

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре
в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 621.391.63

**Сравнение эффективности компенсации хроматической дисперсии
в одномодовых оптических волокнах с помощью специальных волокон
и волоконных брегговских решеток**

Кубинская М. М.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка проблемы. Нескомпенсированная хроматическая дисперсия приводит к искажению передаваемых сигналов и ограничивает дальность и пропускную способность волоконно-оптических систем связи. **Цель работы:** определить критерии для выбора оптимального метода компенсации хроматической дисперсии при практическом проектировании волоконно-оптических систем связи с энергетическим приемом. **Используемые методы:** исследования проводились методом имитационного моделирования в программе OptiSystem; рассмотрено использование специальных волокон и применение чирпированных волоконных брегговских решеток для компенсации хроматической дисперсии. **Результаты:** на базе предложенного метода проведен анализ преимуществ и недостатков использования специальных волокон и применения чирпированных волоконных брегговских решеток. Рассмотрены такие параметры, как эффективность компенсации, вносимые оптические потери, стоимость и технологические особенности реализации.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы связи, хроматическая дисперсия, компенсация хроматической дисперсии, чирпинг, одномодовые оптические волокна, специальные волокна для компенсации хроматической дисперсии, волоконные брегговские решетки

Введение

Одной из ключевых проблем при проектировании высокоскоростных волоконно-оптических систем связи (ВОСС) является хроматическая дисперсия (ХД) в одномодовых оптических волокнах (ОВ). Данная работа посвящена сравнительному анализу эффективности двух методов компенсации ХД: 1) использование специальных волокон DCF (аббр. от англ. Double-Clad Fiber – оптическое волокно с двойным покрытием) с отрицательной дисперсией и 2) применение чирпированных волоконных брегговских решеток (FBG, аббр. от англ. Fiber Bragg Gratings.).

Первая часть данной статьи посвящена углубленному теоретическому рассмотрению и имитационному моделированию в программе OptiSystem (OptiSystem User Guide and Reference Manual. Optical Communication System Design Software. Version 19. Optiwave Systems Inc. 2022) процессов компенсации ХД в одномодовых ОВ с помощью специальных волокон DCF. Во второй части теоретически и с помощью моделирования рассматриваются физические процессы компенсации ХД в одномодовых

Библиографическая ссылка на статью:

Кубинская М. М. Сравнение эффективности компенсации хроматической дисперсии в одномодовых оптических волокнах с помощью специальных волокон и волоконных брегговских решеток // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 5. EDN: WCLKDC

Reference for citation:

Kubinskaya M. Comparison of the Efficiency of Chromatic Dispersion Compensation in Single-Mode Optical Fibers Using Dispersion Compensating Fibers and Fiber Bragg Gratings // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 5. EDN: WCLKDC

ОВ с использованием FBG, а также проводится всестороннее сравнение методов компенсации ХД с помощью DCF и FBG. В качестве основных критериев сравнения будут использованы Q-фактор и потери в компенсирующем устройстве.

Распространение сигналов в одномодовых ОВ. Параметры волокон. Межсимвольная интерференция

Одномодовое ОВ является одним из основных элементов современных цифровых ВОСС большой протяженности. Его основными параметрами, влияющими на качество связи, являются зависимости коэффициентов затухания $\alpha(\lambda)$ и ХД $D_x(\lambda)$, которые зависят от длины волны λ [1].

Рассмотрим влияние $\alpha(\lambda)$ и $D_x(\lambda)$ на прохождение спектрально ограниченного гауссовского импульса с пиковой мощностью P_{0m} и канонической полушириной T_0 . Зависимость мощности импульса на входе в одномодовое ОВ от времени t можно описать следующим образом [1]:

$$P_0(t) = P_{0m} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{T_0^2}\right).$$

Полагая, что форма импульса на выходе одномодового ОВ остается гауссовской [2], запишем выражение для зависимости мощности импульса от расстояния z вдоль одномодового ОВ и внутриимпульсного времени T [1]:

$$(z, T) = P_{0m} \cdot \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2 \cdot [1 + (z/L_D)^2]}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (z/L_D)^2}} \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (1)$$

где $T = t - z \cdot n_g/c$ – внутриимпульсное время, отсчитываемое от вершины оптического гауссовского импульса на расстоянии z ; c – скорость света в вакууме; n_g – групповой показатель преломления сердцевины одномодового ОВ; $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ – дисперсионная длина одномодового ОВ; $\beta_2 = -\frac{\lambda_0^2 \cdot D_x}{2\pi \cdot c}$ – дисперсия групповых скоростей; λ_0 – длина волны излучения источника в вакууме.

