен для регистрации в Федеральный институт промышленной собственности.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 12 публикациях, в том числе в 3 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и в 9 публикациях в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Содержит 146 стр. машинописного текста, из которых основной текст составляет 126 стр., 58 рисунков, библиографический список из 46 наименований, приложения на 20 стр.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ современного состояния волоконно-оптических телекоммуникационных систем, определена значимость систем со спектральным уплотнением каналов (систем *WDM*). Рассмотрены основные типы эффектов, снижающих качество передачи сигналов в волоконно-оптических линиях: хроматическая дисперсия, фазовая самомодуляция сигнала, фазовая кросс-модуляция, четвертьволновое смещение, поляризационно-модовая дисперсия (ПМД), шум волоконных усилителей, вызванный усиленной спонтанной эмиссией.

Рассмотрена применяемая на практике структура волоконно-оптических линий сетей *WDM* с использованием оптических усилителей.

Обоснована необходимость совместного рассмотрения нелинейных эффектов и ПМД в длинных линиях. Рассмотрен математический аппарат моделирования волоконно-оптических линий: связанные нелинейные уравнения Шредингера и уравнение Манакова-ПМД. Получена система уравнений Шредингера для двухканального *WDM*-сигнала:

$$\frac{\partial A_{lp}}{\partial z} + \beta_{1lp} \frac{\partial A_{lp}}{\partial t} + \frac{i\beta_{2l}}{2} \frac{\partial^2 A_{lp}}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_{lp} = i\gamma_l \left(|A_{lp}|^2 + 2|A_{mp}|^2 + \frac{2}{3} \left(|A_{lq}|^2 + |A_{mq}|^2 \right) \right) A_{lp}, \quad (1)$$

где $l, m = 1; 2, l \neq m; p, q = x, y, p \neq q$;

$A_{lp}(z, t)$ – соответствующая компонента огибающей сигнала;

α – коэффициент затухания;

β_1, β_2 – первая и вторая, соответственно, производные постоянной распространения электрического поля;

γ – коэффициент нелинейности.

Рассмотрен метод численного решения системы уравнений Шредингера – Фурье-метод расщепления по физическим параметрам (*split-step Fourier method*).

Наибольший практический интерес представляют исследования о взаимодействии ПМД с такими нелинейными эффектами как фазовая самомодуляция и фазовая кросс-модуляция (ФКМ).

Приведен обзор существующих исследований в области взаимодействия фазовой самомодуляции и ПМД. В указанных работах обнаружен эффект повышения качества передачи оптического сигнала (увеличение раскрытия глаз-диаграммы)

при наличии ПМД в линии по сравнению со случаем отсутствия ПМД. При этом указывается, что данный эффект имеет вероятностный характер, вероятность появления эффекта зависит от поляризации исходного сигнала. Указанные исследования проведены для сигналов с возвратом огибающей к нулю и без возврата огибающей к нулю.

Приведен обзор исследований, посвященных взаимодействию ФКМ и ПМД. В указанных работах приведена аналитическая оценка средней величины переходных помех, вызванных ФКМ; указывается, что наличие ПМД изменяет средний уровень помех в зависимости от поляризации исходного сигнала.

Показано, что исследование взаимодействия нелинейностей керровского типа и ПМД при передаче *WDM*-сигнала является актуальной научно-технической задачей.

Во второй главе приводится описание и обоснование метода оценки качества передачи *WDM*-сигнала и применяемой имитационной модели волоконно-оптической линии. Представлены описание проведенных вычислительных экспериментов и анализ результатов.

Рассматривается случай распространения двух сигналов на различных длинах волн; угол между их векторами электрической напряженности поля обозначим θ . В данной работе исследуются линии с постоянным коэффициентом ПМД D_p по длине волокна.

При моделировании распространения оптического сигнала по волокну задача сводится к нахождению комплексной огибающей каждого сигнала в точке $z = L$, где L – длина линии, в виде вектора Джонса $(A_x, A_y)^T$. Уравнения (1) применимы для решения задачи распространения поля только в случае сегмента волокна с определенными, неизменными по длине, направлением осей двулучепреломления и величиной двулучепреломления. Для моделирования случайного характера ПМД используется метод грубого шага (*coarse-step method*), суть которого сводится к разбиению волокна на такие сегменты и применению матрицы поворота в каждом сегменте в соответствии с уравнением:

$$\begin{pmatrix} \hat{A}_x \\ \hat{A}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \exp(i\varphi) \\ -\sin \alpha \exp(-i\varphi) & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где A_x, A_y – компоненты вектора Джонса огибающей сигнала в начале сегмента, α, φ – случайные величины, равномерно распределенные в диапазоне от 0 до 2π включительно.

Таким образом, граничные условия для решения уравнений (1) для каждого сегмента задаются как вектор Джонса огибающей сигнала в начале сегмента.

Для численного решения уравнений (1) в каждом сегменте используется Фурье-метод расщепления по физическим параметрам.

Случайный характер ПМД в исследуемой модели учитывается использованием случайных параметров α, φ и $\Delta\beta_1/D_p$ (здесь $\Delta\beta_1 = |\beta_{1x} - \beta_{1y}|/2$). Для первого и второго распределение принимается равномерным (так как вектор ПМД может иметь любое направление на сфере Пуанкаре), для третьего – нормальным с математическим ожиданием, равным $1/\sqrt{2L_c}$, где L_c – длина корреляции ПМД.

