

Г.Н. Вотинов, Ю.А. Константинов, А.С. Синьков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МODOVУЮ ДИСПЕРСИЮ В ОДНОМODOVOM ВОЛОКНЕ

Статья посвящена исследованию поляризационно-модовой дисперсии (ПМД) в одномодовом оптическом волокне. Проанализированы зависимости ПМД: от продольного натяжения в волокне SMF-28; угла ввода линейно-поляризованного излучения относительно основной оси распространения излучения в волокне типа Panda; температуры для волокна SMF-28 с регулярной намоткой на катушку.

Ключевые слова: поляризационно-модовая дисперсия, одномодовое оптическое волокно, волокно Panda, продольное натяжение, линейно-поляризованное излучение.

G.N. Votinov, Yu.A. Konstantinov, A.S. Sinkov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

ENVIRONMENTAL EFFECTS ON POLARIZATION MODE DISPERSION IN SINGLE-MODE FIBER

The work is devoted to the study of polarization – mode dispersion (PMD) in a single-mode optical fiber. Dependency of PMD on: longitudinal tension in fiber SMF-28; the input angle linear – polarized radiation relative to the main axis of propagation in the Panda PM fiber; temperature for SMF-28 fiber with a regular wound on the reel were analysed.

Ключевые слова: polarization mode dispersion, single-mode fiber, Panda PM fiber, longitudinal tension, linear-polarized radiation.

1. Описание проблемы

Стремительное развитие техники оптической передачи информации в последнее десятилетие привело к тому, что поляризационные эффекты в волоконно-оптических линиях связи, еще недавно считавшиеся незначительными, стали играть роль основного фактора, сдерживающего дальнейшее увеличение скорости и дальности передачи информации [1].

Одним из таких факторов является поляризационно-модовая дисперсия (ПМД). ПМД-дисперсия вызвана двулучепреломлением оптического волокна (ОВ) – разделением излучения на ортогонально-поляризованные моды, которые распространяются по ОВ с различной скоростью вдоль его быстрой и медленной осей. Эта дисперсия вызывает задержку между двумя главными состояниями поляризации (рис. 1).

По мере увеличения скорости передачи информации по одному каналу до 10 и 40 Гбит/с и дальности до нескольких тысяч километров даже слабые эффекты поляризационно-модовой дисперсии, накапливаясь, вносят заметный вклад в работу системы. На скоростях передачи до 2,5 Гбит/с величина ПМД остается малой по сравнению с величиной хроматической дисперсии в волокне. Однако при скоростях передачи 10 Гбит/с и выше величина ПМД становится сравнимой с величиной хроматической дисперсии. В отличие от хроматической дисперсии, ПМД не удастся скомпенсировать, поэтому в современных высокоскоростных системах передачи (STM-64 и DWDM-линии со спектральным уплотнением) ПМД становится определяющим фактором, ограничивающим полосу пропускания и максимальную дистанцию передачи.

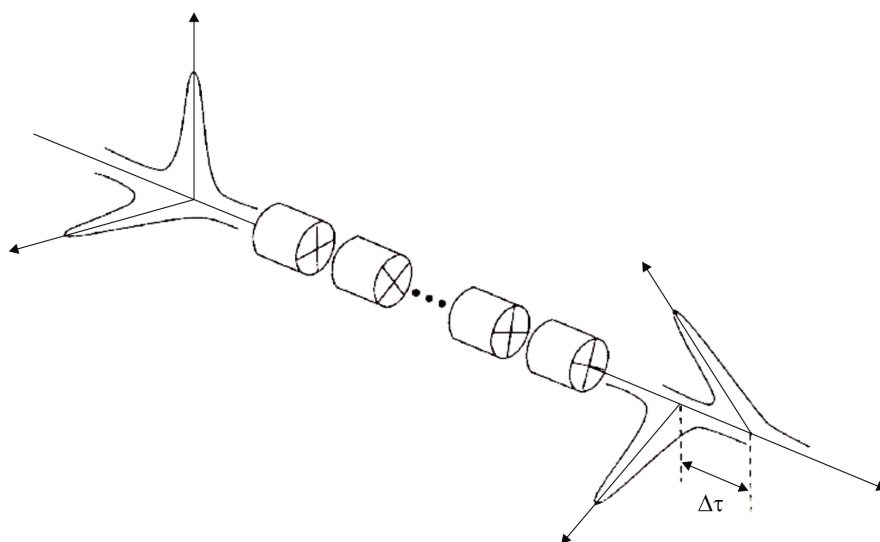


Рис. 1. Графическое изображение ПМД

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 по причине поляризационно-модовой дисперсии растут пропорционально битовой скорости. Ввиду сильной разветвленности сетей связи, необходимости их быстрого реконфигурирования стал актуальным вопрос динамичности компенсации искажений. Динамическая компенсация требуется для подавления поляризационно-модовой дисперсии, которая меняется быстро и случайным образом, сильно зависит от внешних условий и вызывает всплески шума.