Из выражения (1) следует, что полуширина выходного гауссовского импульса определяется дисперсионной длиной одномодового ОВ:

$$T_{0L} = T_0 \cdot \sqrt{1 + (z/L_D)^2}.$$

Из того же выражения следует, что ХД вносит дополнительное затухание сигнала в $1/\sqrt{1 + (z/L_D)^2}$ раз. Во столько же раз возрастает и длительность выходного импульса.

Для величины дисперсионного расширения спектрально ограниченного гауссовского импульса можно также использовать следующее выражение [1]:

$$\Delta\tau(z) = |D_x| \cdot \Delta\lambda \cdot z.$$

Отметим, что в одномодовых ОВ в одноканальной ВОСС даже при отсутствии нелинейных искажений сигналов в волокне возникает межсимвольная интерференция, т. е. суммирование напряженностей электрического поля E в световых волнах соседних импульсов. Зависимость E от z и t становится очень сложной и практически непредсказуемой. Отметим, что зависимость интенсивности излучения I , которая пропорциональна E^2 , от z и t проявляется еще сильнее. В многоканальных ВОСС интерференция оптических импульсов разных каналов с разными несущими частотами становится очень сложной.

Однако компенсация ХД в одномодовых ОВ позволяет разделить в одноканальной ВОСС отдельные импульсы, а в многоканальной – импульсы разных каналов после их демультимплексирования.

Компенсация ХД с помощью DCF

Компенсация ХД на усилительном участке (УУ) ВОСС основана на последовательном включении телекоммуникационного ОБ длиной L и DCF длиной L_c [1]. Задачами проектировщика ВОСС являются: выбор типа и определение длины L_c DCF для полной или частичной (оптимальной) компенсации ХД в одномодовых ОБ в диапазоне рабочих длин волн ВОСС. При оптимальной частичной компенсации удается повысить качество связи (увеличить Q-фактор), но при этом происходит некоторое расширение импульса ΔT на выходе УУ [1–3].

В работах [1–3] показано, что для полной компенсации ХД выбранное DCF должно удовлетворять условию:

$$RDS = S_x/D_x = S_{xc}/D_{xc}, \quad (2)$$

где D_x и D_{xc} – коэффициенты ХД, а S_x и S_{xc} – наклоны дисперсионных характеристик для телекоммуникационного ОБ и DCF.

Кроме того, знаки коэффициентов ХД и наклонов дисперсионных характеристик для телекоммуникационного ОБ и DCF должны быть противоположными. Для большинства одномодовых ОБ, включая телекоммуникационные ОБ и DCF, зависимость $D_x(\lambda)$, для любой длины волны λ можно аппроксимировать следующим выражением [1–3]:

$$D_x(\lambda) = D_x(\lambda_0) + S_x(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0), \quad (3)$$

где λ_0 – референсная длина волны, для которой известны значения $D_x(\lambda_0)$ и $S_x(\lambda_0)$. Обычно $\lambda_0 = 1550$ нм.

Учитывая (2) и (3), запишем выражение для остаточного (допустимого) расширения импульса на выходе УУ:

$$\Delta T = |[D_x(\lambda_0) + S_x(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)] \cdot L + [D_{xc}(\lambda_0) + S_{xc}(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)] \cdot L_c| \cdot \Delta\lambda, \quad (4)$$

где $\Delta\lambda = \Delta\nu \cdot \lambda^2/c$ – максимальная ширина спектра канального оптического сигнала с несущей длиной волны λ , которая в системах с DWDM (*аббр. от англ. Dense Wavelength-Division Multiplexing* – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны) определяется частотным интервалом между каналами $\Delta\nu$.

