

УДК 621.315.616:535.562

Д. Г. БАГАЧУК

Украина, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова

E-mail: vols@onat.edu.ua

КОМПЕНСАТОР ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНО ИЗОГНУТОГО ОДНОМОДОВОГО ОПТОВОЛОКНА

Разработан компенсатор поляризационной модовой дисперсии (ПМД) в одномодовом оптическом волокне. Принцип его действия основан на использовании искусственно созданной разницы фазовых скоростей распространения основных обыкновенной и необыкновенной волн в спирально изогнутом волокне, уложенном плотно, виток к витку, на диэлектрический сердечник. Предложенный компенсатор ПМД относится к полностью волоконно-оптическим устройствам и может быть использован в линейных трактах высокоскоростных одно- и многоканальных волоконно-оптических систем передачи со спектральным мультиплексированием, а также оптическим временным мультиплексированием, в волоконно-оптических усилителях, в схемах измерений и т. д.

Ключевые слова: одномодовое оптическое волокно, поляризационная модовая дисперсия, анизотропия, компенсатор дисперсии.

На сегодняшний день одномодовое оптическое волокно благодаря небольшим потерям оптической мощности в них, малой дисперсии светового импульса и другим преимуществам является наилучшей направляющей средой для современных сетей связи и позволяет передавать высокоскоростные широкополосные сигналы на большие расстояния.

При распространении по волоконно-оптическим линиям связи оптические импульсные сигналы претерпевают искажения за счет затухания и дисперсии, что ограничивает, в первую очередь, дальность передачи и требует применения линейных регенераторов или волоконно-оптических усилителей (ВОУ).

С внедрением ВОУ на транспортных телекоммуникационных сетях связи скорость и дальность передачи информации ограничиваются в основном дисперсией — хроматической и поляризационной модовой. В таких условиях все более актуальной становится задача их компенсации. В настоящее время разработано значительное количество методов и устройств компенсации хроматической дисперсии, но почти все они искажают импульсы за счет дополнительных потерь, поляризационной дисперсии, нелинейных эффектов и т. д. Достаточно подробный обзор методов и устройств компенсации хроматической дисперсии приведен в [1]. Однако анализ современных волоконно-оптических систем передачи с ВОУ и компенсаторами хроматической дисперсии показывает, что поляризационная модовая дисперсия (ПМД) становится основным фактором, ограничивающим построение протяженных транспортных сетей связи со скоростью

передачи 40 Гбит/с и выше. Кроме того, в некоторых случаях поляризационная дисперсия может ухудшать качество работы систем связи со скоростью передачи 10 Гбит/с [2]. То есть, вопросы исследования причин появления ПМД и разработки методов и устройств ее компенсации являются актуальными и представляют научный интерес.

В [3] доказано, что при укладке одномодового оптического волокна (**ОМОВ**) на некоторый цилиндр по спиральной линии в нем возникают метрическая и диэлектрическая анизотропии, которые проявляются в двулучепреломлении, различии фазовых скоростей распространения основных обыкновенной и необыкновенной волн с взаимно ортогональными поляризациями. Там же было показано, что благодаря анизотропии в спиральных **ОМОВ** (**СОМОВ**) наблюдается невзаимное перетекание мощности в плоскости поперечного сечения между указанными волнами. В [4] говорилось о возможности компенсации ПМД за счет спиральной укладки одномодового оптического волокна с определенным шагом на диэлектрический сердечник определенного радиуса. Однако собственно разработка пассивного компенсатора ПМД в этих работах не проводилась.

В настоящее время известен ряд методов компенсации поляризационной дисперсии, которые могут быть разделены на две основные категории [5]:

— электрические методы, основой которых является использование более стойких к влиянию дисперсии форматов модуляции, а также трансверсальных фильтров (линейных фильтров с разветвленной линией задержки);

— оптические методы, реализуемые на базе различных схем компенсаторов, которые включаются непосредственно в оптической области линейного тракта систем передачи.