Для оценки качества передачи *WDM*-сигнала используется *Q*-фактор, вычисляемый по формуле:

$$Q = \frac{|E_1 - E_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (3)$$

где E_1 и E_0 – математические ожидания состояний «1» и «0» сигнала, соответственно, σ_1 и σ_0 – их среднеквадратические отклонения.

Q-фактор, выраженный в децибелах, линейно связан с отношением сигнал-шум сигнала, и вычисляется по формуле:

$$q = 20 \lg Q. \quad (4)$$

Для получения количественной оценки взаимодействия ПМД и керровских нелинейностей рассчитывается зависимость *Q*-фактора от угла θ при заданных мощностях сигнала и накачки и заданном коэффициенте D_p . При этом первоначально моделируется линия с учетом только нелинейных эффектов (т.е., $D_p = 0$), а затем с учетом одновременного влияния ПМД и нелинейностей. Для получения статистической оценки имитационное моделирование повторяется многократно. Полученные результаты используются для построения функции распределения *Q*-фактора.

В проведенных вычислительных экспериментах моделировалась типовая линия, состоящая из передатчика, пяти одинаковых пролетов усиления, полосового оптического фильтра, идеального квадратичного детектора. Каждый из пролетов включает в себя рабочее волокно длиной 80 км, волокно, компенсирующее дисперсию длиной 4,5 км и идеальный оптический усилитель. *Q*-фактор вычисляется для электрического сигнала на выходе квадратичного детектора.

Оптическое волокно обладает свойствами хроматической дисперсии (второго порядка), двулучепреломления, затухания и квадратичной нелинейности.

В данной работе рассматриваются линейные коды с возвратом огибающей к нулю (*RZ*) и без возврата огибающей к нулю (*NRZ*).

Для волокна, легированного эрбием, пренебрегаем нелинейными эффектами и двулучепреломлением (поляризационными эффектами в усилителе).

Оба канальных сигнала модулируются псевдослучайной битовой последовательностью со скоростью 40 Гбит/с. Предлагается рассматривать один сигнал как исследуемый, а второй как сигнал накачки.

В работе дана оценка ошибки численного решения модели. Общая относительная ошибка решения рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{\|A_m - A_q\|}{\|A_q\|}, \quad (5)$$

где норма $\|A\|$ определяется как

$$\|A\| = \sqrt{\int |A(t)|^2 dt}, \quad (6)$$

A_q – полученное численное решение, A_m – точное решение.

С использованием экстраполяционной формулы Ричардсона было получено уточненное значение величины $A(t)$, которое может использоваться в качестве A_m . Вычисленная по формуле (5) ошибка составляет $1,22 \cdot 10^{-5}$.

На рисунках 1, 2 приведены результаты вычислительных экспериментов: зависимость изменения Q -фактора от угла θ в линии с ПМД и керровскими нелинейностями по сравнению с линией, в которой рассматриваются только нелинейности.

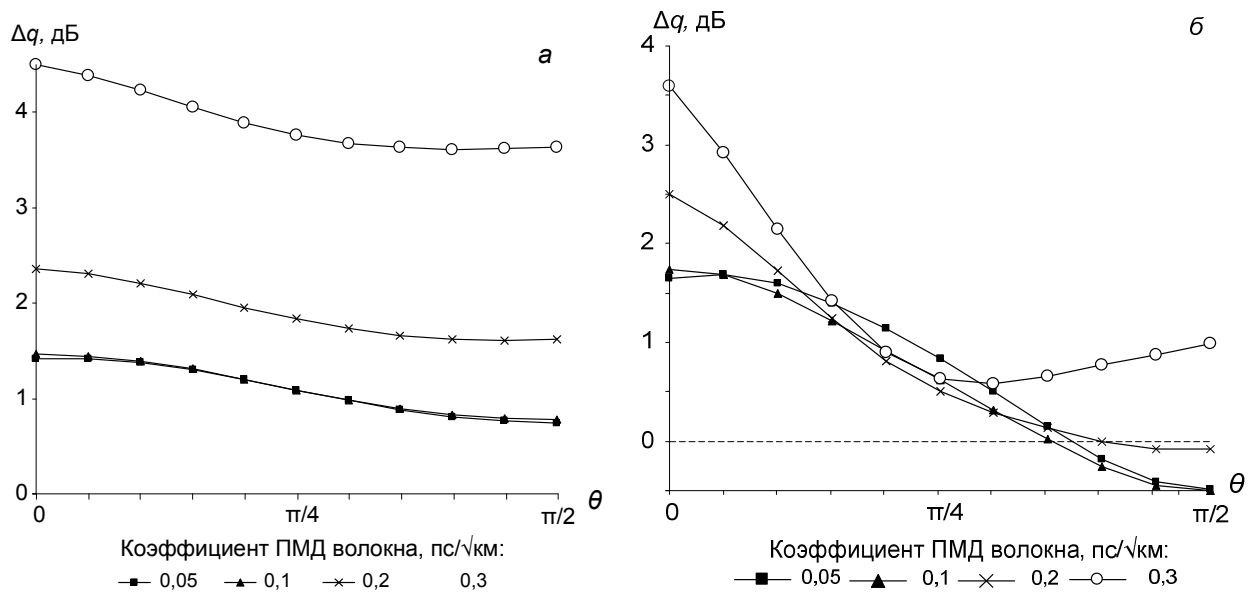


Рисунок 1 – Зависимость Q -фактора от мощности сигнала накачки (a – 5 мВт, b – 20 мВт) и величины коэффициента ПМД волокна для NRZ-сигнала (за нулевой уровень принят Q -фактор в линии с нелинейностями, но без ПМД)