Полагая $\Delta T = 0$, исходя из (4) и с учетом (2) определим длину компенсирующего одномодового ОБ, необходимую для полной компенсации ХД на средней длине волны λ используемого в ВОСС диапазона длин волн [1–3]:

$$L_c = -\frac{[D_x(\lambda_0) + S_x(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)] \cdot L}{[D_{xc}(\lambda_0) + S_{xc}(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)]}. \quad (5)$$

Моделирование процессов компенсации ХД с применением DCF

На рисунке 1 показана схема моделирования в программе OptiSystem процессов посткомпенсации ХД в одномодовом ВОСС с помощью DCF. Передатчик ВОСС содержит генератор информационной битовой последовательности (Bit Sequence Generator) со скоростью $B = 10$ Гбит/с, оптический генератор гауссовских импульсов (Gaussian Pulse Generator) с длиной волны $\lambda_0 = 1550$ нм и оптический фильтр Баттерворта с полосой $\Delta\nu_f = 40$ ГГц. Волоконно-оптический линейный тракт содержит стандартное одномодовое ОБ (SF, *аббр. от англ. Standart Fiber*) длиной L и DCF длиной L_c для полной или частичной компенсации ХД. В приемнике Rx используется р-и-п фотодиод.

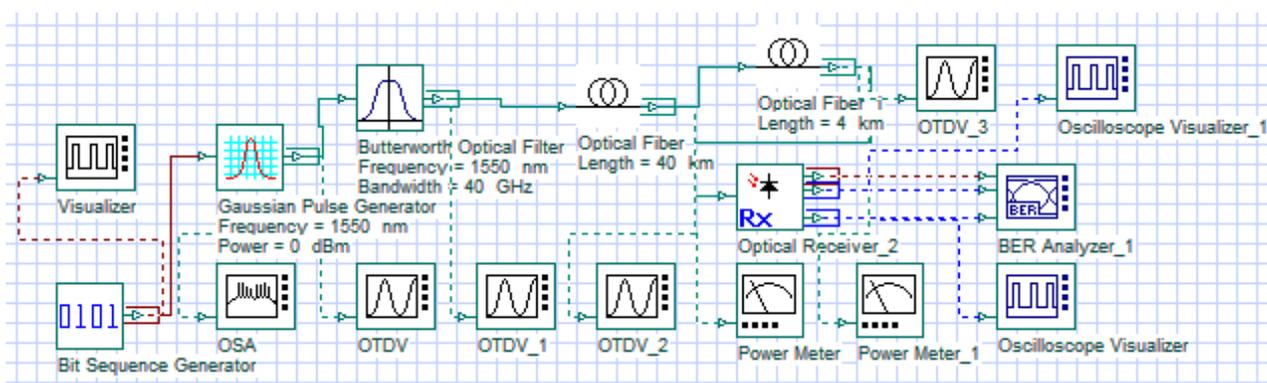


Рис. 1. Схема ВОСС для исследования посткомпенсации ХД

Для контроля и измерения используются следующие приборы: оптические анализаторы спектра (OSA), оптические осциллографы (OTDV) и измерители мощности (Power Meter), а также электрические осциллографы (Oscilloscope Visualizer) и анализатор битовых ошибок (BER Analyzer).

В процессе исследований изменялись длины телекоммуникационного ОВ L и DCF L_c . Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования процессов компенсации ХД с применением DCF

Установленные величины		Измеренные величины			
L , км	L_c , км	P_m , мкВт	t_u , бит	α_c , дБ	Q-фактор
40	4	90	0,26	1,6	18,0
60	6	30	0,26	2,4	6,0
80	8	39	0,26	3,2	8,1
80	7	34	0,36	2,8	8,2
80	6	25	0,50	2,4	8,8
80	5	20	0,68	2,0	8,4

В первых строках таблицы приведены результаты для полной компенсации ХД при длинах SF 40, 60 и 80 км. Видно, что расширения выходного гауссовского импульса при этом не наблюдалось. Для SF длиной 80 км уменьшение длины DCF может несколько повысить Q-фактор, но выходной импульс при этом расширяется.