Известны также полностью оптические устройства, которые могут быть использованы для компенсации поляризационной дисперсии: компенсатор на основе кристаллов ниобата лития, скрученные однополяризационные волокна, оптические фазовые фильтры, волоконные Брегговские решетки.

Как электрические, так и оптические методы компенсации ПМД имеют свои преимущества и недостатки. К недостаткам электрических относятся зависимость степени компенсации от скорости передачи и формата информации, меньшая величина компенсации по сравнению с оптическими методами, ограниченность компенсации дисперсии одним каналом. Известные же оптические компенсаторы имеют высокую стоимость и сложны в изготовлении.

Целью настоящей работы была разработка компенсатора поляризационной модовой дисперсии, лишенного указанных недостатков.

Для решения поставленной задачи был предложен метод компенсации, основанный на искусственном создании анизотропии свойств спирально изогнутых одномодовых оптических волокон. Прежде чем перейти к описанию сути метода, рассмотрим причины возникновения ПМД в оптоволокне, уложенном в оптический кабель.

Как известно, в ОМОВ симметричной относительно оси формы существуют две отдельные моды с взаимно ортогональными поляризациями в плоскости поперечного сечения волокна. Волну, поляризованную вдоль направления наибольшего изменения диэлектрической проницаемости, принято называть необыкновенной и обозначать HE_{11}^e , а ортогональную к ней волну — обыкновенной и обозначать HE_{11}^o . Если волноводная структура ОМОВ идеально симметрична, то обе моды с ортогональными поляризациями не отличаются между собой, т. к. имеют одинаковую фазовую скорость распростра-

нения и переносят равные значения энергии. В первую очередь по этой причине такие оптические волокна (**ОВ**) называются одномодовыми. Однако в реальных ОМОВ вследствие промышленных дефектов, эллиптичности и эксцентриситета сердцевинки относительно оболочки возникает осевая асимметрия, при которой фазовые скорости распространения двух ортогональных мод будут различными. Кроме того, изгибы оптических волокон в сердечнике кабеля и температурные колебания окружающей среды приводят к появлению анизотропных свойств ОМОВ, вследствие чего происходит взаимное преобразование энергии сигналов мод HE_{11}^e и HE_{11}^o , изменяется их поляризация, порождается поляризационная дисперсия сигналов и межсимвольные искажения. Случайно ориентированные в структуре сердцевинки ОВ микрокристаллы стекла также являются причиной деполаризации мод и их взаимного преобразования, что тоже увеличивает поляризационную дисперсию [3].

Таким образом, в одномодовом оптическом волокне импульсный сигнал переносится двумя взаимно ортогональными основными волнами с различными значениями групповой скорости (или групповой задержки). Разность этих значений ($\Delta\tau$) характеризует поляризационную модовую дисперсию переносимого сигнала, вследствие которой длительность суммарного импульсного сигнала на выходе ОМОВ увеличивается ($\tau_{\text{вых}} > \tau_{\text{вх}}$) (рис. 1).

В сердечниках оптических кабелей, где оптические модули с ОМОВ уложены по спиральным линиям, поляризационная дисперсия для строго когерентных сигналов может быть определена как разность значений группового времени распространения (задержки) необыкновенной и обыкновенной волн [3]:

$$\Delta\tau_{\text{л}} = \tau^e - \tau^o = \frac{\partial\beta_1^e(\omega)}{\partial\omega} - \frac{\partial\beta_1^o(\omega)}{\partial\omega}, \quad (1)$$

где τ^o, τ^e и β_1^e, β_1^o — соответственно, групповое время и фазовые коэффициенты распространения мод HE_{11}^e и HE_{11}^o (ПМД первого порядка) при круговой частоте ω .