ПМД возникает вследствие неидеальности геометрии сердцевины ОВ, приводящей к различию скоростей распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих основной моды. Анизотропия, или двулучепреломление, ОВ может быть связано либо с нарушением идеальной круговой формы сердцевинки, либо с наведенным двулучепреломлением вещества, например из-за несимметричных напряжений в материале ОВ или несовпадения геометрических центров сердцевинки и оболочки [2]. Существует несколько факторов роста анизотропии профиля волокна.

Статические факторы:

- несовершенство заводского процесса вытяжки волокон;
- скрутка волокон при изготовлении волоконно-оптического кабеля (ВОК);
- изгибы ВОК и, как следствие, механические деформации волокон, возникающие в процессе укладки кабеля.

Динамические факторы:

- вариации температуры окружающей среды – для ВОК, проложенных в грунт;
- динамические деформации волокон (ветровые нагрузки, вариации температуры окружающей среды, деформации вследствие оледенения кабеля) – для подвесных ВОК.

В данной работе из существующих факторов были рассмотрены те, которые наиболее актуальны в производстве и возможны для проведения эксперимента:

- 1) установлена зависимость значения ПМД от продольного натяжения;

2) найдена зависимость значения ПМД от угла ввода линейно-поляризованного излучения относительно основной оси распространения излучения в волокне типа Panda;

3) исследована зависимость значения ПМД волокна с регулярной намоткой на катушку от температуры;

4) построена зависимость значения ПМД от температуры в диапазоне $+60$ до -50 °С.

2. Зависимость значения ПМД от продольного натяжения

Постановка задачи: установить, существует ли зависимость значения ПМД от продольного натяжения в изотропном волокне SMF-28. Если существует зависимость, установить вид этой зависимости.

Оборудование и принадлежности: анализатор ПМД FTV-5500, широкополосный источник EXFO-5800, тестируемое волокно SMF-28.

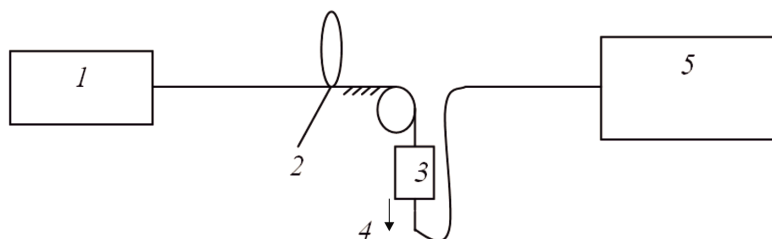


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – широкополосный источник EXFO-5800, выдающий линейно-поляризованное, модулированное по амплитуде излучение; 2 – волокно SMF-28; 3 – груз, массу которого можно изменять; 4 – направление действия силы; 5 – ПМД-анализатор FTV-5500

Схема эксперимента показана на рис. 2. Штриховкой показано место (точка) закрепления волокна SMF-28. Нагруженным являлся участок волокна длиной 1,5 м.

Излучение источника модулировано по амплитуде периодическим сигналом с частотой 1 ГГц, временная развертка которого была получена с помощью осциллографа. Для выявления частоты модуляции сигнал во временной области был подвержен быстрому преобразованию Фурье. Максимум спектральной функции на 1 ГГц свидетельствует о такой частоте модуляции [1].

Проведен эксперимент с продольным натяжением SMF-28 волокна, получен график зависимости (рис. 3) значения ПМД от отно-

сительного удлинения (продольного натяжения), при анализе которого установлена зависимость значения ПМД от продольного натяжения.