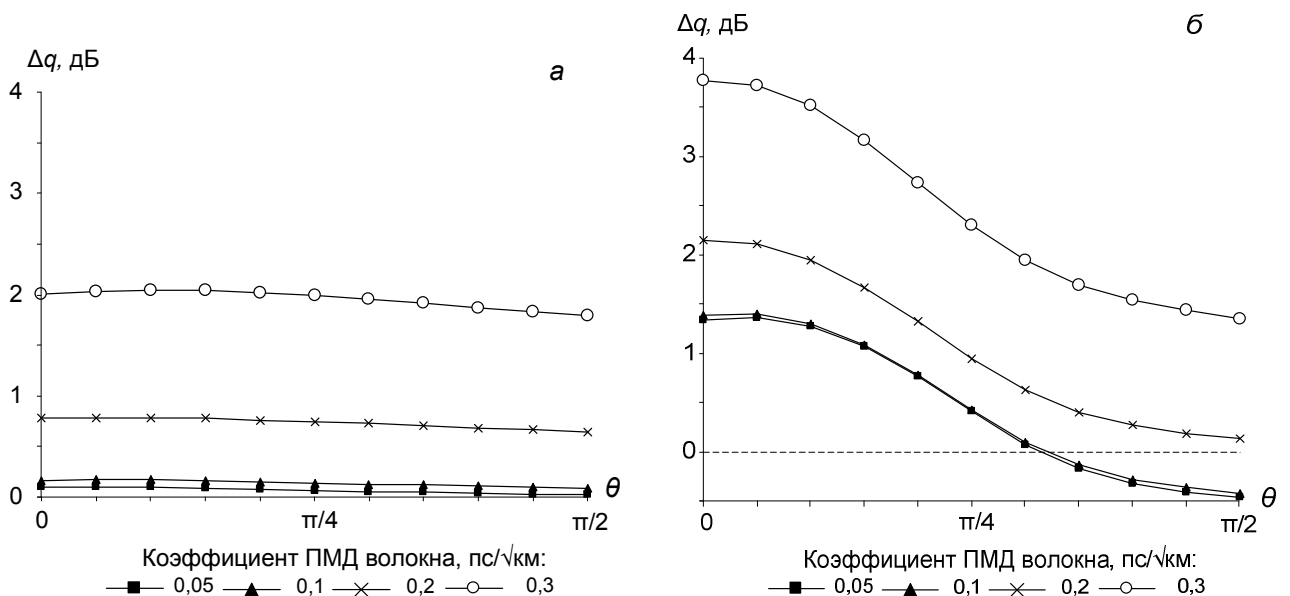


Рисунок 2 – Зависимость Q -фактора от мощности сигнала накачки (a – 5 мВт, b – 20 мВт) и величины коэффициента ПМД волокна для RZ-сигнала (за нулевой уровень принят Q -фактор в линии с нелинейностями, но без ПМД)

Мощность исследуемого сигнала принимается равной 5 мВт во всех экспериментах. Мощность сигнала накачки принимается равной 5, 20, 40 мВт.

Для определения статистических характеристик взаимодействия нелинейных и поляризационных эффектов было проведено 3000 независимых вычислительных

экспериментов, в каждом из которых рассчитывался Q -фактор принимаемого сигнала. При этом коэффициент ПМД волокна принимался равным $0,1 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$. При тех же параметрах модели рассчитывался Q -фактор принимаемого сигнала при отсутствии ПМД. На рисунке 3 приводится комплементарная интегральная функция распределения вероятностей значения Q -фактора в линиях с ПМД и нелинейностями (нормированного к значению Q -фактора в линии с нелинейностями без ПМД).

