

На правах рукописи

Величко Максим Андреевич



**Уменьшение деградации оптических сигналов в
волоконно-оптических системах связи**

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2009

Работа выполнена на кафедре оптики и спектроскопии физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Беланов Анатолий Семенович
(Московский государственный
университет приборостроения и
информатики)

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Беловолов Михаил Иванович
(Институт проблем лазерных и
информационных технологий РАН)

Ведущая организация: Московский технический университет
связи и информатики,
Россия, 111024, г. Москва,
ул. Авиамоторная 8а.

Защита состоится "24" июня 2009 г. в 16 часов 30 минут на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.45 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова по адресу: Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19 корпус, ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке НИИЯФ МГУ имени М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан « 19 » мая 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
Д 501.001.45 при МГУ имени М. В. Ломоносова
кандидат физико-математических наук

 Вохник О. М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Понимание физических механизмов и закономерностей, возникающих в процессе распространения сигналов в оптическом волноводе, приобрело особую актуальность в связи с решением одной из важнейших задач в сфере оптических телекоммуникаций – задачи уменьшения дисперсионных и нелинейных искажений оптических сигналов.

Интерес к новым способам ослабления деградации сигналов сильно возрос в последнее десятилетие из-за постоянно увеличивающихся объемов и, как следствие, скоростей передачи информации, ведь искажения из-за поляризационной модовой дисперсии растут пропорционально битовой скорости, а искажения из-за хроматической дисперсии – пропорционально квадрату скорости передачи. Из-за сильной разветвленности сетей связи, необходимости их быстрого реконфигурирования актуальной стала также динамичность компенсации искажений.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных проблеме дисперсионных и нелинейных искажений сигналов, ряд важных фундаментальных вопросов оказался неизученным или изученным в недостаточной мере. В частности, к ним можно отнести актуальные сегодня способы ослабления или полезного использования частотной модуляции (чирпа), присутствующей в излучении лазеров с прямой модуляцией; методы электронной компенсации дисперсии и нелинейных эффектов и пр. Данная работа посвящена решению этих вопросов.

Цель работы

Проанализировать влияние физических механизмов деградации оптических сигналов на качество волоконно-оптических систем связи и найти новые способы ослабления деградации:

- Исследовать устойчивость различных форматов модуляции к воздействию хроматической, поляризационной модовой дисперсии и нелинейных эффектов;
- Для форматов, используемых в оптической связи и представляющих интерес с точки зрения повышенной устойчивости к дисперсии, найти оптимальную ширину полосы пропускания приемника, при которой коэффициент ошибок системы будет минимальным;
- Найти новые способы компенсации хроматической дисперсии в системах связи со скоростью 40 Гбит/с;
- Найти способы увеличения дальности передачи в системах связи с передатчиками на основе полупроводниковых лазеров с прямой модуляцией

Положения, выносимые на защиту

1. Из амплитудно-модулированного сигнала, подаваемого на вход оптического волокна, можно с помощью фазового модулятора, расположенного на некотором расстоянии в волокне, на выходе волокна сформировать инвертированный сигнал. Это явление можно использовать для эффективной электронной компенсации дисперсии в волоконно-оптической системе связи.
2. Из непрерывного фазомодулированного излучения на входе волокна можно на его выходе сформировать заданный амплитудно-модулированный сигнал. Такую фазовую модуляцию можно использовать для эффективной передачи информации на дальние расстояния.
3. При определенном выборе коэффициента нелинейного насыщения, фактора ограниченности полости резонатора, а также формы накачки лазера с прямой модуляцией в передатчике на его основе можно обеспечить деструктивную интерференцию между двумя логическими единицами, разделенными логическим нулем. Система, использующая такой передатчик, при прочих равных условиях, позволяет увеличить дальность передачи информации в 2 раза, а при использовании специального оптического фильтра в 5 раз, по сравнению со стандартным бинарным форматом.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается проработкой методик и тщательностью численных измерений, которые проводились на современной и качественной аппаратуре, а также многократностью проведения численных экспериментов и отсутствием противоречий между полученными результатами и результатами других исследовательских групп, приведенными в цитируемой литературе.

Практическая значимость

Практическая значимость работы обусловлена тем, что компенсация дисперсии и нелинейных искажений необходима при передаче информационных сигналов в волоконно-оптических системах связи. Совершенствование существующих и разработка новых, эффективных и недорогих способов уменьшения деградации сигналов имеет огромную практическую ценность, т.к. позволяет увеличивать скорость и дальность передачи информации в существующих телекоммуникационных сетях.

Формирование заданного амплитудно-модулированного сигнала в заданной точке волокна из фазомодулированного или амплитудно-

фазомодулированного излучения обеспечивает повышение точности и дальности работы распределенных волоконно-оптических датчиков.

Новизна работы

Предложен новый способ электронной компенсации дисперсии - метод «временной линзы», заключающийся в том, что амплитудно-модулированный сигнал приобретает с помощью установленного на некотором расстоянии в волокне модулятора дополнительную фазовую модуляцию, в результате чего на выходе волокна формируется инвертированный сигнал.

Впервые предложен способ формирования амплитудно-модулированного сигнала на выходе волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) из непрерывного фазомодулированного излучения (ФАМС/НФМИ). Впервые с его помощью показана возможность передачи информации на дальние расстояния.

Впервые для систем связи на основе полупроводниковых лазеров с прямой модуляцией, работающих на скорости передачи 10 Гбит/с показана возможность увеличения дальности передачи с помощью структурированной накачки.

Впервые для систем связи на основе полупроводниковых лазеров с прямой модуляцией с помощью структурирования накачки, оптимального выбора коэффициента нелинейного насыщения и фактора ограниченности полости резонатора реализован формат, обеспечивающий деструктивную интерференцию между логическими единицами, разделенными логическим нулем.

