

Е.В. Резак

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА
В ОДНОМОДОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ НА ПОКАЗАТЕЛЬ
ПРЕЛОМЛЕНИЯ СЕРДЕЧНИК – ОБОЛОЧКА¹

Аннотация. Рассматривается модель деформированного одномодового оптического волокна. Приводится математическая модель деформационных составляющих. Произведена оценка показателей преломления в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Найдены случаи, в которых распространение света по изогнутому волокну происходит как по одноосному кристаллу. Определено, что значения показателя преломления изогнутого оптического волокна отличаются от показателя преломления недеформированного волокна.

Ключевые слова: модель изгиба оптического волокна, математическая модель, показатель преломления деформированного волокна.

E.V. Rezak

MODELING THE IMPACT OF BENDING DEFORMATION IN A SINGLE-
MODE OPTICAL FIBER ON THE REFRACTIVE INDEX OF CORE – SHELL

Abstract. The article addresses the model of a deformed single-mode optical fiber. A mathematical model of deformation fibers is given. Cases have been found where the propagation of light along a bent fiber occurs as though along a uniaxial crystal. A certain value of the refractive index of a bent optical fiber differs from the refractive index of the undeformed fiber.

Keywords: optical fiber bending model, mathematical model, deformed fiber refractive index.

Введение

Резкий рост информатизации, приобретающий глобальный характер, требует увеличения скорости и способов доступа к получению информации, что, в свою очередь, зависит от разработки новых или модернизации действующих телекоммуникационных линий связи [1–3]. В настоящий момент высокоскоростными являются волоконно-оптические линии связи [3], где наибольшую скорость передачи обеспечивают одномодовые оптические волокна [3; 4]. Однако резкое увеличение скорости передачи информации даже в подобных сетях невозможно. Это связано с ограничениями вследствие уширения длительности бит, вызванного различной скоростью распространения составляющих импульсов светового излучения.

Для дальнейшего увеличения скорости передачи информации необходимо учитывать, во-первых, внешние факторы влияния среды [1; 2], в которую помещается волокно в процессе эксплуатации: механические вибрации, температуру [2–4], давление и влажность окружающей среды, различного вида деформации [4–8], электромагнитное поле [2], во-вторых, физические свойства самого одномодового оптического волокна. В реальных опти-

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, дополнительное соглашение № 075-02-2020-1529/1 от 21 апреля 2020 г.

Резак Елена Владимировна

аспирант, старший преподаватель кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, Тихоокеанский государственный университет, город Хабаровск. Сфера научных интересов: математическое моделирование физических процессов, проектирование и разработка программно-информационных систем. Автор более 40 опубликованных научных работ. SPIN-код: 1778-5510, AuthorID: 595857. Электронный адрес: 010931@pnu.edu.ru

ческих волокнах из-за нарушения круговой симметрии возникает небольшая анизотропия, поэтому, с учетом того, что световая энергия распределена между состояниями поляризации, различие констант распространения вызывает увеличение длительности импульса на выходе оптического волокна. И те и другие факторы оказывают влияние на затухание сигнала в оптическом волокне [1–4], на изменение показателя преломления оптического волокна, что препятствует дальнейшему увеличению скорости передачи информации [1–4].

Анизотропия оптического волокна может быть связана либо с нарушением идеальной круговой формы сердцевинки [1; 3; 5], либо с наведенным двулучепреломлением вещества [2; 4], например, из-за несимметричных напряжений в материале [1–5; 9] оптического волокна, либо из-за несовпадения геометрических центров сердцевинки и оболочки [5].

Различные авторы разделяют факторы роста анизотропии профиля волокна на две группы.

Первая группа объединяет статические факторы: несовершенство заводского процесса вытяжки волокон [1–4]; скрутка волокон при изготовлении волоконно-оптического кабеля [1–3; 5]; изгибы оптического кабеля и, как следствие, механические деформации волокон, возникающие в процессе укладки кабеля [4; 5].