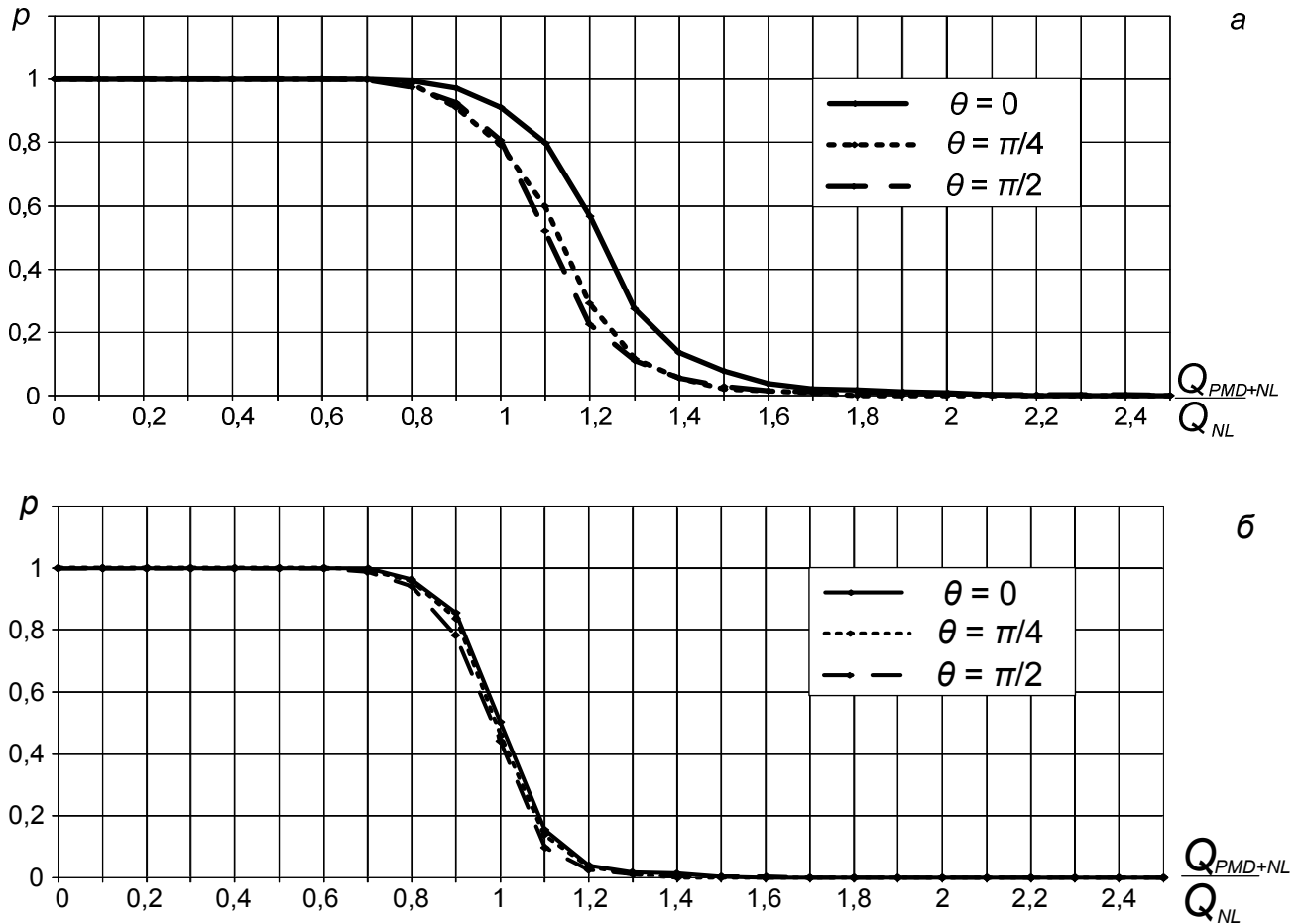


Рисунок 3 – Комплементарная интегральная функция распределения вероятностей значения Q -фактора в линиях с ПМД и нелинейностями (нормированного к значению Q -фактора в линии с нелинейностями без ПМД): a – при передаче NRZ-сигнала, b – при передаче RZ-сигнала

Сравнение результатов для сигналов с RZ-кодированием и NRZ-кодированием показывает, что для RZ-сигнала эффект повышения качества передачи сигнала в присутствии ПМД выражается слабее и существенно меньше выражена зависимость от угла между векторами поляризации.

Для обоих видов линейного кодирования характерно, что при высокой мощности накачки (20, 40 мВт) наличие ПМД в линии приводит к ухудшению качества передачи при значениях угла θ , близких к $\pi/2$.

В работе рассматривается влияние шума EDFA-усилителей, вызванного усиленной спонтанной эмиссией, на взаимодействие ПМД и нелинейностей. Этот шум является принципиально неустранимым эффектом в WDM-сетях. Для WDM-сигналов он может рассматриваться как аддитивный гауссовский белый шум. Для оценки влияния шума на описанный эффект взаимодействия ПМД и нелинейно-

стей были повторно проведены вычислительные эксперименты по передаче *NRZ*-сигналов, но при наличии шума в каждом *EDFA*-усилителе. По результатам моделирования было показано, что наличие шума *EDFA* не изменяет значительно качественных и количественных характеристик влияния ПМД на *Q*-фактор.

В третьей главе рассматриваются возможности применения скремблеров поляризации в ВОЛП для снижения искажений, вносимых нелинейными эффектами.

В настоящей работе исследуется вариант, когда скремблер устанавливается на передающей стороне после источника оптического сигнала и обрабатывает одновременно все *WDM*-каналы.

В качестве модели скремблера поляризации в данной работе используется двулучепреломляющая пластина, вращающаяся с заданной частотой вокруг оси, сонаправленной с осью *z*, вдоль которой распространяется электрическое поле.

При прохождении битовой последовательности через вращающуюся пластину происходит непрерывная деполяризация сигнала, т.е., рассеивание его поляризации по сфере Пуанкаре.

Рассматривается простейший скремблер поляризации, представляющий собой вращающуюся полуволновую пластину.

Для изучения влияния частоты скремблирования на качество приема сигнала была проведена серия вычислительных экспериментов. При этом коэффициент ПМД принимался равным $0,05$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$, что соответствует большинству используемых в настоящее время волокон. В проведенных экспериментах мощность исследуемого сигнала и сигнала накачки принималась равной 5 мВт.

Результаты моделирования приведены на рисунке 4.