Впервые для систем связи на основе лазеров с внешней модуляцией при скорости передачи 40 Гбит/с для форматов AMI, PSBT и 4-ary ASK найдена оптимальная ширина полосы приемника, при которой влияние хроматической дисперсии, поляризационной модовой дисперсии и нелинейных эффектов минимально.

Апробация работы и публикации

Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры оптики и спектроскопии физического факультета МГУ, а также на конференциях: Всероссийской конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», Казань (2008), 5-ой Международной научно-технической конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», Уфа (2007), Всероссийской конференции по волоконной оптике, Москва (2007), Международной конференции «Сучасні проблеми і досягнення в галузі задиотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», Запорожье (2006), Всероссийской молодежной научной школе "Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение", Саранск (2006), International Conference Laser and Laser-

information technologies: fundamental problems and Applications, ILLA, Варна (2006), 8th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, LFNM-2006, Харьков (2006), International Conference Laser Optics (2006).

Основной материал диссертации, кроме тезисов докладов на научных конференциях, отражен в 6 научных статьях. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 134 страницах. Она состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы из 105 наименований, содержит 60 рисунков.

Краткое содержание диссертации

Введение

Во введении содержится обоснование актуальности выбранной темы, излагаются цели диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов работы и о публикациях автора.

Первая глава

В первой главе приведен обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований, описывающих распространение светового излучения в одномодовом волокне. Описано влияние на оптические сигналы хроматической дисперсии, поляризационной модовой дисперсии (ПМД) и нелинейных эффектов. Проанализированы литературные сведения, касающиеся способов борьбы с искажениями сигнала, возникающими в результате действия этих эффектов. Описаны различные способы ослабления дисперсионных и нелинейных искажений, в т.ч. методы электронной компенсации дисперсии и новые форматы модуляции. Рассмотрены общие подходы к описанию качества волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Показана возможность создания новых способов борьбы с деградацией оптических систем связи. Описан построенный на основе анализа вышеуказанных литературных сведений алгоритм, с помощью которого были получены основные результаты диссертационной работы.

Вторая глава

В данной главе изучалось совместное воздействие хроматической дисперсии и нелинейных эффектов на различные форматы модуляции, такие как NRZ, RZ, CS-RZ, PSBT, 4-ary ASK, AMI при скорости передачи в ВОЛС, равной 40 Гбит/с. Источником оптического излучения служил идеальный источник с внешней модуляцией. В качестве параметра, характеризующего

устойчивость системы к воздействию ПМД, был выбран коэффициент ошибок BER, который вычислялся по приближенной формуле, рекомендованной международным стандартом МСЭ-Т O.201:

$$BER(Q) = e^{-\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2} \times \frac{a_0 + a_1 \frac{Q}{\sqrt{2}} + a_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left[b_0 + b_1 \frac{Q}{\sqrt{2}} + b_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2 + b_3 \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^3 \right] \sqrt{\pi}}, \quad (2.1)$$

где $a_0 = 1,69071595$, $a_1 = 1,45117156$, $a_2 = 0,5000323$, $b_0 = 1,90764542$, $b_1 = 3,7948594$, $b_2 = 2,90845448$, $b_3 = 1$, Q – фактор качества оптического сигнала:

$$Q = \sqrt{\frac{OSNR}{\frac{1 + ER^2}{1 - ER^2} \times \frac{B_e}{B_o}}}, \quad (2.2)$$

где B_e – ширина полосы пропускания приемника для электрического сигнала, B_o – ширина полосы оптического анализатора спектра, $ER = P_1 / P_0$ – коэффициент гашения, P_1 и P_0 – мощности сигнала, соответствующего логической единице и логическому нулю (или любым другим соседним логическим значениям в случае многоуровневого формата) в середине битового интервала. В проводимых численных экспериментах B_e / B_o соответствовало отношению полосы пропускания оптического фильтра на входе приемника к скорости передачи информации (40 Гбит/с).

Было показано, что системы связи, использующие различные форматы модуляции, в разной степени подвержены деградации, возникающей из-за межсимвольных помех и увеличения шумов на приемнике при росте его полосы пропускания (рис 2.1).

Для каждого формата было найдено оптимальное значения ширины полосы пропускания приемника, при котором достигается максимальная дальность передачи при коэффициенте хроматической дисперсии 17 пс/нм/км и $BER < 10^{-9}$. Показано, что форматы PSBT, AMI и 4-агу ASK позволяют сузить полосу пропускания приемника на максимальной для формата NRZ дальности передачи соответственно на 24%, 40% и 60% по сравнению с NRZ.

Максимальная дальность передачи в системах, работающих со скоростью 40 Гбит/с, была достигнута при использовании формата с чередованием полярности (при $BER < 10^{-9}$). По сравнению с NRZ-кодированием она была увеличена в 3,5 раза. Форматы 4-агу ASK и PSBT также показали большую устойчивость к хроматической дисперсии, чем NRZ: с их помощью дальность передачи была повышена соответственно в 2,5 и 1,8 раза.