Использование FBG для компенсации ХД в одномодовых ОВ является альтернативой применению DCF.

Остаточная ХД в телекоммуникационном ОВ

Прежде чем рассматривать принцип компенсации ХД в одномодовых ОВ с помощью FBG, вернемся к известному выражению для расширения оптических импульсов $\Delta\tau$ за счет ХД [2, 3]:

$$\Delta\tau = |D_x| \cdot L \cdot \Delta\lambda, \quad (6)$$

где D_x – коэффициент ХД; L – длина телекоммуникационного ОВ; $\Delta\lambda$ – ширина спектра сигнала.

Величину $\Delta\tau$ можно трактовать как изменение задержки оптических сигналов, отличающихся по длине волны от среднего значения λ_0 на $\pm \frac{\Delta\lambda}{2}$. Изменение задержки обусловлено различием в групповых скоростях для излучений с различными длинами волн и возрастает с увеличением длины L одномодового ОВ.

Используя выражение (6), определим понятие остаточной ХД, которое характеризует дисперсионные свойства конкретного одномодового ОВ длиной L :

$$DL = D_x \cdot L. \quad (7)$$

Остаточная ХД имеет размерность пс/нм. Определим максимальную ширину спектра $\Delta\lambda$ одноканального сигнала DWDM со средней частотой λ_0 , ограниченную межканальным интервалом по частоте $\Delta\nu$ для используемой ВОСС:

$$\Delta\lambda = \Delta\nu \cdot \lambda_0^2 / c.$$

Далее будем использовать понятие остаточной дисперсии для FBG.

Моделирование процессов компенсации ХД с помощью модуля FBG-DCM

Простейшая FBG представляет собой одномодовое ОВ длиной λ_{FBG} , у которого зависимость группового показателя преломления (ГПП) сердцевинной $n_g(z)$ от расстояния является периодической функцией [3]:

$$n_g(z) = n_{g0} \cdot \left(1 + \Delta n \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\Lambda_0} z\right) \right),$$

где n_{g0} – средний ГПП сердцевинной ОВ; Δn – глубина модуляции ГПП; Λ_0 – шаг (период) FBG.

Рассмотренная FBG имеет резонансную брегговскую длину волны излучения λ_{FBG} , которое при достаточной длине λ_{FBG} практически полностью отражается от решетки [3]:

$$\lambda_{FBG} = 2 \cdot n_{g0} \cdot \Lambda_0.$$

Для компенсации ХД используется модуль FBG-DCM, схема включения которого приведена на рисунке 2 [3]. Модуль состоит из chirпированной FBG, т. е. решетки с переменным шагом, и оптического трехпортового циркулятора. На порт 1 поступает излучение сигнала, искаженного действием ХД (расширенный импульс), которое циркулятор направляет по часовой стрелке через порт 2 в FBG. Отраженный от FBG сигнал, свободный от искажений за счет ХД, выходит через порт 3.



Рис. 2. Схема включения FBG-DCM

Для компенсации ХД используют линейно chirпированные FBG, у которых период Λ линейно меняется с изменением расстояния z от $-\frac{L_{FBG}}{2}$ до $+\frac{L_{FBG}}{2}$ вдоль ОВ [3]:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 - \Delta \cdot (z - L_{FBG}/2) / L_{FBG},$$

где $\Delta = \Delta\lambda / (2 \cdot n_g)$ – chirп FBG.

Дисперсионные свойства модуля FBG-DCM обусловлены тем, что свет с разными длинами волн отражается от разных участков chirпированной решетки. Знак дисперсии FBG-DCM зависит от того, каким концом решетки подключена к циркулятору. При компенсации положительной ХД длинноволновая часть решетки располагается ближе к циркулятору. Таким образом, FBG-DCM может компенсировать ХД с любым знаком коэффициента ХД D_x .