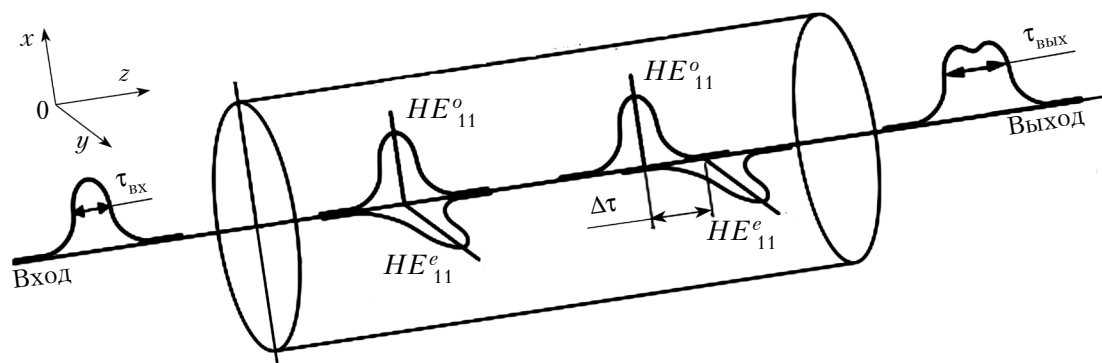


Рис. 1. Схема прохождения импульсного сигнала в оптическом волокне

В [6] показана зависимость $\Delta\tau_{\text{д}}$ от параметра $A=p/(4\pi R)$, где p и R — шаг и радиус оси спирального ОМОВ, а также установлено, что в реальных оптических кабелях, где A изменяется от 2 до 3,7, групповое время распространения необыкновенной волны больше, чем обыкновенной ($\tau^e > \tau^o$), т. е. $\Delta\tau_{\text{д}} > 0$. Очевидно, если создать в компенсаторе соответствующую отрицательную разность значений группового времени распространения $\Delta\tau_{\text{к}} < 0$, можно достичь полной компенсации ПМД в ОМОВ, когда $\Delta\tau_{\text{д}} + \Delta\tau_{\text{к}} = 0$ (согласно [6], $\Delta\tau_{\text{к}} < 0$ в случае, когда $A < 0,618$).

Для искусственного создания ПМД можно использовать эффект, называемый фотоупругостью, когда при приложении механического напряжения в ОМОВ, вследствие изменения показателя преломления, возникает оптическая анизотропия. Если придать этому эффекту некоторую пространственную упорядоченность, это позволит установить определенную ориентацию молекул в структуре стекла ОВ. При укладке волокна в охлажденном состоянии в спиральную линию с постоянным шагом и радиусом молекулы, микрокристаллы стекла, примеси и неоднородности получают ориентацию вдоль силовых линий приложенного механического напряжения. В таком случае наблюдается существенное уменьшение случайного влияния неоднородностей на поляризационную дисперсию и появляется возможность контролировать анизотропию и, соответственно, ПМД путем изменения радиуса и шага укладки ОМОВ.

На основании этого было предложено выполнить компенсатор в виде катушки с диэлектрическим сердечником, на который плотно, виток к витку, намотано одномодовое оптическое волокно. Такая катушка, по сути, совмещает в себе две оптические линии задержки с различными значениями времени задержки для волн HE_{11}^e и HE_{11}^o .

В общем виде разница значений группового времени распространения необыкновенной и обыкновенной волн на единицу длины (1 км) спирального ОМОВ для строго когерентной оптической несущей определяется по формуле [6]

$$\Delta\tau = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\beta_{10}}{\varepsilon(r)} \right) [(vr - 2\chi r) \cos \varphi + vr \sin \varphi + \chi^2 r^2 \cos^2 \varphi], \quad (2)$$

где β_{10} — фазовый коэффициент распространения моды HE_{11} в изотропном ОВ (рад/км);

$\varepsilon(r)$ — диэлектрическая проницаемость сердцевины СОМОВ;

v, χ — соответственно, параметры кручения и кривизны ОВ;

φ — угол поляризации необыкновенной волны;

r — эффективный радиус модового пятна (мкм).