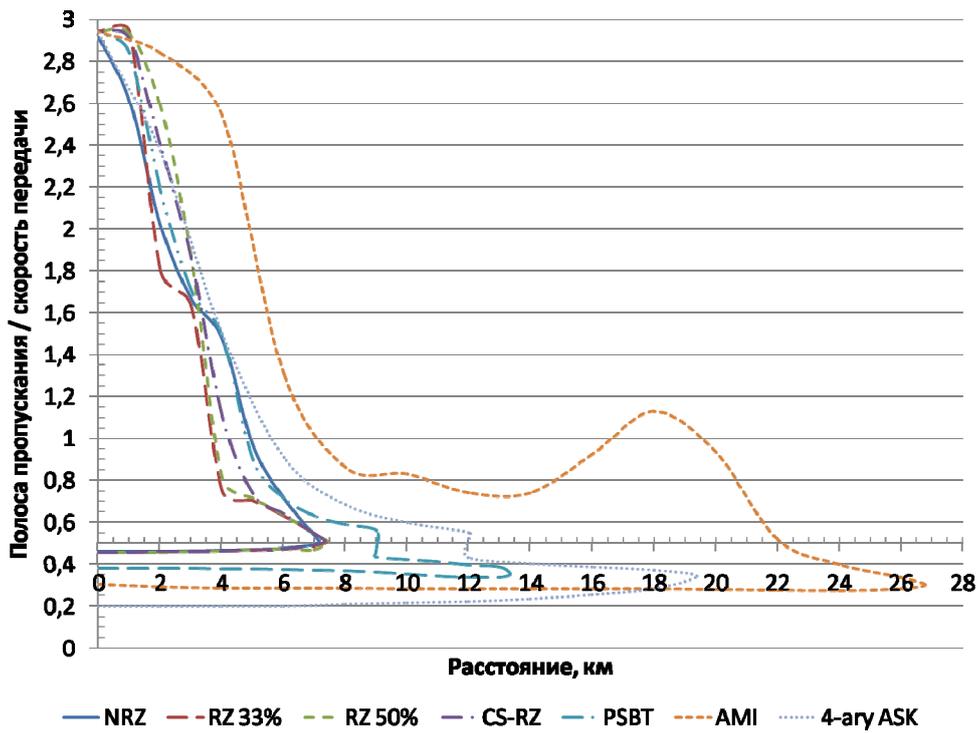


Рис. 2.1. Зависимость ширины полосы пропускания приемника от длины волокна для различных форматов модуляции.

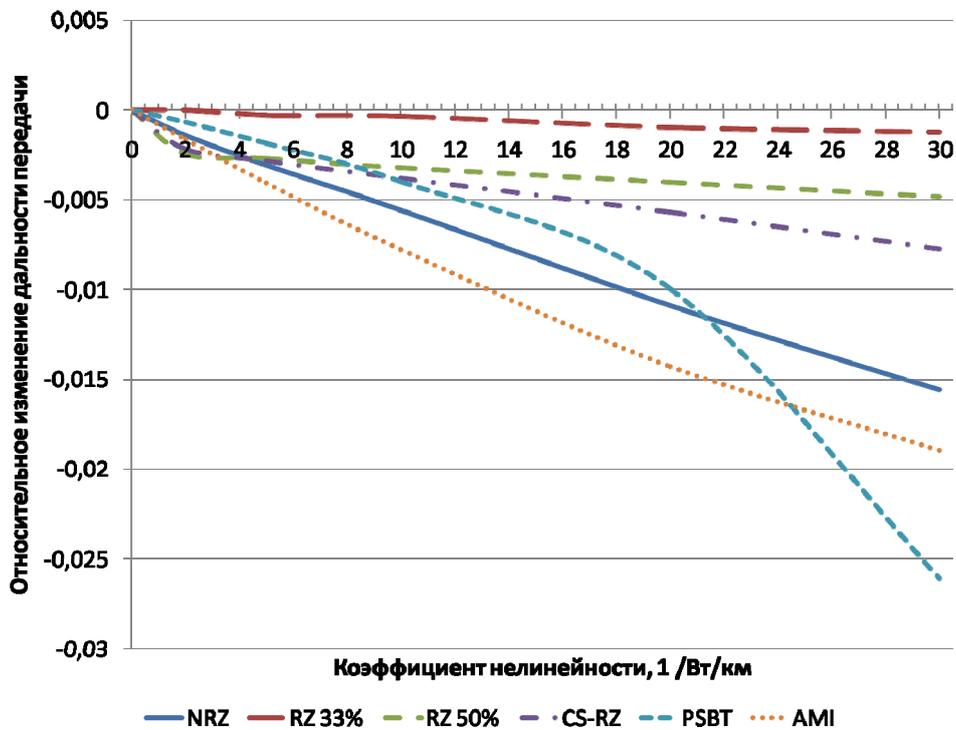


Рис. 2.2. Зависимость изменения дальности передачи от коэффициента нелинейности для различных форматов модуляции.

Было показано, что дальность передачи в системах со скоростью 40 Гбит/с при использовании большинства бинарных форматов при постоянной хроматической дисперсии 17 пс/нм/км уменьшается практически линейно с увеличением коэффициента нелинейности (рис.2.2). Среди них наибольшую устойчивость к нелинейным эффектам показал RZ код с рабочим циклом 33%: при росте коэффициента нелинейности от 0 до 30 Вт⁻¹км⁻¹ максимальная дальность передачи сократилась всего на 0,1%.

Третья глава

В данной главе изучалась устойчивость различных форматов модуляции к влиянию ПМД. Критерием качества линии связи служил коэффициент ошибок BER.

С помощью численных экспериментов было показано, что для получения системы связи с допустимым уровнем качества ($BER < 10^{-9}$), необходимо чтобы ширина полосы пропускания приемника лежала в диапазоне 0,5 – 1,2 скорости передачи (рис. 3.1). Было показано, что амплитудно-фазовый формат с чередованием полярности, а также 4-уровневый формат 4-ary ASK позволяют расширить этот диапазон, сдвинув его нижнюю границу соответственно до 0,35 и до 0,2 скорости передачи, что при прочих равных условиях позволяет использовать для этих форматов приемники с меньшей шириной полосы пропускания. Для всех вышеописанных форматов найдены оптимальные значения ширины полосы пропускания приемника, при которых достигается максимальная дальность передачи.