Вторая группа – динамические факторы: вариации внешних факторов окружающей среды (внешнего электромагнитного поля, излучения, температуры, колебаний и др.) – для волоконных кабелей, проложенных в грунт [1–5]; динамические деформации волокон (ветровые нагрузки, вариации температуры окружающей среды, деформации вследствие оледенения кабеля) – для подвесных линий связи [1; 4].

В силу специфичности отрасли связи (большая протяженность линий, малые поперечные размеры оптических волокон, высокая стоимость материалов и работ по прокладке кабеля, усложняющих процесс исследования в реальных условиях) необходимо проводить предварительное моделирование для упрощения изучения влияния различных факторов на потери сигнала в волокне.

Нерешенность некоторых задач, связанных с поведением сигнала на изгибе линии связи, позволяет говорить о необходимости исследования влияния деформации, в частности деформации изгиба, на оптическое волокно и сигнал, проходящий по такому волокну [1–5; 9].

Модель деформации оптического волокна

Ниже предложена модель деформации изгиба оптического волокна (Рисунок 1). На модели показаны: диаметр оболочки оптического волокна (примем его значение равным $2b$, что связано с расположением оси волокна в начале координат); радиус изгиба волокна R ; φ – угол изгиба волокна.

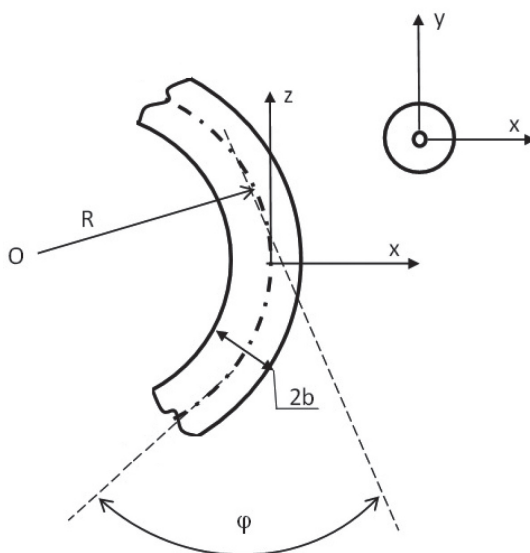


Рисунок 1. Модель изгиба одномодового оптического волокна

Источник: здесь и далее рисунки и схемы выполнены автором.

Деформация рассматривается в направлении осей X , Y , и Z . Однако необходимо отметить, что изменения, вносимые деформацией изгиба, будут вноситься составляющими в направлении осей X и Z , так как значения по оси Y в результате изгиба в пределах сердечника изменяться не будут.

Математическая модель деформационных составляющих волокна

Согласно [5; 9; 10] составляющие механического напряжения в изогнутом волокне выражаются как

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{2R^2}(x^2 - b^2), \\ \sigma_y &= 0, \\ \sigma_z &= \frac{E}{R}x,\end{aligned}\tag{1}$$

где E – модуль Юнга; x – координата относительно центральной оси волокна.

С учетом эффекта Пуассона составляющие относительных деформаций имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases},\tag{2}$$

где μ – отношение Пуассона.

Подставляя (1) в (2), получим составляющие относительных деформаций для изогнутого волокна:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{2R^2}(x^2 - b^2) - \frac{\mu}{R}x \\ \varepsilon_y = -\mu \left[\frac{1}{2R^2}(x^2 - b^2) + \frac{1}{R}x \right] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{R}x - \frac{1}{2} \frac{\mu}{R^2}(x^2 - b^2) \end{cases} \quad (3)$$

Необходимо отметить, что в системе (3) учтены все составляющие относительных деформаций и эффекта фотоупругости в направлениях координатных осей с использованием коэффициентов Поக்கельса, в отличие от классической теории, в которой не рассматриваются значения $x \ll b$ [2; 4; 5; 10]. Отсутствие квадратичных составляющих приводит к потере полной картины, происходящей в оптическом волокне под воздействием деформации изгиба.