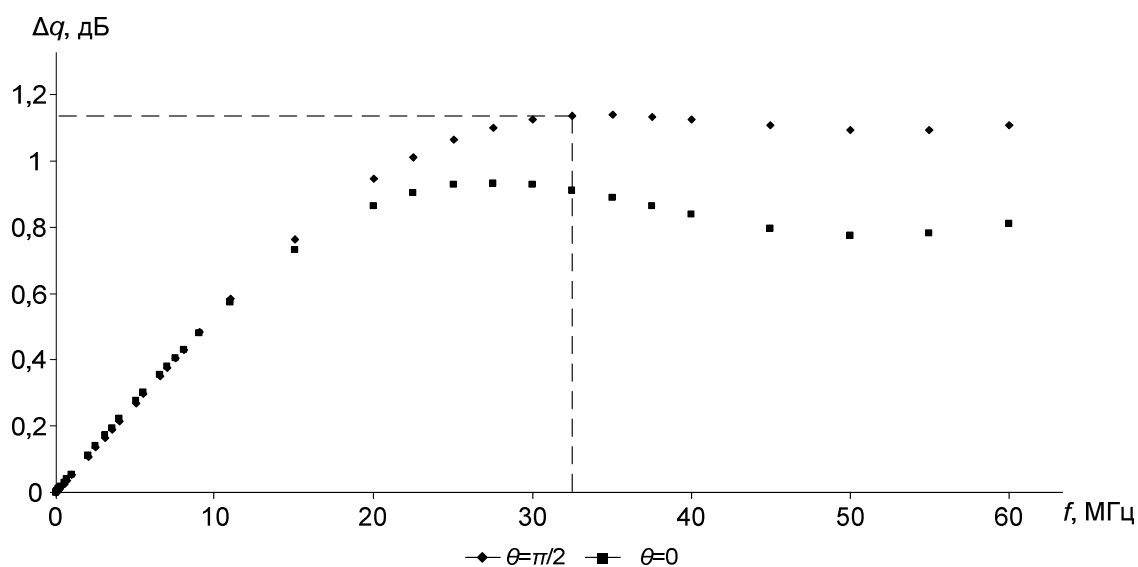


Рисунок 4 – Влияние частоты скремблирования поляризации сигнала на *Q*-фактор для параллельно и ортогонально поляризованных сигналов

Частота скремблирования выше 60 МГц в данной серии расчетов не рассматривалась в связи с тем, что одноступенчатые скремблеры такой высокой частоты не применяются на практике. Согласно результатам моделирования, наилучшее каче-

ство принимаемого сигнала наблюдается при частоте скремблирования 32,5 МГц. При этом наблюдается повышение качества приема на 0,9 – 1,1 дБ.

Для рассеивания вектора Стокса сигнала по поверхности всей сферы Пуанкаре использовались три вращающиеся двулучепреломляющие пластины: четвертьволновая, полуволновая и снова четвертьволновая. Траектория вектора Стокса на сфере Пуанкаре и результаты моделирования приведены на рисунке 5. При использовании данной конфигурации скремблера наблюдается повышение качества приема сигнала на 1,76 – 1,82 дБ.

В четвертой главе рассматривается метод синтеза интерференционных фильтров для выделения канальных сигналов в системах со спектральным уплотнением каналов.

Интерференционные фильтры на основе периодических структур при нормальном падении света показывают слабую зависимость характеристик от поляризации сигнала, так как слои фильтрующей структуры создаются напылением в вакууме и имеют анизотропные свойства. Кроме того, ввиду небольших размеров и материалов, близких по своим свойствам к кварцевому стеклу, такие фильтры не вносят существенных нелинейных искажений.

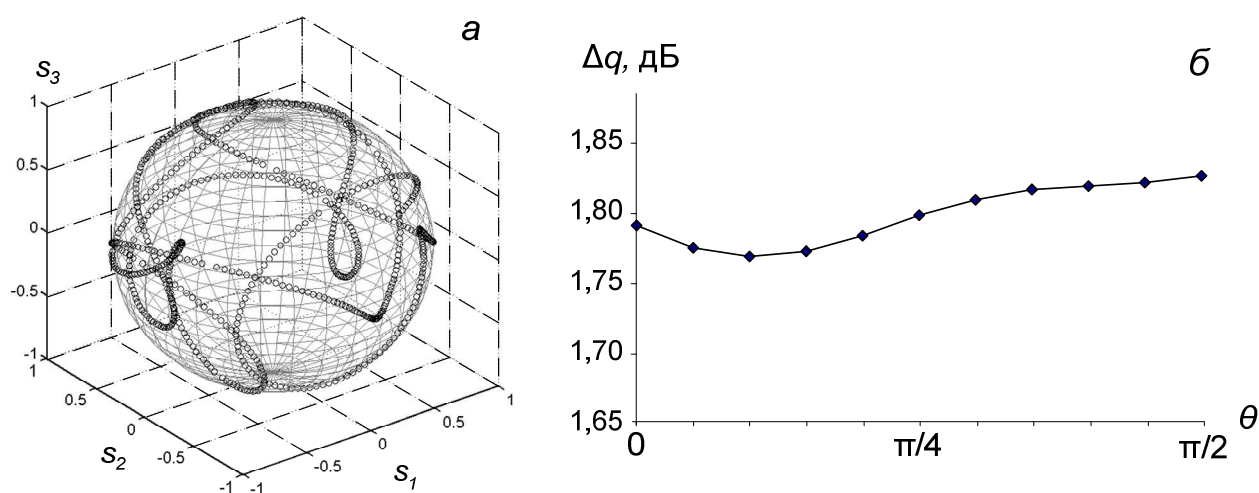


Рисунок 5 – Скремблирование поляризации тремя двулучепреломляющими пластинами:
а – траектория вектора Стокса на сфере Пуанкаре; *б* – результаты моделирования

При поточном создании такие фильтры технологичны и имеют малую себестоимость, так как в камере напыления одновременно может быть создано большое количество фильтрующих структур.

Рассматривается фильтр-прототип, состоящий из чередования слоев с двумя различными показателями преломления, оптическая толщина каждого из которых составляет четверть центральной длины волны фильтра λ_0 .

С использованием результатов теории матриц в работе получены уравнения, связывающие между собой важнейшие параметры фильтра: ширину главного максимума (полосы отражения) $\Delta\lambda$, значение показателей преломления, выраженное их отношением $\xi = n_2/n_1$, количество бинарных слоев N и коэффициент отражения r .

$$N = \frac{1}{2} \log_{\xi} \left(\frac{1+|r|}{1-|r|} \right), \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} \log_{\xi} \left(\frac{1+|r|}{1-|r|} \right) = \left(1 - \frac{1}{\pi} \arccos \frac{(\xi+1)^2 \cos x - (\xi-1)^2}{4\xi} \right)^{-1}, \quad (8)$$

где для узкополосных фильтров $x = \frac{2\pi\lambda_0}{2\lambda_0 + \Delta\lambda}$.