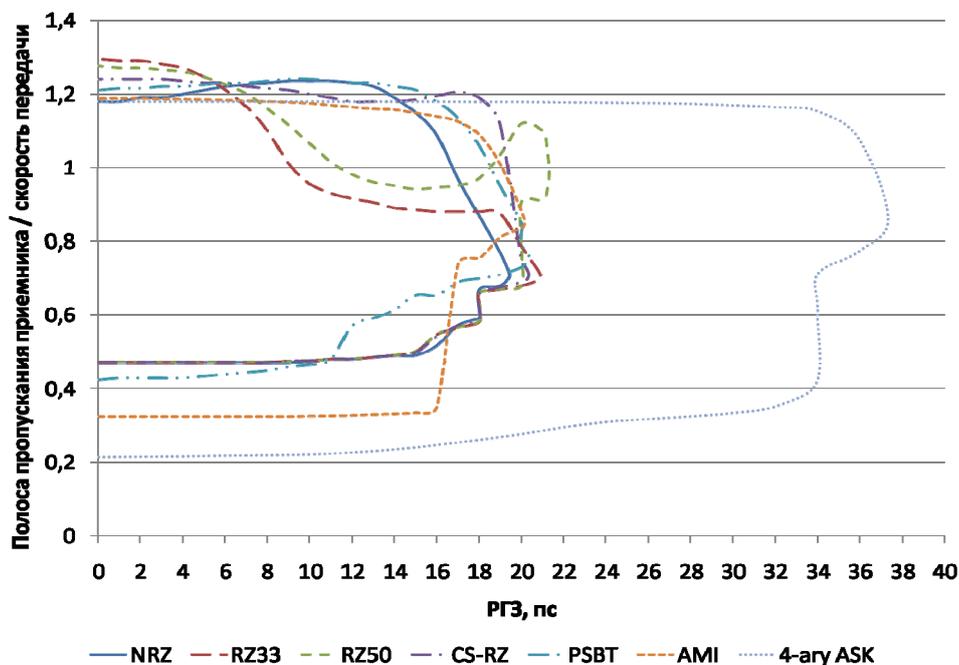


Рис. 3.1. Зависимость ширины полосы пропускания приемника от длины волокна для различных форматов модуляции.

Было показано, что существенно более устойчивым к ПМД является формат 4-ary ASK. При прочих равных условиях он позволяет увеличить дальность передачи почти в 2 раза по сравнению с NRZ практически при любой ширине полосы пропускания приемника. Максимальная допустимая РГЗ (при $BER < 10^{-9}$) среди других вышеописанных кодов была достигнута при использовании формата RZ с рабочим циклом 50%, но увеличение дальности по сравнению с ними составило не более 0,5%.

Четвертая глава

Глава посвящена волоконно-оптическим системам связи на основе полупроводниковых лазеров с прямой модуляцией (DML). Было проведено численное исследование зависимости качества линии связи от параметров и тока накачки DML. Все параметры варьировались в небольшом диапазоне, вблизи значений, присущих реальным передатчикам, используемым в волоконно-оптических системах связи. В качестве критерия качества линии использовался коэффициент ошибок BER, вычисляемый по формуле (2.1) для длины волокна 30 км и оптического отношения сигнал-шум, равного 20 дБ.

Было предложено несколько способов повышения качества таких систем. Было показано, что можно уменьшить динамический (переходной) чирп путем сокращения разности сил тока между двумя логическими значениями сигнала накачки, путем уменьшения параметра ограниченности полости резонатора, уменьшения фактора уширения, увеличения параметра нелинейного насыщения. При сохранении глубины модуляции уменьшение переходного чирпа приводит к увеличению дальности передачи. Показано также, что существует оптимальная разность сил тока между двумя логическими значениями сигнала накачки, а также оптимальное значение фактора ограниченности полости резонатора, при которых система на основе лазера с прямой модуляцией при прочих равных условиях обладает максимальным качеством.

Было показано, что передатчики на основе лазеров с прямой модуляцией при использовании структурированной накачки обеспечивают существенное повышение качества систем связи со скоростью 10 Гбит/с при оптимизации параметров приемника и структуры сигнала накачки. Найдены условия, при которых дальность передачи с применением таких передатчиков увеличивается на 70% по сравнению с системами, использующими стандартные передатчики на основе лазеров с прямой модуляцией.

Были найдены параметры лазера с прямой модуляцией, при которых в передатчике на его основе реализуется формат кодирования, обеспечивающий деструктивную интерференцию между логическими единицами, разделенными логическим нулем. Показано, что этот формат в 2 раза более устойчив, а при использовании специального оптического фильтра в 5 раз более устойчив к хроматической дисперсии, чем NRZ формат. Схема реализации такой системы

с оптическим фильтром показана на рис. 4.1. Рис. 4.2. иллюстрирует зависимость мощности до и после фильтра, частоты и фазы сигнала на выходе CML-лазера от времени.

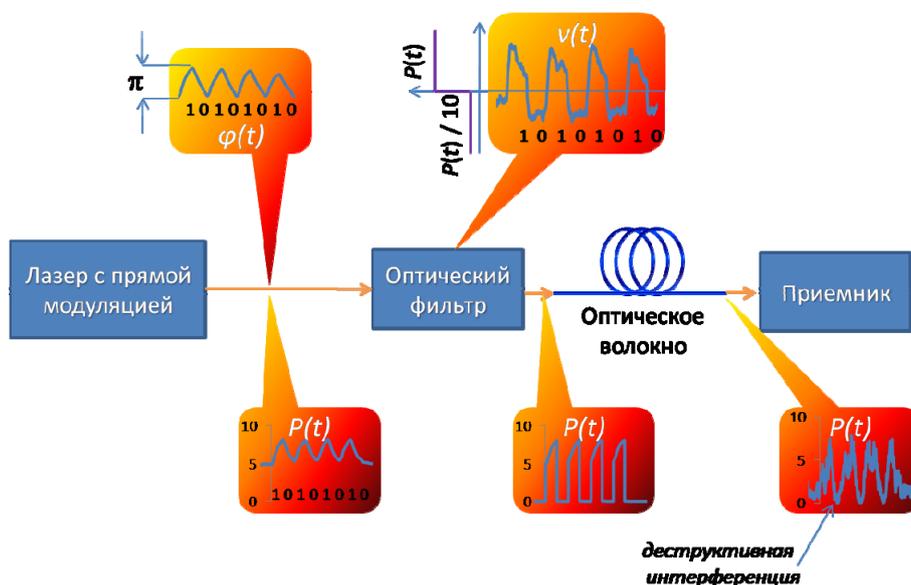


Рис. 4.1. Схема реализации формата кодирования, обеспечивающего деструктивную интерференция между логическими единицами, разделенными логическим нулем.