Рассмотрим изменение показателя преломления, вносимое различными составляющими относительных деформаций (3) и эффектом фотоупругости в направлениях координатных осей δn_x , δn_y и δn_z с использованием коэффициентов Поக்கельса p_{ij} .

$$\begin{cases} \delta n_x = -\frac{n^3}{2}(p_{11}\varepsilon_x + p_{12}\varepsilon_y + p_{12}\varepsilon_z) \\ \delta n_y = -\frac{n^3}{2}(p_{12}\varepsilon_x + p_{11}\varepsilon_y + p_{12}\varepsilon_z) \\ \delta n_z = -\frac{n^3}{2}(p_{12}\varepsilon_x + p_{12}\varepsilon_y + p_{11}\varepsilon_z) \end{cases} \quad (4)$$

Подставим (3) в (4) и найдем изменение показателя преломления, а затем его значение в направлении координатных осей:

$$n_x = n + \frac{n^3}{2} \left[\frac{\mu}{R^2} \left(p_{12} - \frac{p_{11}}{2\mu} \right) x^2 + \frac{\mu}{R} \left(p_{11} + p_{12} - \frac{p_{12}}{\mu} \right) x + \frac{\mu}{R^2} \left(\frac{p_{11}}{2\mu} - p_{12} \right) b^2 \right], \quad (5a)$$

$$n_y = n + \frac{n^3}{4} \left[\frac{\mu}{R^2} \left(p_{11} - \frac{p_{12}}{\mu} + p_{12} \right) x^2 + \frac{\mu}{R} \left(2p_{11} + 2p_{12} - \frac{2p_{12}}{\mu} \right) x + \frac{\mu}{R^2} \left(\frac{p_{12}}{\mu} - p_{12} - p_{11} \right) b^2 \right], \quad (5b)$$

$$n_z = n + \frac{n^3}{4} \left[\frac{\mu}{R^2} \left(p_{11} - \frac{p_{12}}{\mu} + p_{12} \right) x^2 + \frac{\mu}{R} \left(4p_{12} - \frac{2p_{11}}{\mu} \right) x + \frac{\mu}{R^2} \left(\frac{p_{12}}{\mu} - p_{12} - p_{11} \right) b^2 \right]. \quad (5b)$$

На основании формул (5a)–(5b) с помощью программной среды MathCad был произведен расчет составляющих показателя преломления с использованием значений коэффициентов Поக்கельса и Пуассона из [2; 4; 5; 11]:

- $p_{11} = 0.121$;
- $p_{12} = 0.270$;
- $\mu = 0.164$.

Диаметр волокна $2 = 125$ мкм, значения показателей преломления сердечника $n = 1,4738$ и оболочки $n_{об} = 1,4627$ для длины волны ЛЯМБ=1310 нм взяты для оптического волокна типа TrueWave с ненулевой смещенной дисперсией при радиусе искривления оптического волокна $R = 2$ мм.

Полученные результаты отображены на Рисунке 2. Здесь x – координата относительно центральной оси одномодового оптического волокна; n – значение показателя преломления сердечника неизогнутого волокна; n_x, n_y, n_z – значения показателя преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей внутри сердечника. Точками 1 и 2 обозначены переходы изогнутого оптического волокна из двухосного состояния кристалла в одноосное.