Уравнение (8) не имеет аналитического решения, но может быть решено численно. На интервале $\xi \in (1; 1,5)$, который обусловлен доступными для создания интерференционных фильтров веществами, уравнение (8) имеет не более одного корня.

Для численного расчета спектральных характеристик периодических фильтров используется алгоритм, основанный на рекуррентном пересчёте импедансов: входной импеданс системы из N слоёв $Z_{\text{вх}}^{(n)}$ определяется через входной импеданс системы из предыдущих $N-1$ слоёв и импеданс N -го слоя. Полученное значение используется для расчета комплексного коэффициента отражения.

Для спектральных характеристик однородных четвертьволновых фильтров характерно наличие существенных боковых максимумов. Поэтому предложено использовать многослойную структуру, огибающая профиля показателя преломления которой является гауссовской функцией. При этом для подавления боковых максимумов с двух сторон от главного максимума необходимо использовать двустороннюю гауссовскую модуляцию профиля показателя преломления, так как в этом случае средний показатель преломления структуры не изменяется по её длине, и амплитудно-частотная характеристика фильтра остается симметричной. Пример подобной структуры приведен на рисунке 6, а.

Анализ результатов многочисленных вычислительных экспериментов показывает, что ширина полосы отражения на полувысоте максимума (*FWHM*) модулированного по профилю фильтра приблизительно равна ширине полосы отражения однородного четвертьволнового фильтра. Следовательно, формулы синтеза четвертьволновых фильтров (7) и (8) могут быть использованы для синтеза фильтров с двусторонней гауссовской модуляцией профиля показателя преломления. Если при этом коэффициент отражения на центральной длине волны не удовлетворяет поставленным требованиям, то количество слоев структуры может быть увеличено для получения более высокого коэффициента отражения. При этом соответственно должен быть изменен параметр ξ в соответствии с уравнением (7).

В соответствии с описанным методом могут быть синтезированы разнообразные фильтры – с шириной главного максимума в десятые доли нанометра и в десятки нанометров.

Пример спектральной характеристики режекторного фильтра, предназначенного для выделения одной канальной несущей *DWDM*, представлен на рисунке 6, б.

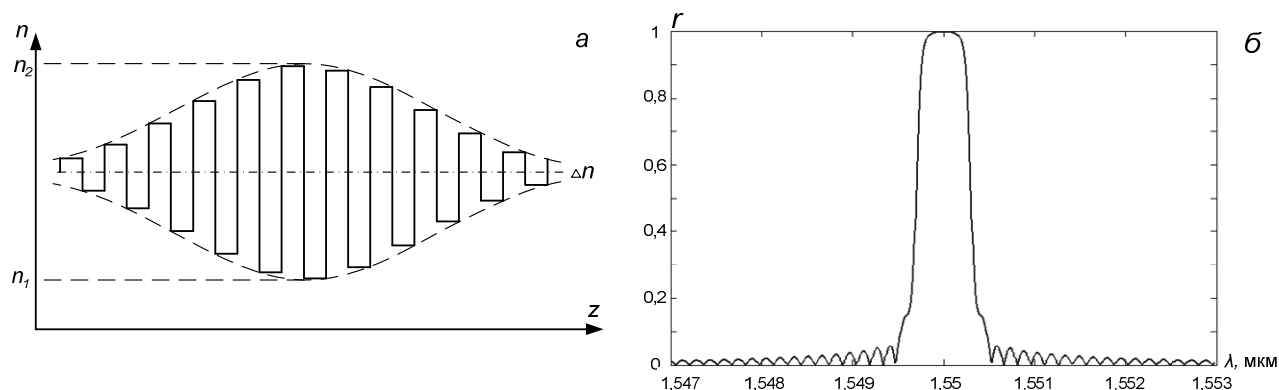


Рисунок 6 – Фильтр с двусторонней гауссовской модуляцией профиля показателя преломления: *а* – схематичный вид профиля показателя преломления; *б* – пример спектральной характеристики

Для оценки эффективности фильтра было проведено имитационное моделирование с использованием синтезированного фильтра в составе приемника оптического сигнала. По результатам моделирования передачи сигнала с пиковой мощностью 5 мВт по ВОЛП повышение Q -фактора сигнала после фильтрации составило 8,6 дБ.

Расчетная изоляция канала, выделяемого полученным фильтром, относительно соседнего канала составляет 21,6 дБ (при межканальном интервале 100 ГГц).

По сравнению с периодическим четвертьволновым фильтром-прототипом переходные помехи соседнего канала подавлены на 8,4 дБ.

В пятой главе описывается экспериментальное исследование влияния скремблирования поляризации на качество передаваемого сигнала.

Рассмотрены особенности ПМД в волокнах, намотанных на катушку. Вычислительная модель для имитационного моделирования скорректирована для расчетов качества передачи сигнала по волокнам в лабораторных условиях.

Разработана методика проведения эксперимента, собрана научно-исследовательская экспериментальная установка. Схема установки приведена на рисунке 7.