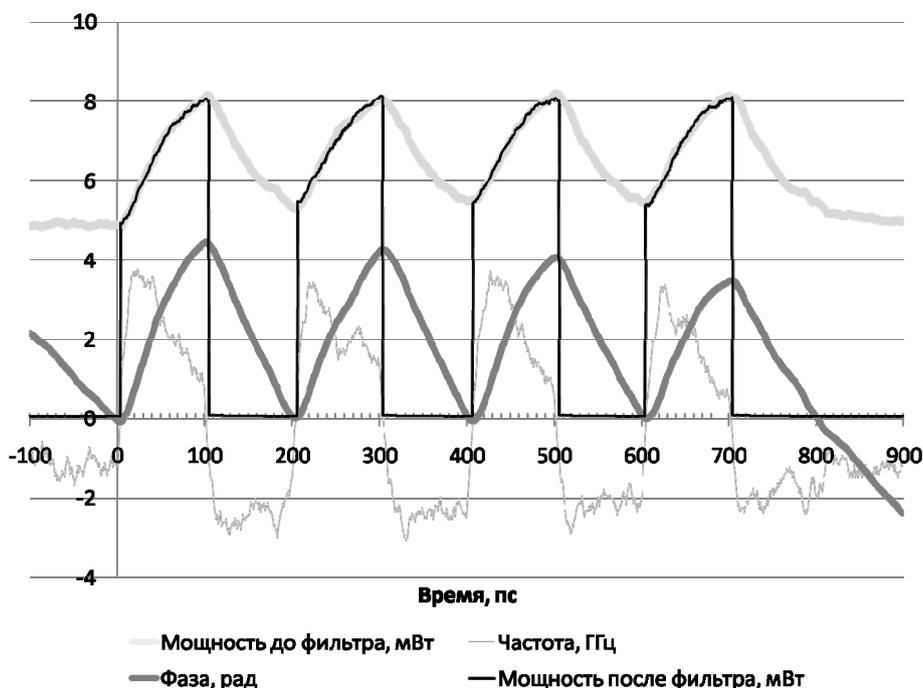


Рис. 4.2. Временная зависимость мощности до и после фильтра, частоты и фазы сигнала на выходе системы, реализующей формат с деструктивной интерференцией. Сила тока логического нуля равна 40 мА, логической единицы – 60 мА. NRZ-последовательность 10101010

Пятая глава

В данной главе представлен и численно исследован новый способ электронной компенсации дисперсии (ЭКД) – метод «временной линзы», схема реализации которого показана на рис.5.1. Оптический сигнал после амплитудной модуляции попадал в первый отрезок оптического волокна длины L_1 , в котором на него действовали дисперсионные и нелинейные эффекты. Далее, после преобразования в фазовом модуляторе, фаза сигнала приобретала дополнительный набег $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \alpha(t - t_{mid})^2, \quad (5.1)$$

где t_{mid} – время в середине передаваемой битовой последовательности, α – параметр модуляции. Затем сигнал проходил еще один отрезок волокна длиной L_2 и попадал на приемник.

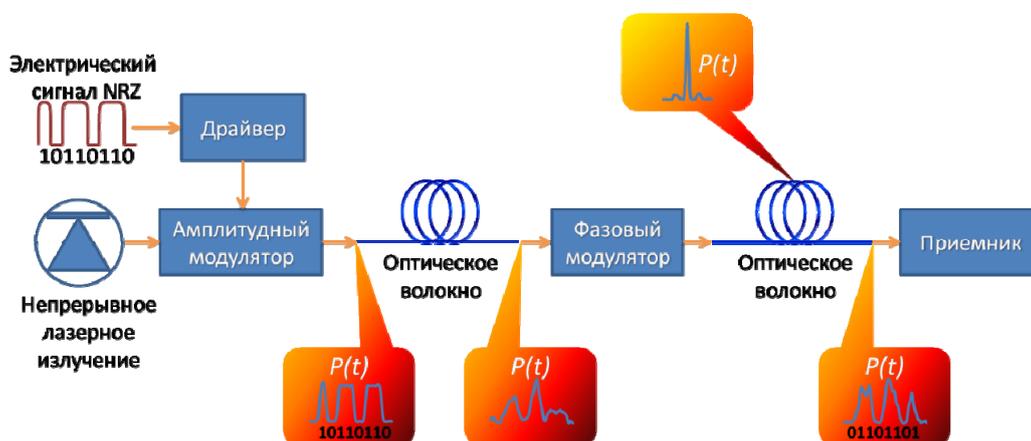


Рис. 5.1. Схема реализации метода «временной линзы»

Метод «временной линзы» основан на симметричности волнового уравнения по пространственной и временной координатам. Сигнал, искаженный под действием хроматической дисперсии, в результате фазовой модуляции сначала сжимается, и его мощность фокусируется в центре временного интервала, соответствующего всей битовой последовательности. Затем сигнал расширяется, и на расстоянии L_2 при заданном параметре α напоминает по форме входной сигнал, но оказывается симметрично отраженным относительно центра (т.е. инвертированным).