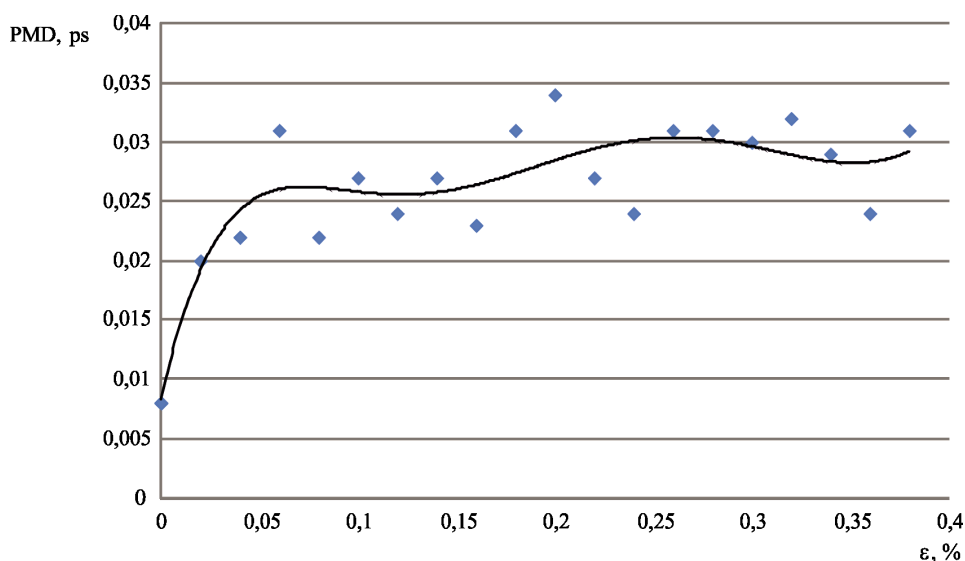


Рис. 3. Зависимость ПМД от относительного удлинения

Из графика видно (см. рис. 3), что с ростом механической нагрузки значение ПМД (задержка поляризационных составляющих) в целом увеличивается. Но нет четкой зависимости значения ПМД от относительного удлинения: значения ПМД то увеличиваются, то уменьшаются при дальнейшем увеличении механической нагрузки. Это может быть обусловлено тем, что при измерениях существовало большое количество факторов, которые сложно учесть, например макро- и микроизгибы, осевое кручение волокна и т.д. Кроме того, для достоверности результатов необходимо получить данную зависимость значения ПМД от продольного натяжения для разных длин нагруженного волокна [3].

3. Зависимость значения ПМД от угла ввода линейно-поляризованного излучения относительно основной оси распространения излучения в волокне типа Panda

Постановка задачи: найти зависимость значения ПМД от угла ввода линейно-поляризованного излучения относительно основной оси распространения излучения в волокне типа Panda (проходящей через нагружающие стержни).

Оборудование и принадлежности: анализатор ПМД FTV-5500, широкополосный источник EXFO-5800, тестируемое волокно типа Panda, моторизованный нанопозиционер.

Предполагается методика проведения эксперимента, схема которой показана на рис. 4.

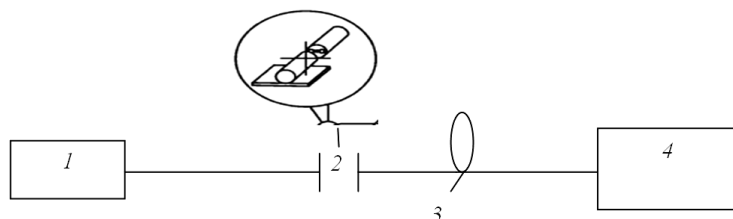


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 – широкополосный источник EXFO-5800; 2 – моторизованный нанопозиционер; 3 – волокно типа Panda; 4 – анализатор ПМД FTV-5500

На основании полученных результатов построен график зависимости значения ПМД от угла ввода линейно-поляризованного излучения θ (рис. 5).