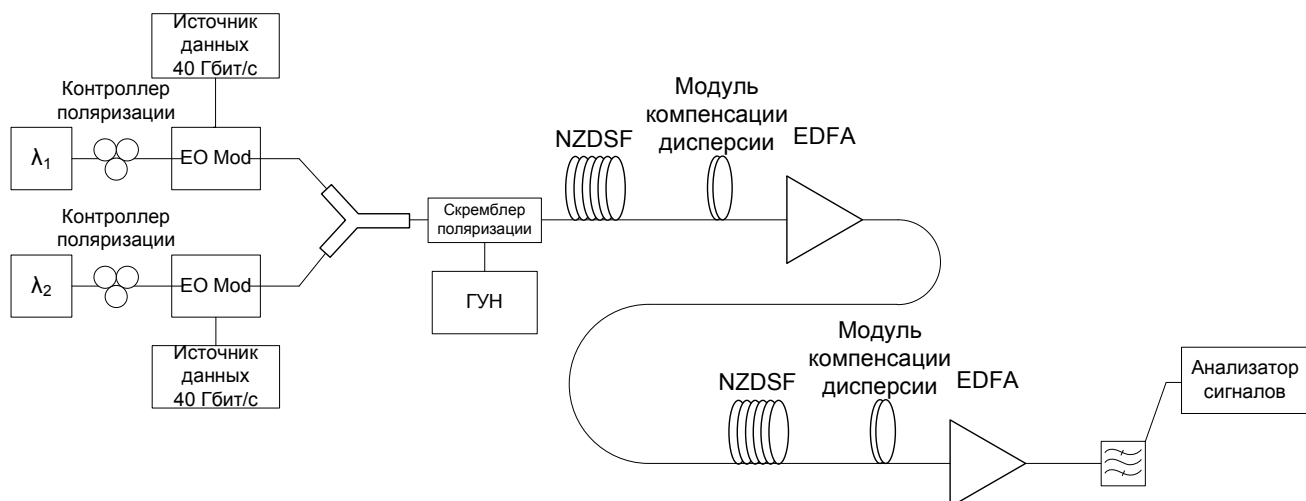


Рисунок 7 – Научно-исследовательская экспериментальная установка

Сравнение результатов имитационного моделирования и экспериментального исследования приводится на рисунке 8. Как видно из рисунка, результаты в достаточной мере совпадают.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность повышения качества передачи *WDM*-сигнала скремблированием поляризации на передающей стороне и подтверждена зависимость Q -фактора скремблированного сигнала от частоты скремблирования.

В заключении изложены основные результаты работы.

В приложениях приведены код разработанной программы для ЭВМ и коды различных её функциональных модулей.

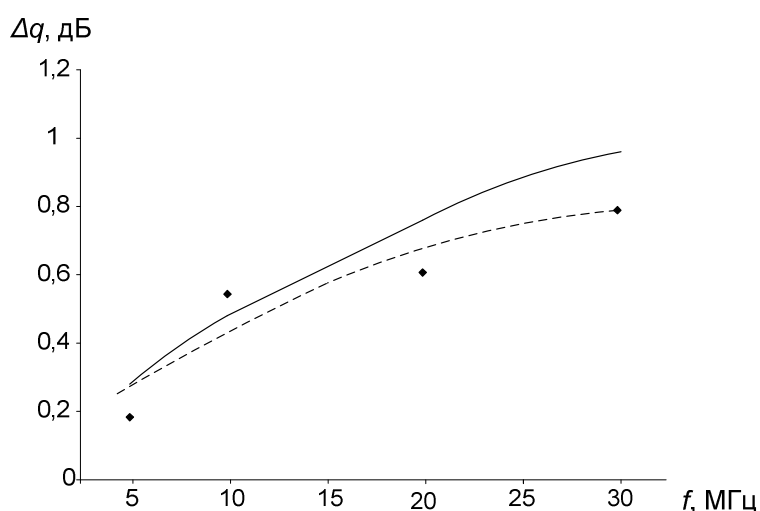


Рисунок 8 – Сравнение результатов эксперимента и имитационного моделирования (за нулевой уровень принят Q -фактор в линии без скремблирования).

Сплошная линия – результат имитационного моделирования, пунктирная линия – характеристика, полученная экспериментально.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод оценки качества передачи *WDM*-сигнала, основанный на имитационном моделировании линии связи, отличающийся от применяемых на практике учетом совместного действия ПМД и керровских нелинейностей, а также учетом зависимости от угла между векторами поляризации канальных сигналов, позволяющий количественно оценить влияние взаимодействия ПМД и керровских нелинейностей на Q -фактор принимаемого сигнала.

2. Получена статистическая оценка влияния взаимодействия ПМД и керровских нелинейностей на Q -фактор принимаемого сигнала. Установлено, что Q -фактор в результате этого взаимодействия может быть выше, чем при учёте только нелинейностей. Вероятность проявления указанного эффекта зависит от угла между исходными векторами поляризации сигналов и составляет 0,91, 0,79 и 0,8 (для углов 0, $\pi/4$ и $\pi/2$, соответственно) для *NRZ*-сигнала, 0,49, 0,46 и 0,44 (для углов 0, $\pi/4$ и $\pi/2$, соответственно) для *RZ*-сигнала. Показано, что для *RZ*-кодов величина проявления указанного эффекта и его зависимость от угла между исходными поляризациями слабее, чем для *NRZ*-кодов. Q -фактор сигнала существенно

зависит от угла между исходными векторами поляризации сигналов (до 2,5 дБ при мощности накачки 20 мВт).

3. Впервые предложена для снижения искажений, вызванных нелинейностями керровского типа, при передаче *WDM*-сигнала по линиям со слабой ПМД, процедура скремблирования поляризации на передающей стороне, *позволяющая* повысить *Q*-фактор принимаемого сигнала без дополнительной обработки сигнала на приемной стороне на 1,8 дБ.