Было показано, что максимальная мощность сигнала существенно увеличивается на определенном расстоянии во втором участке волокна (на фокусном расстоянии «временной линзы»).

В результате численного моделирования была построена зависимость BER в волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) от расстояния для разных значений параметра α (рис. 5.2). Установлено, что подбором α можно управлять дальностью и/или скоростью передачи информации.

Исследована зависимость качества линии связи на основе «временной линзы» от параметра фазовой модуляции α при различных значениях полосы пропускания приемника. Показано, что минимум BER для всех α лежит в окрестности полосы приемника, равной 0,8 скорости передачи.

Показана возможность реализации динамической фазовой модуляции (для этого в схеме на рис.5.1 достаточно добавить модуль драйвера, который будет управлять фазовым модулятором), что позволит использовать метод «временной линзы» в современных реконфигурируемых оптических сетях связи.

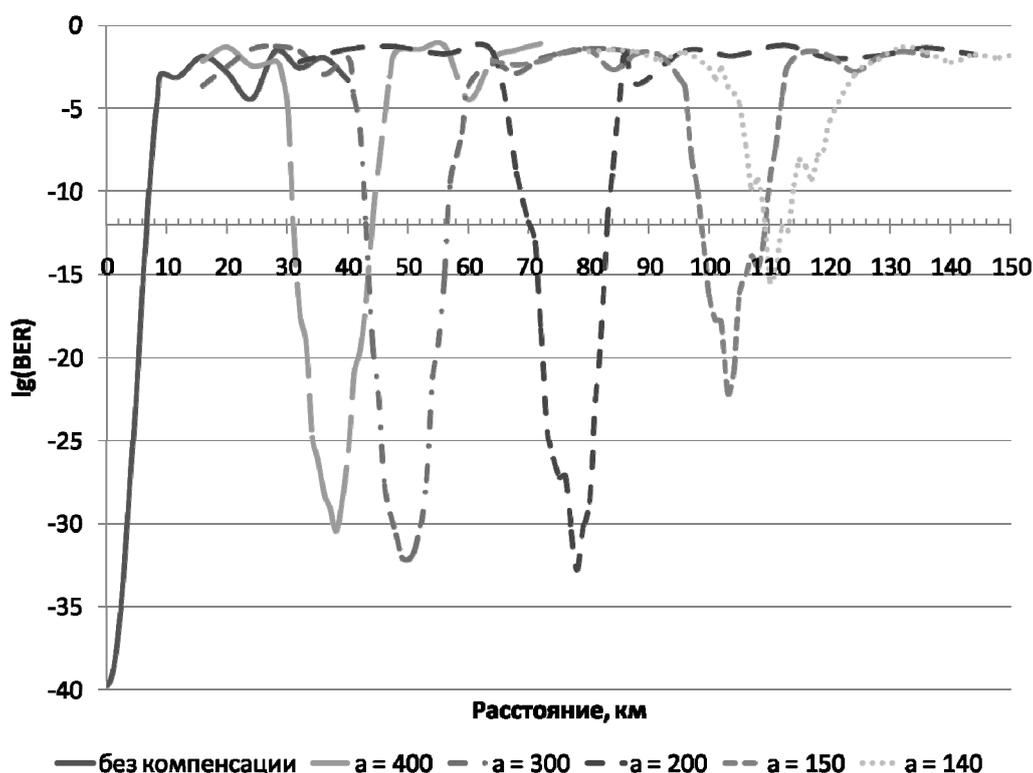


Рис. 5.2. Зависимость BER от расстояния для разных значений параметра фазовой модуляции α ; $L_1 = L_2$, скорость передачи 40 Гбит/с, в линии только хроматическая дисперсия, отношение сигнал-шум 20 дБ.

Показано, что «временная линза» близка к линейной компенсации по устойчивости к нелинейным эффектам, а при коэффициенте нелинейности, большем $25 \text{ Вт}^{-1} \text{ км}^{-1}$, качество ВОЛС на основе «временной линзы» выше, чем при линейной компенсации дисперсии (при $\text{BER} > 10^{-12}$). При этом вместо компенсирующего дисперсию волокна применяется более дешевое стандартное телекоммуникационное волокно и сохраняется возможность динамической компенсации дисперсии и нелинейных эффектов.

Установлено, что с помощью метода «временной линзы» можно передавать информацию при скорости 40 Гбит/с на расстояние порядка 110 км без дополнительных компенсирующих дисперсию модулей.

Шестая глава

Предложен и численно исследован принципиально новый способ формирования амплитудно-модулированного сигнала на выходе волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) из непрерывного фазомодулированного излучения (ФАМС/НФМИ). Его схема показана на рис. 6.1.

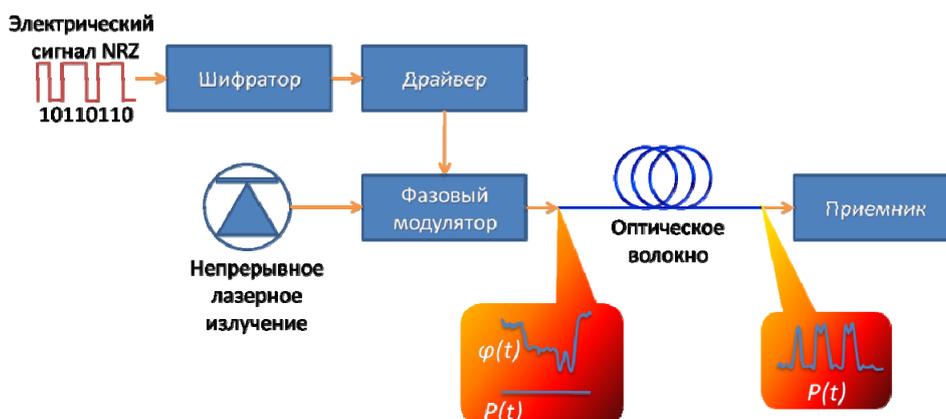


Рис. 6.1. Схема электронной компенсации дисперсии методом ФАМС/НФМИ

Представлен итерационный метод решения задачи нахождения вида фазовой модуляции $\varphi(t)$ непрерывного лазерного излучения, которая обеспечивает формирование нужного амплитудно-модулированного сигнала на выходе волоконно-оптической линии (рис. 6.2).