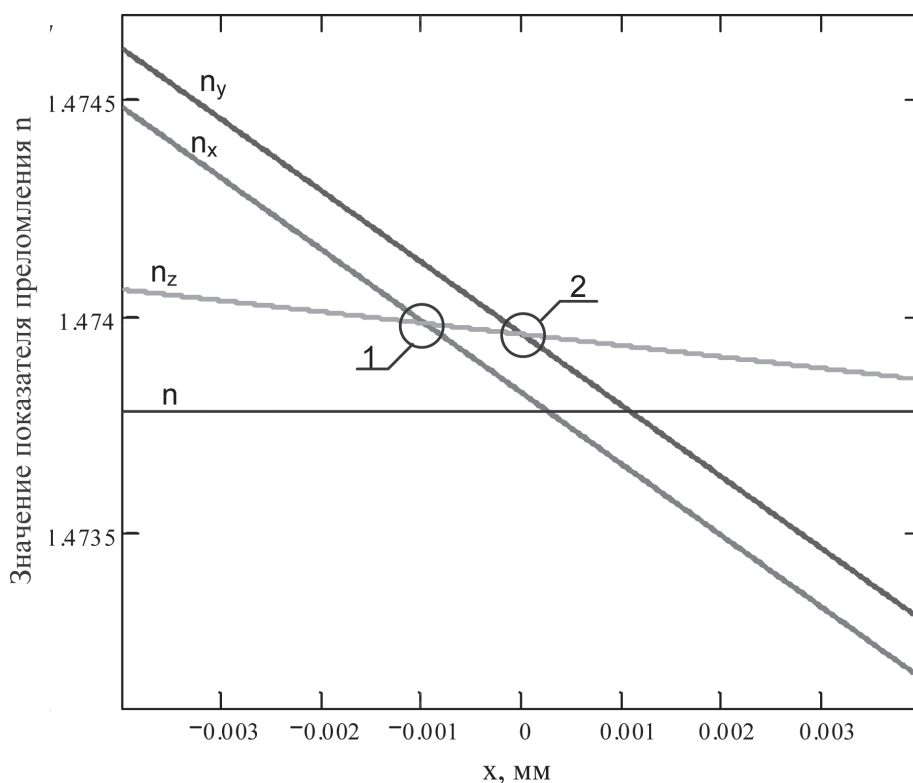


Рисунок 2. Изменение показателей преломления изогнутого волокна внутри сердечника в направлении координатных осей

На Рисунке 2 видны изменения значений показателей преломления в зависимости от изменения значения координаты x , при этом значения n_x, n_y и их разности не зависят от других координат.

Согласно полученной математической модели, результаты которой представлены на Рисунке 2, распространение излучения в изогнутом волокне происходит так же, как вну-

три двухосного кристалла. При этом существуют два таких взаимных расположения n_x , n_y и n_z (точки 1 и 2 на Рисунке 2), при которых $n_x = n_z$ и $n_y = n_z$; таким образом, в данных точках свет распространяется по деформированному волокну как по одноосному кристаллу.

Заключение

После изучения параметров изогнутого оптического волокна, математической модели влияния деформации изгиба на одномодовое оптическое волокно и полученных теоретических результатов можно сделать следующие выводы.

Показатели преломления для всех трех взаимно перпендикулярных направлений неодинаковы:

- при изгибе оптического волокна распространение света в нем происходит так же, как по двухосному анизотропному кристаллу;
- в случаях при $x_1 = 0$ и $x_2 = -1$ мкм распространение света по изогнутому волокну происходит так же, как по одноосному кристаллу;
- на оси оптического волокна ($x_1 = 0$) значения показателя преломления изогнутого оптического волокна отличаются от показателя преломления недеформированного оптического волокна, что приводит к сдвигу максимума поля моды;
- значения показателя преломления оптического волокна при изгибе и до него будут смещены $n = n_x$ относительно оптической оси, то есть на оптической оси показатель преломления при изгибе будет больше начального.

Поскольку в одномодовом оптическом волокне существует продольная составляющая электрического поля, изгиб оказывает существенное влияние на электродинамику, причем данное влияние оказывается необратимым, так как значение n_z в пределах сердечника волокна оказывается больше показателя преломления сердечника до изгиба.