4. Установлено наличие оптимальной частоты скремблирования поляризации на основе численного моделирования линии связи, позволяющей повысить *Q*-фактор принимаемого сигнала на 1,1 дБ при использовании одноступенчатого скремблера. Указанная частота составляет 32,5 МГц.

5. Разработан метод синтеза оптических фильтров с гауссовой огибающей профиля показателя преломления для *WDM*-систем на основе многослойных диэлектрических структур, основанный на предварительном определении параметров периодического фильтра-прототипа, отличающийся использованием вновь полученных уравнений синтеза, позволяющий получить требуемые спектральные характеристики и подавить переходные помехи от соседнего канала на 8,4 дБ по сравнению с периодическим четвертьволновым фильтром. На основе имитационного моделирования линии связи с аддитивным гауссовским шумом показано, что применение фильтра позволило повысить *Q*-фактор сигнала на 8,6 дБ.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Актуальной научно-технической задачей является исследование взаимодействия ПМД и нелинейных эффектов при скремблировании *WDM*-сигнала с помехоустойчивым кодированием. Применение этого метода позволит компенсировать ПМД в многоканальных *WDM*-системах.

Также актуальной научно-технической задачей является развитие методов моделирования оптических линий передачи с учетом реального распределения ПМД в линии, полученного в результате полевых измерений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Рекуррентные методы минимизации оптических многослойных структур для волоконно-оптических средств связи / Султанов А.Х., Багманов В.Х., Костров С.В., Кутлюяров Р.В. // Вестник УГАТУ: науч. журнал Уфимск. гос. авиац. ун-та. УГАТУ. 2009, т.13, №1, (34). С. 193-199.

2. Синтез оптических отражательных фильтров на основе тонкопленочных структур / Султанов А.Х., Багманов В.Х., Костров С.В., Кутлюяров Р.В. // Вестник УГАТУ: науч. журнал Уфимск. гос. авиац. ун-та. УГАТУ. 2009, т.13, №1, (34). С. 206-213.

3. Моделирование распространения *WDM*-сигналов в волоконно-оптической линии передачи в условиях нелинейностей и поляризационно-модовой дисперсии / Султанов А.Х., Багманов В.Х., Кутлюяров Р.В., Харитонов С.В. // Вестник УГАТУ: науч. журнал Уфимск. гос. авиац. ун-та. УГАТУ. 2012, т. 16, № 8 (53). С. 29–35.

В других изданиях

4. Синтез режекторных и полосовых оптических многослойных фильтров для ВОЛП / Султанов А.Х., Багманов В.Х., Кутлюяров Р.В. // Мавлютовские чтения: материалы Всероссийской молодёжной научной конференции. Уфа: УГАТУ, 2008. С. 72 – 74.

5. Синтез отражательных оптических многослойных фильтров / Багманов В.Х., Кутлюяров Р.В., Султанов А.Х. // Оптические технологии в телекоммуникациях: Сб. докладов 6-й Международной конференции. Т. 7374. США: Изд-во *SPIE*, 2009. С. 737408-1 – 737408-11 (статья на англ. языке)

6. Оптимизация структуры высокоизбирательных тонкопленочных фильтров / Султанов А.Х., Багманов В.Х., Кутлюяров Р.В. // Мавлютовские чтения: материалы Всероссийской молодёжной научной конференции. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 129 – 130.

7. Моделирование процессов передачи оптического сигнала в волоконном световоде с учётом ПМД и нелинейных эффектов / Кутлюяров Р.В. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Материалы XI Международной научно-технической конференции. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 289 – 290.

8. Влияние модуляции профиля показателя преломления на спектральные свойства тонкопленочных оптических фильтров / Кутлюяров Р.В. // Актуальные проблемы в науке и технике. Том 4. Машиностроение, электроника, приборостроение: Сборник научных трудов пятой Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 190 – 193.

9. Компенсация ПМД в волоконно-оптической линии с учётом нелинейных эффектов / Кутлюяров Р.В. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Материалы XII Международной научно-технической конференции. Казань: Изд-во казан. гос. тех. ун-та, 2011. С. 340.

10. Компьютерная симуляция распространения импульса в волоконно-оптической линии с нелинейностями и ПМД / Султанов А.Х., Багманов В.Х., Кутлюяров Р.В., Харитонов С.В. // Оптические технологии в телекоммуникациях: Сб. докладов 9-й Международной конференции. Т. 8410. США: Изд-во *SPIE*, 2012. С. 841005-1 – 841005-8 (статья на англ. языке).

11. Моделирование передачи импульса по ВОЛП с учетом ПМД и нелинейностей / Кутлюяров Р.В. // Актуальные проблемы в науке и технике. Том 1. Информационные и инфокоммуникационные технологии: Сборник научных трудов седьмой Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2012. С. 319 – 321.

12. Искажения WDM-сигнала вследствие фазовой кросс-модуляции в случае нелинейной передачи в присутствии ПМД / Султанов А.Х., Багманов В.Х., Кутлюяров Р.В., Зайнуллин А.Р. // Оптические технологии в телекоммуникациях: Сб. докладов 10-й Международной конференции. Т. 8787. США: Изд-во *SPIE*, 2013. С. 878704-1 – 878704-6 (статья на англ. языке).

Диссертант



Р.В. Кутлюяров

КУТЛУЯРОВ Руслан Владимирович

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ
В ВОЛП БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ
ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ
И НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ КЕРРОВСКОГО ТИПА

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 30.10.2013. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 578.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-Центр, К.Маркса, 12