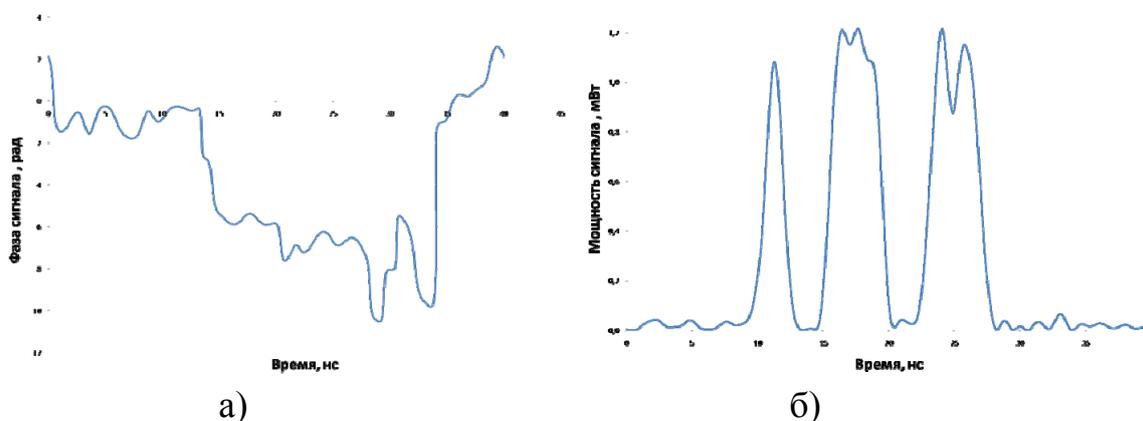


Рис. 6.2. а) Распределение фазы $\varphi(t)$ непрерывного лазерного излучения на входе в волокно. б) Зависимость мощности сигнала от времени на выходе волокна. Бинарная последовательность 10110110. Скорость передачи 40 Гбит/с, формат модуляции NRZ, длина волокна 1000 км

Была показана возможность передачи информации при скорости 40 Гбит/с с помощью ФАМС/НФМИ на расстояние более 1700 км с коэффициентом ошибок, не превышающим 10^{-12} .

Было проведено сравнение ЭКД методом ФАМС/НФМИ и линейной компенсации дисперсии при различных значениях мощности входного излучения и длины ВОЛС. Были найдены расстояния, в окрестности которых

при прочих равных условиях компенсация дисперсии и нелинейных эффектов методом ФАМС/НФМИ оказывается более эффективной (например, 600 км, 1100 км и 1700 км при скорости передачи 40 Гбит/с).

Выводы

1. Показано, что передатчики на основе лазеров с прямой модуляцией при использовании структурированной накачки обеспечивают существенное повышение качества систем связи со скоростью 10 Гбит/с при оптимизации параметров приемника и структуры сигнала накачки. Найдены условия, при которых дальность передачи с применением таких передатчиков увеличивается на 70% по сравнению с системами, использующими стандартные передатчики на основе лазеров с прямой модуляцией.

2. Найдены параметры лазера с прямой модуляцией, при которых в передатчике на его основе реализуется формат кодирования, обеспечивающий деструктивную интерференцию между логическими единицами, разделенными логическим нулем. Показано, что этот формат в 2 раза более устойчив, а при использовании специального оптического фильтра в 5 раз более устойчив к хроматической дисперсии, чем стандартный бинарный формат.

3. Исследование устойчивости различных бинарных форматов модуляции, а также псевдо трехуровневого формата PSBT к поляризационной модовой дисперсии при скорости передачи 40 Гбит/с показало, что для получения системы связи с допустимым уровнем качества ($BER < 10^{-9}$), необходимо чтобы ширина полосы пропускания приемника лежала в диапазоне 0,5 – 1,2 скорости передачи. Показано, что амплитудно-фазовый формат с чередованием полярности, а также 4-уровневый формат 4-ary ASK позволяют расширить этот диапазон, сдвинув его нижнюю границу соответственно до 0,35 и до 0,2 скорости передачи, что при прочих равных условиях позволяет использовать для этих форматов приемники с меньшей шириной полосы пропускания. Для всех вышеописанных форматов найдены оптимальные значения ширины полосы пропускания приемника, при которых достигается максимальная РГЗ.

4. Показано, что многоуровневые форматы более устойчивы к ПМД, чем бинарные. При прочих равных условиях формат 4-ary ASK позволяет увеличить допустимую РГЗ почти в 2 раза по сравнению с NRZ практически при любой ширине полосы пропускания приемника. Максимальная допустимая РГЗ (при $BER < 10^{-9}$) среди других бинарных форматов была достигнута при использовании формата RZ с рабочим циклом 50%, но увеличение допустимой РГЗ по сравнению с ними составило не более 0,5%.

5. Исследование устойчивости различных форматов модуляции к влиянию хроматической дисперсии в ВОЛС со скоростью 40 Гбит/с показало, что системы связи, использующие различные форматы модуляции, в разной

степени подвержены деградации, возникающей из-за межсимвольных помех и увеличения шумов на приемнике при росте его полосы пропускания.

Показано, что форматы PSBT, AMI и 4-ary ASK позволяют сузить полосу пропускания приемника при прочих равных условиях соответственно на 24%, 40% и 60% по сравнению с NRZ.