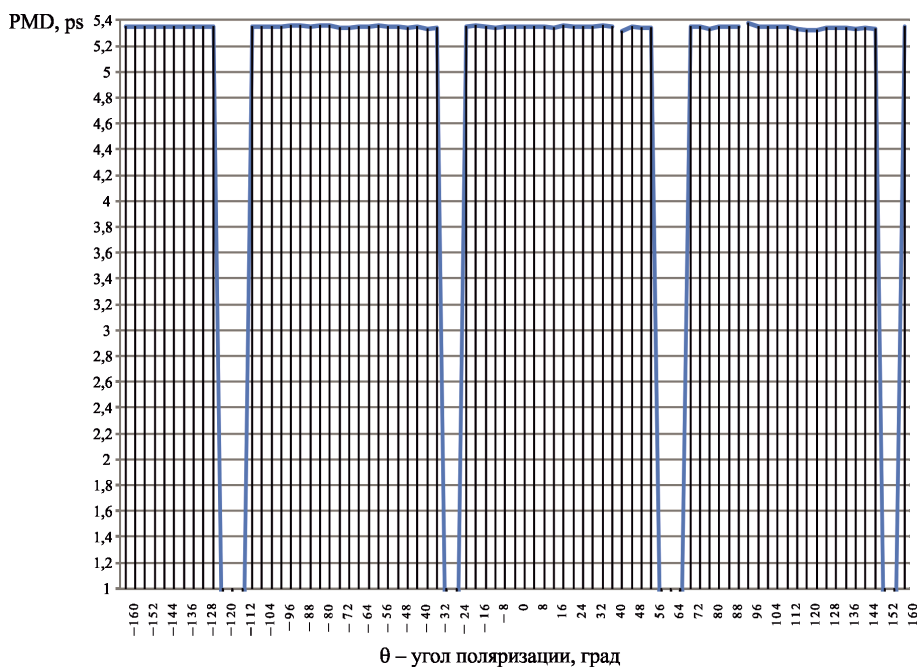


Рис. 5. Зависимость ПМД от угла ввода линейно-поляризованного излучения θ относительно основной оси распространения излучения в волокне типа Panda

Из рис. 5 видно, что значение ПМД является практически постоянным, т.е. не наблюдается четкой зависимости значения ПМД от угла ввода излучения ϑ , за исключением интервала $\vartheta \in [-4^\circ; 4^\circ]$ относительно основной или дополнительной оси распространения излучения в волокне типа Panda, где измеренное значение ПМД является нулевым. Нулевые значения (провалы) на рис. 5 можно объяснить следующим образом: значение ПМД ниже порога чувствительности прибора, и практически отсутствует перекачка энергии из одного состояния поляризации в другую, т.е. был подтвержден факт того, что волокно типа Panda является волокном, сохраняющим поляризацию [4, 5].

Таким образом, данный эксперимент позволил найти зависимость значения ПМД от угла ввода линейно-поляризованного излучения относительно основной оси распространения излучения в волокне типа Panda (проходящей через нагружающие стержни).

4. Зависимость значения ПМД от температуры

Постановка задачи: исследовать зависимость значения ПМД волокна SMF-28 с регулярной намоткой на катушку от температуры. Построить зависимость значения ПМД от температуры в диапазоне от $+60$ до -50 °C.

Оборудование и принадлежности: термокамера Espec MC-711, анализатор ПМД FTV-5500, широкополосный источник EXFO-5800, тестируемое волокно SMF-28.

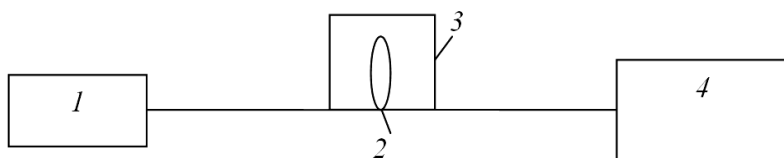


Рис. 6. Схема эксперимента: 1 – широкополосный источник EXFO-5800; 2 – катушка с волокном SMF-28; 3 – термокамера Espec MC-711; 4 – ПМД-анализатор FTV-5500

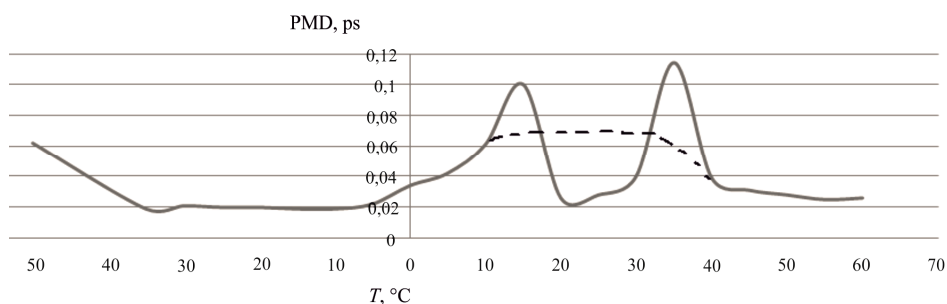


Рис. 7. Зависимость значения ПМД от температуры

В ходе эксперимента, схема которого показана на рис. 6, изучались значения ПМД волокна, намотанного на катушку, подверженную нагреву и охлаждению.