Для выполнения функции компенсации ХД в одномодовых ОВ FBG должна обладать такой же остаточной ХД, но с противоположным знаком. Запишем выражение для разности групповых запаздываний $\Delta\tau$ излучения, отраженного от начала и конца FBG длиной λ_{FBG} :

$$\Delta\tau = 2 \cdot n_g \cdot L_{FBG} / c = (\Delta\tau / L_{FBG}) \cdot L_{FBG} = (2 \cdot n_g / c) \cdot L_{FBG}. \quad (8)$$

Используя (6) и (8), определим остаточную дисперсию для FBG с линейным чирпингом:

$$DL_{FBG} = (\Delta\tau / \Delta\lambda) = (\Delta\tau / L_{FBG}) \cdot L_{FBG} / \Delta\lambda = (2 \cdot n_g / c) \cdot L_{FBG} / \Delta\lambda. \quad (9)$$

Приравнявая выражения (7) и (9), определим необходимую длину FBG для компенсации ХД в одномодовом ОВ длиной L :

$$L_{FBG} = (2 \cdot n_g / c) / \Delta\lambda = D_x \cdot L \cdot \Delta\lambda \cdot c / (2 \cdot n_g).$$

На рисунке 3 показана схема моделирования в программе OptiSystem процессов посткомпенсации ХД в ВОСС с помощью модуля FBG-DCF. За исключением типа компенсатора ХД она аналогична представленной на рисунке 1.

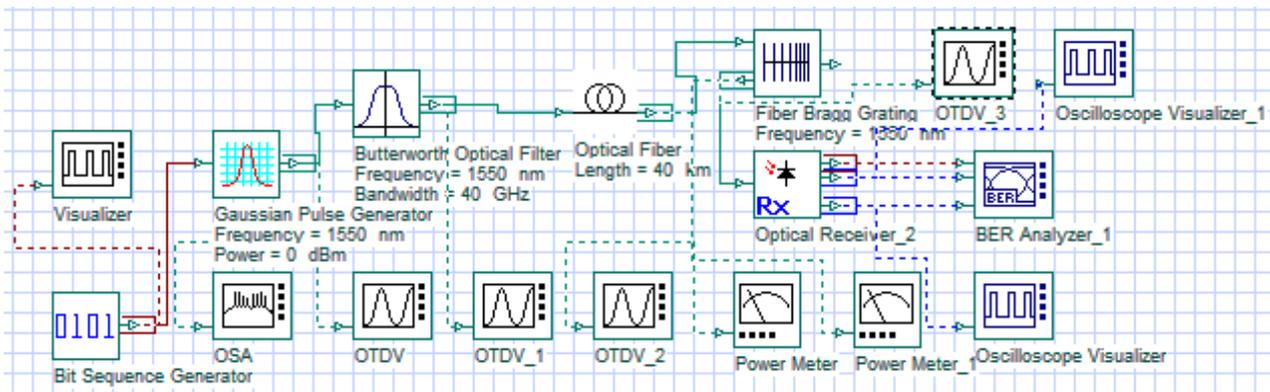
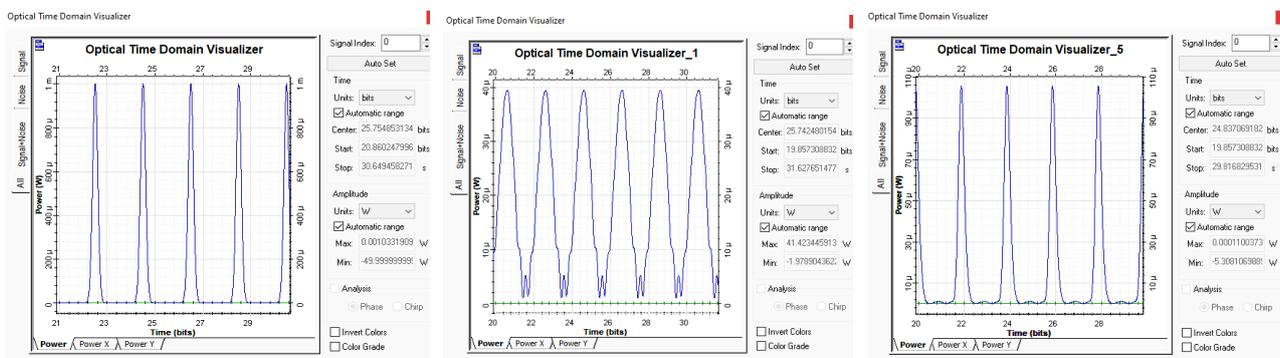