Литература

1. Сляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. 3-е изд., стер. СПб. : Лань, 2016. 268 с. ISBN 978-5-8114-1028-6.
2. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети : учебное пособие. СПб. : Лань, 2016. 440 с. ISBN 978-5-8114-2105-3.
3. Субботин Е.А. Методы и средства измерения параметров оптических телекоммуникационных систем : Учебное пособие для вузов. М. : Горячая линия-Телеком, 2013. 224 с. ISBN 978-5-9912-0304-3.
4. Родина О.В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство. М. : Горячая Линия-Телеком, 2016. 400 с. ISBN 978-5-9912-0109-4.
5. Стерлинг Д.Дж. Техническое руководство по волоконной оптике: Пер. с англ. М. : Лори, 2001. 288 с. ISBN 5-85582-030-0.
6. Резак Е.В., Прокопович М.Р. Учет погрешности измерения длины оптического волокна // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2008. № 4 (11). С. 167–172. EDN KWNQHL.
7. Резак Е.В. Влияние изгиба и разрыва оптического волокна на затухание сигнала // Естественные и технические науки. 2009. № 4 (42). С. 18–20. EDN KZACIT.
8. Резак Е.В. Изменение распространения сигнала в зависимости от изгиба оптического волокна // ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых: Материалы научно-практической конференции, Хабаровск, 23–25 апреля 2020 года. Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2020. С. 39–43. EDN ITUKXK.

9. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи. М. : Радио и связь. 2003. 120 с.
10. Горшков А.Г., Трошин В.Н. Сопротивление материалов: Учеб. пос. 2-е изд., испр. М. : Физматлит. 2005. 544 с. ISBN 5-9221-0181-1.
11. Нгуен Суан Мань Изменение коэффициента преломления оптоволокна при продольном растяжении // Science Time. 2015. № 4 (16). С. 528–536. EDN TSAJLR.

References

1. Sklyarov O.K. (2016) *Volokonno-opticheskie seti i sistemy svyazi* [Fiber-optic networks and communication systems]. 3rd ed. St. Petersburg : Lan, 268 p. ISBN 978-5-8114-1028-6. (In Russian).
2. Fokin V.G. (2016) *Kogerentnye opticheskie seti* [Coherent optical networks: Tutorial]. St. Petersburg : Lan. 440 p. ISBN 978-5-8114-2105-3. (In Russian).
3. Subbotin E.A. (2016) *Metody i sredstva izmereniya parametrov opticheskikh telekommunikatsionnykh sistem* [Methods and means of measuring the parameters of optical telecommunication systems: Textbook for universities]. Moscow : Hotline-Telecom, 224 p. ISBN 978-5-9912-0304-3. (In Russian).
4. Rodina O.V. (2016) *Volokonno-opticheskie linii svyazi*. [Fiber-optic communication lines. Practical guide]. Moscow : Hot Line-Telecom. 400 p. ISBN 978-5-9912-0109-4. (In Russian).
5. Sterling D.J. (1993) *Technician's Guide to Fiber Optics*. 2nd edition. Albany, N.Y. : Delmar Publishers. 288 p. (Russian translation: Moscow : Lori, 2001. 288 p.)
6. Rezak E.V., Prokopovich M.R. (2008) Consideration of an error in measuring the length of an optical fiber. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Pacific State University]. No. 4 (11). Pp. 167–172. (In Russian).
7. Rezak E.V. (2009) Impact of bending and breaking of optical fiber on signal attenuation. *Natural and technical sciences*. No. 4 (42). Pp. 18–20. (In Russian).
8. Rezak E.V. (2020) Change in signal propagation depending on the bending of the optical fiber. In: *TOGU-Start: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya molodykh* [TOGU-Start: fundamental and applied research of young people: Proc. Sci. and Pract. Conf., Khabarovsk, 23–25 April 2020. Khabarovsk : Pacific State University. Pp. 39–43. (In Russian).
9. Grodnev I.I. (2003) *Volokonno-opticheskie linii svyazi* [Fiber-optic communication lines]. Moscow : Radio i svyaz'. 120 p. (In Russian).
10. Gorshkov A.G., Troshin V.N. (2005) *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials: study guide] 2nd ed., rev. Moscow : Fizmatlit Publ. 544 p. ISBN 5-9221-0181-1. (In Russian).
11. Nguen Suan Man (2015) Change in the refractive index of an optical fiber during longitudinal stretching. *Science Time*. No. 4 (16). Pp. 528–536. (In Russian).