Поскольку $\varepsilon(r) = \sqrt{n(r)}$ (n — показатель преломления стекла), спектральную зависимость ди-

электрической проницаемости стекла в диапазоне длины волны $\lambda = 0,2 - 2,0$ мкм можно описать дисперсионной формулой Селмейера [7, с. 66]

$$\varepsilon(r) = n^2(r) = 1 + \sum_{i=1}^3 a_i \lambda^2 / (\lambda^2 - l_i^2), \quad (3)$$

где a_i, l_i — коэффициенты Селмейера, зависящие от химического состава стекла.

Определив с учетом этого производную $\frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\beta_{10}}{\varepsilon(r)} \right)$ и подставив ее в выражение (2), получим полную формулу для расчета погонной величины поляризационной дисперсии, которая может быть скомпенсирована в катушке:

$$\Delta\tau_{\text{к}} = F \frac{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}} - \frac{\lambda^2}{n_1} \sum_{i=1}^3 \frac{a_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2}}{2c \left(1 + \sum_{i=1}^3 a_i \lambda^2 / (\lambda^2 - l_i^2) \right)}, \quad (4)$$

где $F = (vr - 2\chi r) \cos \varphi + vr \sin \varphi + \chi^2 r^2 \cos^2 \varphi$;

c — скорость света в вакууме, км/с;

n_1 — показатель преломления сердцевин ОМОВ.

Полученное выражение дает возможность определять ПМД в спирально изогнутых ОМОВ различного химического состава.

В [2] рекомендуется обеспечивать такие условия передачи оптического сигнала, при которых значение $\Delta\tau$ должно быть меньше одной десятой части периода следования импульсов T , т. е. $\Delta\tau < T/10$ или $\Delta\tau < 1/(10B)$, где B — битовая скорость передачи сигналов. Вычисленные в соответствии с этим максимально допустимые значения ПМД для аппаратуры SDH разных уровней иерархии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимально допустимые значения ПМД в аппаратуре SDH разных уровней иерархии

Уровень иерархии	Битовая скорость B , Мбит/с	Период следования импульсов T , пс	$\Delta\tau$, пс
STM-1	155	6400	640
STM-4	622	1600	160
STM-16	2500	400	40
STM-64	10000	100	10
STM-256	40000	25	2,5

Следует отметить, что поляризационная модовая дисперсия, которая вызвана, в первую очередь, неоднородностями в оптоволокне, носит случайный характер [9]. В изотропном ОМОВ, где молекулы ориентированы хаотично, не представляется возможным предвидеть характер и расположение неоднородностей его структуры.

По этой причине коэффициент удельной поляризационной дисперсии в международных стандартах нормируется, согласно теории вероятности, на 1 км и имеет размерность пс/км^{1/2}.

В табл. 2 в качестве примера приведены результаты расчета значений погонной ПМД, которая может быть скомпенсирована предложенным компенсатором при длине волны $\lambda=1,55$ мкм. В качестве материала сердцевин ОМОВ принят 100%-ный SiO₂. Минимальный радиус сердечника R_k выбран равным 5 мм, что является минимально допустимым радиусом изгиба волокна в соответствии с [8].

Таблица 2

Результаты расчета ПМД в компенсаторе с шагом укладки волокна 250 мкм

R_k , мм	$\Delta\tau_k$, пс/км
5	-1639,83
6	-1367,48
7	-1172,71
8	-1026,49
9	-912,69
10	-821,61

Разработанный компенсатор поляризационной дисперсии можно изготавливать на базе стандартного ОМОВ (рекомендация G.652) различного химического состава. При этом каждому составу будет соответствовать определенное значение погонной ПМД, которая может быть скомпенсирована в катушке. Величина компенсации будет зависеть в основном от длины уложенного волокна и от радиуса сердечника.