На основании полученных данных построен график (рис. 7).

Предполагается, что при изменениях температуры волокно оказывается в напряженном состоянии. Эксперимент показал: 1) при высоких температурах (от +40 до +60 °C) полимеры размягчаются, что соответствует свободной намотке волокна (ненапряженное состояние); 2) диапазон температур от 0 до +40 °C является аномальной зоной, сложной для анализа. В этом интервале температур пунктирной линией (см. рис. 7) показан результат других авторов; 3) при отрицательных значениях от -5 до -35 °C значение ПМД практически не меняется; более того, в этом диапазоне значения ПМД имеют минимальные значения; 4) при более низких температурах существует тенденция увеличения значения ПМД — это связано с тем, что защитно-упрочняющее покрытие (ЗУП) в волокне при очень низких температурах деформируется. ЗУП начинает давить на волокно, вследствие чего появляется дополнительное напряжение, и это сказывается на увеличении значения ПМД. В результате проведенных исследований выявлен диапазон температур, при которых значения ПМД минимальны и не меняются: [-5; -35] °C.

5. Выводы

1. Эксперименты с продольным натяжением волокна SMF-28 показали, что значения ПМД в целом увеличиваются по мере возрастания механической нагрузки.

2. Подтвержден факт того, что волокно типа Panda является волокном, сохраняющим поляризацию. При этом значение ПМД явля-

ется практически постоянным: не наблюдается четкой зависимости значения ПМД от угла ввода излучения ϑ , за исключением интервала $\vartheta \in [-4^\circ; 4^\circ]$ относительно основной или дополнительной оси распространения излучения, где измеренное значение ПМД является нулевым.

3. Эксперименты по температурной зависимости значения ПМД от температуры для волокна SMF-28 (с регулярной намоткой на катушку) позволили выявить диапазон температур, при которых значения ПМД минимальны и не меняются: $[-5; -35]^\circ\text{C}$. Дополнительные результаты: 1) при температурах от $+40$ до $+60^\circ\text{C}$ волокно можно считать свободным (ненапряженное состояние); 2) при более низких температурах существует тенденция увеличения значения ПМД.

Библиографический список

1. Sunnerud H.M., Karlsson C. Xie, Andrekson P.A. Polarization-mode dispersion in high-speed fiber-optic transmission systems // *J. Lightwave Technol.* – 2002. – Vol. 20. – P. 2204–2219.

2. Azwitamisi E.M. Characterization of polarization effects on deployed aerial optical fibre in South Africa. – 2008. – P. 97.

3. Хлыбов А.В. Волоконно-оптические поляриметрические датчики физических величин: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – СПб., 2004. – 215 с.

4. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М., 1999. – 672 с.

5. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. – Boston: Artech House, 1993. – 314 p.

References

1. Sunnerud H.M., Karlsson C. Xie, Andrekson P.A. Polarization-mode dispersion in high-speed fiber-optic transmission systems. *J. Lightwave Technol.*, 2002, vol. 20, pp. 2204–2219.

2. Azwitamisi E.M. Characterization of polarization effects on deployed aerial optical fibre in South Africa. 2008, p. 97.

3. Khlybov A. Volokonno-opticheskie poljarimetricheskie datchiki fizicheskikh velichin [Fiber optic polarimetric sensors of physical quantities: dissertation of Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences]. St.-Petersburg, 2004, 215 p.

4. Ivanov A. Volokonnaja optika. Komponenty, sistemy peredachi, izmerenija. [Fiber optic. The components, the transmission system, the measurement]. Moscow, 1999, 672 p.

5. Lefevre H., The Fiber-Optic Gyroscope. Boston: Artech House, 1993, 314 p.

Получено 25.09.2013

Об авторах

Вотинов Георгий Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vgn@pstu.ru).

Константинов Юрий Александрович (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nworhm@rambler.ru).

Синьков Андрей Сергеевич (Пермь, Россия) – студент кафедры общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: parkavenu18@yandex.ru).

About the authors

Votinov Georgiy Nikolaevich (Perm, Russia) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: vgn@pstu.ru).

Konstantinov Yuriy Aleksandrovich (Perm, Russia) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Assistant, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: nworhm@rambler.ru).

Sinkov Andrey Sergeevich (Perm, Russia) – Student, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: parkavenu18@yandex.ru).