Для каждого формата найдено оптимальное значения ширины полосы пропускания приемника, при котором достигается максимальная дальность передачи при коэффициенте хроматической дисперсии 17 пс/нм/км.

6. Максимальная дальность передачи в системах, работающих со скоростью 40 Гбит/с, была достигнута при использовании формата с чередованием полярности (при BER < 10^{-9}). По сравнению с NRZ-кодированием она увеличивается в 3,5 раза. Форматы 4-ary ASK и PSBT также показали большую устойчивость к хроматической дисперсии, чем NRZ: с их помощью дальность передачи повышается соответственно в 2,5 и 1,8 раза.

7. Исследование устойчивости различных форматов к нелинейным эффектам показало, что дальность передачи в системах со скоростью 40 Гбит/с при использовании большинства бинарных форматов при постоянной хроматической дисперсии 17 пс/нм/км уменьшается практически линейно с увеличением коэффициента нелинейности. Среди них наибольшую устойчивость к нелинейным эффектам показал RZ код с рабочим циклом 33%: при росте коэффициента нелинейности от 0 до $30 \text{ Вт}^{-1} \text{ км}^{-1}$ максимальная дальность передачи сокращается всего на 0,1%.

8. Предложен новый способ электронной компенсации дисперсии (ЭКД), заключающийся в том, что амплитудно-модулированный сигнал приобретает с помощью установленного на некотором расстоянии в волокне модулятора дополнительную фазовую модуляцию, в результате чего на выходе волокна формируется инвертированный сигнал. Метод ЭКД получил название «временной линзы» по причине аналогии с обычной линзой, возникающей из-за симметричности волнового уравнения по пространственной и временной координатам. Установлена возможность с его помощью передавать информацию при скорости 40 Гбит/с на расстояние, превышающее 110 км, без использования компенсирующей дисперсию волокна, в том числе в реконфигурируемых сетях.

9. Впервые предложен способ формирования амплитудно-модулированного сигнала на выходе волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) из непрерывного фазомодулированного излучения (ФАМС/НФМИ). Описана одна из возможных схем реализации ФАМС/НФМИ. Метод ФАМС/НФМИ предложено использовать для передачи информации. Продемонстрирована возможность передачи информации на расстояние более 1700 км при скорости 40 Гбит/с и BER, не превышающим 10^{-12} .

Публикации по теме диссертации

1. М.А. Величко, О.Е. Наний. Многоуровневая модуляция в сетях доступа. // Электросвязь, 2007, №12, сс. 36-39.
2. М.А. Величко. ROADM: опция или необходимость? // Lightwave Russian edition, 2007, №2, сс. 28-29.
3. М.А. Величко. Электронные методы компенсации дисперсии в оптических линиях связи. // Lightwave Russian edition, 2007, №1, сс. 20-23.
4. М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян. Новые форматы модуляции в оптических системах связи. // Lightwave Russian edition, 2005, №4, сс. 21-30.
5. К. Н. Белов, О. Е. Наний, Д. Д. Щербаткин, М. А. Величко. Повышение качества информационных сигналов в оптических передатчиках на основе лазеров с прямой модуляцией. // Вестник МГУ. Физика. Астрономия, 2005, №4, с 40.
6. М.А. Величко, А.А. Сусьян. Двойной фазомодулированный бинарный формат. // Lightwave Russian edition, 2004, №4, сс. 26-29.
7. О.Е. Наний, М.А. Величко, Е.Г. Павлова. Принципы оптимизации оптических систем связи //Труды МТУСИ, том 1, Москва, 2008, сс. 410-415.
8. М.А. Величко, В.Г. Волков, О.Е. Наний, Е.Г. Павлова. Новый способ модуляции в волоконно-оптических линиях связи // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», Казань, 2008, сс.231-232.
9. М.А. Величко, В.Г. Волков, О.Е. Наний, Е.Г. Павлова. Ослабление нелинейных искажений при передаче данных по волоконно-оптическим линиям связи // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», Казань, 2008, сс. 46-47.
10. М.А. Величко, О.Е. Наний, Е.Г. Павлова. Влияние поляризационной модовой дисперсии на работу высокоскоростных систем дальней связи. // Материалы 8 Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» и 5 Международной научно-технической конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», Уфа, 2007, сс.257-258.
11. М.А. Величко, О.Е. Наний. Оптимизация гибридных методов компенсации дисперсии. // Фотон-Экспресс, 2007, спец. Выпуск, труды Всероссийской конференции по волоконной оптике, сс. 24-25.
12. М.А. Velichko, О.Е. Nanii. Increase of transmission speed in access networks using 4-ary. // Тезисы докладов международной конференции «Сучасні проблеми і досягнення в галузі задиотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій.», Запорожье, 2006, сс. 37-41.
13. М.А. Величко, О.Е. Наний. Электронные методы компенсации дисперсии в оптических линиях связи. // Труды 1-ой Всероссийской молодежной

- научной школы "Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение", г. Саранск, 139-144 (2006).
14. O.E. Nanii, M.A. Velichko. Optimal electronic and optical compensation of dispersion and nonlinear distortions in fiber optic networks. // International Conference Laser and Laser-information technologies: fundamental problems and Applications, ILLA 2006, p83.
 15. Maxim A. Velichko, Oleg E. Nanii. Increase of Transmission Speed in Access Networks Using 4-ary ASK Directly Modulated Lasers. // Proceedings of 8th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, LFNM-2006, Kharkiv, Ukraine, July, 2006, pp. 202-205.
 16. M.A. Velichko. The Use of 4-ary ASK Coding in Directly Modulated Lasers to Increase Transmission Speed in Access Networks. // Proceedings of International Conference Laser Optics, LO-2006, paper TuR3-04.

Подписано к печати 18.05.09

Тираж 100 Заказ 83

Отпечатано в отделе оперативной печати
физического факультета МГУ