Длину волокна, необходимую для компенсации ПМД величиной $\Delta\tau_l$, можно вычислить по формуле

$$L_{BK} = \frac{\Delta\tau_k}{\Delta\tau_l} L_B, \quad (5)$$

где L_B — длина волокна в линии.

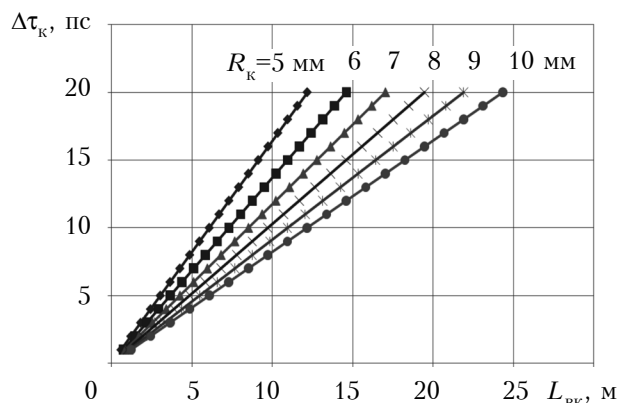


Рис. 3. Зависимость величины компенсации ПМД от длины волокна в компенсаторе при различных значениях радиуса сердечника

Учитывая, что длина одного витка ОВ в компенсаторе составляет $2\pi(R_k + d_{OB}/2)$, а шаг укладки ОВ на сердечник радиусом R_k равен диаметру оптоволоконной оболочки d_{OB} , необходимую длину компенсатора ПМД можно определить по формуле

$$L_k = \frac{L_{BK} d_{OB}}{2\pi(R_k + d_{OB}/2)}. \quad (6)$$

На рис. 3 представлены результаты расчета зависимости компенсированной ПМД от длины ОВ в компенсаторе при разных значениях радиуса сердечника.

Заключение

Проведенные исследования показали, что разработанный компенсатор, основанный на анизотропных свойствах спирально изогнутых одномодовых оптических волокон, может полностью скомпенсировать поляризационную модовую дисперсию в пределах от 1 до 20 пс в зависимости от длины волокна и радиуса его спиральной укладки на сердечник. Для компенсации больших значений дисперсии необходимо увеличить длину волокна, уложенного на сердечник радиусом от 5 до 10 мм.

Компенсатор может быть последовательно включен в произвольной точке линейного тракта системы передачи. За счет небольших размеров он может быть установлен в кабельных муфтах, кроссах, усилителях и т. д., то есть в любых местах открытого доступа к ОМОВ линейных оптических кабелей связи. Предложенный компенсатор ПМД относится к полностью волоконно-оптическим устройствам и может быть использован в линейных трактах высокоскоростных одно- и многоканальных волоконно-оптических систем передачи со спектральным мультиплексированием, а также оптическим временным мультиплексированием, в волоконно-оптических усилителях, в схемах измерений и т. д.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Бурдин В. А. Компенсация хроматической дисперсии на регенерационных участках линий передачи сетей связи // Электросвязь. — 2006. — № 7. — С. 28–33. [Burdin V. A. // Elektrosvyaz'. 2006. N 7. P. 28]
- Гладышевский М. А., Щербаткин Д. Д. Чем опасна поляризационная дисперсия? // LIGHTWAVE russian edition. — 2004. — № 4. — С. 33–34. [Gladyshevskii M. A., Shcherbatkin D. D. // LIGHTWAVE russian edition. 2004. N 4. P. 33]
- Макаров Т. В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи. — Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2009. [Makarov T. V. Kogerentnye volokonno-opticheskie sistemy peredachi. Odessa: ONAS im. A. S. Popova, 2009.]
- Макаров Т. В., Багачук Д. Г. Спиральные одномодовые оптические волокна как компенсаторы дисперсии импульсных сигналов // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. — 2012. — № 1. — С. 108–111. [Makarov T. V., Bagachuk D. G. // Naukovi pratsi ONAZ im. O. S. Popova. 2012. N 1. P. 108]

5. Govind P. Agrawal lightwave technology: telecommunication systems. — USA: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.