Рис. 3. Схема ВОСС для исследования компенсации ХД в ОВ с помощью FBG-DCF

Исходные данные ВОСС для моделирования: $\lambda_0 = 1550$ нм; $\Delta\nu = 50$ ГГц; $\Delta\lambda = 0,4$ нм; $L = 40$ км; $D_x = 16,75$ пс/(нм·км); $DL = 670$ пс/нм. Результаты расчетов параметров FBG по формулам (2–6): $\Lambda_0 = 0,534$ мкм; $\Delta = 0,138$ нм и $\lambda_{FBG} = 28$ мм.

На рисунке 4 показаны сигналы на входе и выходе одномодового ОВ, а также на выходе FBG-DCF. Другие результаты исследований приведены в таблице 2.



а) б) в)
Рис. 4. Сигналы на входе (а) и выходе одномодового ОВ (б); на выходе FBG-DCF (в)

Таблица 2. Результаты моделирования процессов компенсации ХД с помощью FBG-DCF

Установленные величины				Измеренные величины			
L , км	L_{FBG} , мм	Δ , нм	DL , пс/нм	P_m , мкВт	t_u , бит	a_{FBG} , дБ	Q-фактор
40	28	0,138	670	106	0,30	0,40	23
40	28	0,150	670	110	0,29	0,36	22
40	28	0,165	670	102	0,28	0,67	23

Из таблицы 2 видно, что рассчитанное значение чирпинга $\Delta = 0,138$ нм не обеспечивает оптимальную компенсацию ХД. Увеличение чирпинга FBG до $\Delta = 0,15$ нм позволяет уменьшить потери в решетке до минимума $a_{FBG} = 0,36$ дБ, а увеличение чирпинга до $\Delta = 0,165$ нм позволяет уменьшить длительность импульса до $t_u = 0,28$ бит.

Выводы

Проведенное в работе исследование двух методов компенсации ХД в одномодовых ОВ – с использованием 1) специальных волокон с отрицательной дисперсией (DCF) и 2) чирпированных волоконных брегговских решеток (FBG) – позволило сделать ряд важных выводов:

Во-первых, компенсация с применением FBG-DCM обеспечивает меньшие дополнительные потери.

Во-вторых, компенсация с DCF значительно эффективнее и пригодна для использования в более широком диапазоне длин волн.

В-третьих, целесообразным представляется продолжение исследований для многоканальных ВОСС с DWDM.

Литература

1. Былина М. С., Глаголев С. Ф. Оптические волокна в телекоммуникациях: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2019. 108 с. EDN: PURHYU
2. 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. EDN: ZIWOIH
3. Трещиков В. Н., Листвин В. Н. DWDM системы. 4-е изд. М.: Техносфера, 2021. 420 с.

Статья поступила 14 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 18 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.

Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).

Информация об авторе

Кубинская Мария Михайловна – студент 2-го курса магистратуры (группа ИКТФ-36м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Comparison of the Efficiency of Chromatic Dispersion Compensation in Single-Mode Optical Fibers Using Dispersion Compensating Fibers and Fiber Bragg Gratings

M. Kubinskaya

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem statement. *Uncompensated chromatic dispersion leads to distortion of the transmitted signals and limits the range and bandwidth of fiber-optic communication systems. Objective:* to determine the criteria for selecting the optimal method of chromatic dispersion compensation in the practical design of fiber-optic communication systems with power-based reception. **Methods Used.** *The research was conducted using simulation modeling in the OptiSystem software. The use of specialty fibers and the application of chirped fiber Bragg gratings for chromatic dispersion compensation were investigated. Results.* Based on the proposed method, an analysis of the advantages and disadvantages of using specialty fibers and applying chirped fiber Bragg gratings was conducted. Parameters such as compensation efficiency, insertion optical losses, cost, and technological implementation aspects were considered.

Key words: *fiber-optic communication systems, chromatic dispersion and its compensation, chirping, single-mode optical fibers, special fibers for chromatic dispersion compensation, fiber Bragg gratings*

Information about Author

Kubinskaya Maria — 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications)