УДК 621.391.63

Поляков А.И.

студент группы ИКМ-42з

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

(г. Санкт-Петербург, Россия)

ХРОМАТИЧЕСКАЯ ДИСПЕРСИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ И МЕТОДЫ ЕЕ КОМПЕНСАЦИИ

Аннотация: *в данной работе рассматривается явление хроматической дисперсии в оптических волокнах. Хроматическая дисперсия остается одним из ключевых ограничивающих факторов при увеличении скорости и дальности передачи в волоконно-оптических системах связи. В работе систематизированы физические механизмы формирования материальной и волноводной составляющих хроматической дисперсии. Систематизированы пассивные (DCF, чирпированные FBG, фотонно-кристаллические волокна) и активные (цифровая обработка сигнала в когерентных приемниках, электронная компенсация) методы. На основе сравнительного анализа, включающего данные имитационного моделирования в OptiSystem и результаты российских исследователей, сформулированы критерии выбора компенсатора для различных сценариев — от энергетического приема до когерентных систем 100G и выше. Показано, что российские разработки в области FBG-компенсаторов и цифровой обработки сигнала (в частности, транспондер «Волга» компании Т8) обеспечивают уровень компенсации до 75 000 пс/нм, что выводит отечественные решения на мировой уровень.*

Ключевые слова: *хроматическая дисперсия, компенсация, дисперсионно-компенсирующее волокно, волоконная брэгговская решетка, фотонно-кристаллическое волокно, цифровая обработка сигнала, когерентный прием.*

Хроматическая дисперсия (ХД) на протяжении десятилетий остается одним из фундаментальных ограничений, определяющих длину регенерационного участка и пропускную способность волоконно-оптических систем связи (ВОСС). В отличие от затухания, которое может быть скомпенсировано оптическим усилением, ХД приводит к уширению спектрально-ограниченных импульсов и межсимвольной интерференции (ISI), подавление которой требует целенаправленного воздействия на фазовые соотношения между спектральными компонентами сигнала.

Цель настоящей работы — комплексное изучение физических основ ХД, представление систематизированного обзора методов компенсации ХД в оптических волокнах, опираясь на результаты исследователей, и дополнить его аналитическими соотношениями и сравнительными таблицами, которые могут быть полезны при проектировании ВОСС.

Хроматическая дисперсия в одномодовом волокне представляет собой суперпозицию материальной и волноводной составляющих. Материальная дисперсия обусловлена частотной зависимостью показателя преломления кварцевого стекла, волноводная — зависимостью эффективного показателя преломления моды от геометрии профиля сердцевины и оболочки. В многомодовых волокнах к ХД добавляется модовая дисперсия, однако в магистральных ВОСС используется одномодовый режим, где доминируют именно два указанных вклада.

Количественно ХД описывается коэффициентом дисперсии D, измеряемым в пс/(нм·км). Для стандартного одномодового волокна (SSMF) в окне 1550 нм типичное значение D составляет около +17 пс/(нм·км). Накопленная дисперсия линейного тракта определяется произведением коэффициента D на ширину спектра источника $\Delta\lambda$ и длину волокна L.

Дисперсионное уширение гауссовского импульса с начальной полушириной T_0 на расстоянии z описывается выражением:

$$T(z) = T0\sqrt{1 + \left(\frac{z}{LD}\right)^2}, L_D = {T_0}^2/|\beta_2$$

где $\beta 2 = -{\lambda_0}^2 D/(2\pi c)$ – дисперсия групповых скоростей,

λ_0 – длина волны излучения.

В пределах больших z уширение растет линейно:

$$\Delta t(z) \approx| D_x | \Delta\lambda z.$$

Принципиально важной характеристикой является наклон дисперсии $S=dD/d\lambda$. Компенсация только нулевой дисперсии без учета наклона приводит к остаточной дисперсии в спектральных каналах DWDM-системы, удаленных от точки компенсации. Именно поэтому требование одновременной компенсации D и S стало стандартом для пассивных компенсаторов. Зависимость $D(\lambda)$ вблизи референсной длины волны λ_0 (обычно 1550 нм) аппроксимируется линейно:

$$D_x(\lambda) = D_x(\lambda 0) + S_x(\lambda 0) \cdot (\lambda - \lambda 0).$$

Для полной компенсации ХД компенсирующее волокно должно удовлетворять условию согласования отношения дисперсии к наклону:

$$S_x/D_x = S_{xc}/D_{xc},$$

а знаки D и S у линии и компенсатора должны быть противоположными.

Длина компенсирующего волокна Lc, обеспечивающая полную компенсацию на длине волны λ, определяется как:

$$Lc = \frac{[Dx(\lambda 0) + Sx(\lambda 0)(\lambda - \lambda 0)]L}{-[Dxc(\lambda 0) + Sxc(\lambda 0)(\lambda - \lambda 0)]}.$$

Волокна с компенсацией дисперсии (DCF). Волокно с компенсацией дисперсии представляет собой специально спрофицированное одномодовое волокно с сильной отрицательной дисперсией, обычно в диапазоне от -80 до -150 пс/(нм·км) и ниже. Компенсация достигается за счет того, что длина DCF выбирается значительно меньшей, чем длина компенсируемого участка линии: типичное отношение длин составляет 1:5–1:8. В работах школы Бонч-Бруевича показано, что для полной компенсации ХД выбранное DCF должно удовлетворять условию согласования RDS, а его длина рассчитывается по приведенной выше формуле. Основным преимуществом DCF является широкополосность: один отрезок волокна компенсирует дисперсию в диапазоне C+L при условии согласования наклона. К недостаткам относятся высокие вносимые потери (требующие дополнительного усиления), значительная нелинейность из-за малой эффективной площади моды, а также громоздкость катушек, что затрудняет масштабирование в плотных WDM-системах.

Волоконные брэгговские решетки (FBG). FBG формируется в сердцевине волокна как периодическая модуляция показателя преломления. Брэгговская длина волны определяется соотношением $2n_{eff}\Lambda=\lambda_{Br}$, где n_{eff} - эффективный показатель преломления основной моды, Λ - период решетки. Чирпированная (линейно- или нелинейно-аподизованная) решетка обеспечивает длину волны брэгговского отражения, линейно зависящую от продольной координаты, что эквивалентно отрицательной дисперсии в отражении. Аподизация профиля связи подавляет боковые лепестки в спектре отражения и снижает пульсации

групповой задержки. В работе М. М. Кубинской (СПбГУТ) на основе имитационного моделирования в OptiSystem показано, что компенсация с применением FBG-DCM обеспечивает меньшие дополнительные потери по сравнению с DCF, однако DCF значительно эффективнее и пригодна для использования в более широком диапазоне длин волн. Увеличение чирпинга FBG до Δ=0,15 нм позволяет уменьшить потери в решетке до α_{FBG} =0,36 дБ, а до Δ=0,165 нм — сократить длительность импульса до t_u=0,28 бит.

Фотонно-кристаллические волокна (PCF). Фотонно-кристаллические волокна предоставляют дополнительную степень свободы в управлении дисперсией за счет варьирования геометрии воздушных отверстий в оболочке. В российских исследованиях, выполняемых в МГТУ им. Н. Э. Баумана и ИТМО, показано, что PCF с аномальной дисперсией групповой скорости могут использоваться в качестве компенсаторов, а введение газа в полые каналы позволяет перестраивать дисперсию за счет изменения давления. Для телекоммуникационных приложений разработаны конфигурации PCF с отрицательной дисперсией порядка -377 пс/(нм·км) на длине волны 1,55 мкм, что делает их перспективными для широкополосной компенсации в диапазонах E+S+C+L+U. Основным ограничением PCF остается сложность изготовления и воспроизводимость параметров, что сдерживает их широкое внедрение в магистральных линиях.

Активные и цифровые методы. Цифровая обработка сигнала в когерентных приемниках (DSP). появлением когерентного приема и быстродействующих АЦП стало возможным перенести компенсацию ХД в электрическую область. В когерентном приемнике цифровой фильтр с обратной передаточной функцией волокна восстанавливает комплексную огибающую сигнала, устраняя накопленную дисперсию без каких-либо оптических компонентов в линии. В работах сотрудников СПбГУТ и МГУ показано, что сохранение полной информации о комплексной огибающей оптического поля в электрическом сигнале позволяет компенсировать ХД при цифровой обработке в приемнике. Это решение радикально упрощает инфраструктуру и обеспечивает

адаптивность к изменяющимся условиям, однако требует значительных вычислительных ресурсов, а эффективность ограничивается отношением сигнал/шум и нелинейными искажениями.

Российская компания Т8 разработала 100-гигабитный транспондер «Волга» с рекордно большим значением электронной компенсации дисперсии — 75 000 пс/нм, что позволяет передавать сигнал на расстояние до 4000 км без оптических компенсаторов в линии. Программный модуль компенсации ХД, зарегистрированный ООО «НПП «Когерентные Системы», реализует компенсацию путем перехода в частотную область с помощью прямого быстрого преобразования Фурье, фильтрации и обратного преобразования, что иллюстрирует зрелость отечественных DSP-решений.

Для систематизации методов компенсации ХД ниже приведены две таблицы. Таблица 1 обобщает ключевые характеристики пассивных компенсаторов, а Таблица 2 — их сравнительную эффективность по данным российских исследований.

Таблица 1. Характеристики пассивных методов компенсации ХД.

Параметр	**DCF**	**Чирпированная FBG**	**PCF**
Типичная дисперсия	-80…-150 пс/(нм·км)	Эквивалентная отрицательная	До -377 пс/(нм·км)
Полоса компенсации	Широкая (C+L)	Узкая, требует каскадирования	Широкая (E+S+C+L+U)
Вносимые потери	Высокие (требуют усиления)	Низкие (0,36 дБ при Δ=0,15Δ=0,15 нм)	Средние
Согласование наклона	Возможно при RDS-подборе	Ограничено, требует профилирования чирпа	Возможно при вариации геометрии
Основное ограничение	Нелинейность, громоздкость	Узкополосность, чувствительность к температуре	Сложность изготовления

Таблица 2. Сравнительная эффективность DCF и FBG
(по данным имитационного моделирования).

Критерий	**DCF**	**FBG-DCM**
Дополнительные потери	Выше	Ниже
Широта диапазона компенсации	Шире	Уже
Эффективность компенсации	Выше	Ниже
Пригодность для DWDM	Высокая	Требует каскадирования
Технологическая зрелость	Высокая	Высокая

Гибридные схемы, объединяющие DCF и FBG, позволяют сочетать широкополосность первого с точностью настройки второго и снизить остаточную дисперсию в многоканальных системах. В работе Малахова, Раевского и Бугрова (2020) предложен метод многофункционального синтеза компенсатора на неоднородной брэгговской решетке с использованием нелинейного математического программирования, обеспечивающий заданную форму дисперсионной характеристики и высокий коэффициент отражения в полосе компенсации.

Выбор метода определяется совокупностью факторов. Для линий с прямым детектированием и скоростями до 10 Гбит/с экономически оправданы DCF и FBG. Для когерентных систем 100G и выше базовым решением становится DSP-компенсация, однако при использовании высокопорядковых форматов модуляции и в линиях с ограниченным бюджетом мощности гибридные оптико-цифровые схемы обеспечивают выигрыш по BER на несколько порядков. В DWDM-системах с большим числом каналов критическим становится согласование наклона дисперсии, что благоприятствует PCF и каскадным FBG с профилированным чирпом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кубинская М.М. Сравнение эффективности компенсации хроматической дисперсии в одномодовых оптических волокнах с помощью специальных волокон и волоконных брэгговских решеток // Вестник СПбГУТ. 2024. № 4. С. 5–18
2. Былина М.С., Попова С.С. Методика расчета длины регенерационного участка ВОЛС с компенсаторами дисперсии // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2, № 2. С. 33–39
3. Былина М.С., Глаголев С.Ф. Оптические волокна в телекоммуникациях: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2019. 108 с.
4. Былина М.С., Глаголев С.Ф., Дюбов А.С. Сравнительный анализ методов энергетического и когерентного приема цифровых информационных оптических сигналов. Часть 1. Энергетический прием // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3, № 3. С. 12–20
5. Игуменов А.Ю., Конышев В.А., Лукиных Т.О., Наний О.Е., Новиков А.Г., Петренко И.И., Старых Д.Д., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Влияние корреляций нелинейного шума на дальность передачи // ЖТФ. 2024. Т. 94, вып. 4. С. 664–670

Polyakov A.I.
student of group IKM-42z
St. Petersburg State University of Telecommunications
named after M.A. Bonch-Bruevich
(St. Petersburg, Russia)

CHROMATIC DISPERSION IN OPTICAL FIBERS AND METHODS OF COMPENSATION

Abstract: *this paper examines chromatic dispersion in optical fibers. Chromatic dispersion remains a key limiting factor in increasing transmission speed and distance in fiber-optic communication systems. The paper describes the physical mechanisms responsible for the material and waveguide components of chromatic dispersion and reviews passive compensation methods (dispersion-compensating fiber, chirped fiber Bragg gratings, and photonic crystal fibers) and active methods (digital signal processing in coherent receivers and electronic compensation). Based on a comparative analysis incorporating OptiSystem simulation data and findings by Russian researchers, criteria are proposed for selecting a compensator for different scenarios, from direct detection to coherent systems operating at 100 Gbit/s and above. Russian developments in fiber Bragg grating compensators and digital signal processing, including the «Volga» transponder developed by T8, are shown to provide compensation of up to 75,000 ps/nm, placing these solutions on par with international counterparts.*

Keywords: *chromatic dispersion, compensation, dispersion-compensating fiber, fiber Bragg grating, photonic crystal fiber, digital signal processing, coherent detection.*