6. Макаров Т. В. Скрученный волоконный световод для когерентной передачи сигналов // Праці УНДІРТ. — 1998. — № 1(13). — С. 22–28. [Makarov T. V. // Pratsi UNDIRT. 1998. N 1(13). P. 22]

7. Корнейчук В. И., Макаров Т. В., Панфилов И. П. Оптические системы передачи. — Київ: Техніка, 1994. [Korneichuk V. I., Makarov T. V., Panfilov I. P. Opticheskie sistemy peredachi. Kiev: Tekhnika, 1994.]

8. Glaesemann G. S., Castilone R. J. The mechanical reliability of corning optical fiber in bending. — Corning White Paper WP3690. — 2002.

9. Скларов О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. — Москва: СОЛОН-Р, 2001. [Sklyarov O. K. Sovremennye volokonno-opticheskie sistemy peredachi, apparatura i elementy. Moscow: SOLON-R, 2001.]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 09.09 2013 г.*

Багачук Д. Г. Компенсатор поляризаційної модової дисперсії на основі спірально зігнутого одномодового оптоволоконна.

Ключові слова: одномодове оптичне волокно, поляризаційна модова дисперсія, анізотропія, компенсатор дисперсії.

Розроблено компенсатор поляризаційної модової дисперсії (ПМД) в одномодовому оптичному волокні. Принцип його дії заснований на використанні штучно створеної різниці фазових швидкостей поширення основних звичайної та незвичайної хвиль в

спіралью вигнутому волокні, укладеному щільно, виток до витка, на діелектричний сердечник. Запропонований компенсатор ПМД належить до повністю волоконно-оптичних пристроїв і може бути використаний в лінійних трактах високошвидкісних одно- та багатоканальних волоконно-оптичних систем передачі зі спектральним ущільненням каналів, а також оптичним тимчасовим мультиплексуванням, у волоконно-оптичних підсилювачах, в схемах вимірювань тощо.

Україна, Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова.

Bagachuk D. G. Compensator of polarization mode dispersion based on spiral-wound single-mode fiber.

Keywords: single mode optical fiber, polarization mode dispersion, anisotropy, dispersion compensator.

A polarization mode dispersion (PMD) compensator for single-mode optical fiber has been designed. Its operation principle is based on the use of artificial difference of phase velocities of the basic ordinary and extraordinary waves in spiral-wound fiber, stacked tightly, one turn close to another on the dielectric core. The proposed PMD compensator belongs to full fiber optic devices and can be used in high linear paths of single and multichannel fiber optic communication systems with wavelength-division multiplexing and with optical time-division multiplexing; in optical fiber amplifiers, in measurement circuits, etc.

Ukraine, A. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. — Москва: Техносфера, 2013.

В монографии рассматриваются основные разновидности адаптивных фильтров и их применение в радиотехнических системах и системах связи. Дается представление о математических объектах и методах, используемых в теории адаптивной фильтрации сигналов. Рассматриваются приемы получения вычислительных процедур, сами процедуры и свойства таких алгоритмов адаптивной фильтрации, как алгоритмы Ньютона и наискорейшего спуска, алгоритмы по критерию наименьшего квадрата, рекурсивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов и их быстрые (вычислительно эффективные) версии; рекурсивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов для многоканальных фильтров и их версии для обработки нестационарных сигналов, а также многоканальные алгоритмы аффинных проекций. Дано описание стандартных и нестандартных приложений для моделирования адаптивных фильтров на современных языках программирования MATLAB, LabVIEW и SystemVue, а также реализаций адаптивных фильтров на современных цифровых сигнальных процессорах отечественного и зарубежного производства. Книга является первым систематическим изложением теории адаптивной фильтрации на русском языке.

