

Результаты моделирования для пуассоновского и гауссова полей показали независимость вероятности связности сети в целом от типа распределения.

Результаты анализа гауссова распределения показали, зависимость связности в области сети от ее удаленности от центра рассеяния.

Список используемых источников

1. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011. 310 с.: ил. ISBN 978-5-86983-318-1.
2. Kirichek R., Paramonov A., Koucheryavy A. Flying Ubiquitous Sensor Networks as a Queueing System // 17th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT) 2015. pp. 127–132.
3. Динь Ч. З., Киричек Р. В., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Имитационная модель инсталляции сенсоров с квадрокоптера на заданной территории // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 2 (10). С. 93–100.
4. Дистель Р. Теория графов: пер. с англ. Новосибирск: Из-во Ин-та математики, 2002. 336 с. ISBN 5-86134-101-X.
5. Райгородский А. М. Модели случайных графов и их применения // Труды МФТИ. 2010. Т. 2. № 4. С. 130-140.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАЛОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С УМЕНЬШЕННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДОВОЙ ЗАДЕРЖКОЙ В «С»-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

А.В. Бурдин

В работе предложен метод моделирования градиентного профиля показателя преломления, специализированная форма которого обеспечивает уменьшение дифференциальной модовой задержки в «С»-диапазоне длин волн, кварцевых малоимодовых волоконных световодов с увеличенным, по сравнению с известными коммерческими малоимодовыми оптическими волокнами, диаметром сердцевины.

Ключевые слова: малоимодовые оптические волокна, увеличенный диаметр сердцевины, дифференциальная модовая задержка, площадь эффективного сечения, моды высшего порядка, нелинейный предел Шеннона

DESIGN OF A FEW-MODE OPTICAL FIBERS WITH DECREASED DIFFERENTIAL MODE DELAY OVER “C”-BAND

Bourdine A.

This work presents method for design of specialized refractive index profile that provides differential mode delay decreasing over “C”-band for silica few-mode optical fibers with enhanced core diameter in comparison with known commercial samples.

Keywords: few-mode optical fibers, enhanced core diameter, differential mode delay, effective area, higher order guided modes, nonlinear Shannon limit

Как известно [1, 2], нелинейный предел Шеннона фактически определил порог пропускной способности и, соответственно, ограниченные возможности применения стандартных одномодовых оптических волокон (ОВ) на протяженных волоконно-оптических линиях передачи (ВОЛП) в сочетании с высокоскоростными системами передачи на базе технологии спектрального уплотнения с плотной сеткой каналов мультиплексирования по оптическим несущим. В результате на сегодняшний день именно сильное проявление нелинейных эффектов в стандартных одномодовых ОВ является одним из ключевых факторов, ограничивающих переход на транспортные сети связи нового поколения, которые ориентированы на передачу данных со скоростью сотни Тбит/с и более [1, 2].

Одним из очевидных кардинальных способов подавления нелинейных эффектов в оптическом линейном тракте является непосредственное уменьшение нелинейности самого волоконного световода. С точки зрения ОВ традиционной конструкции это может достигаться путем увеличения диаметра сердцевинки световода [3]. Однако радикальное увеличение последнего, которое позволило бы практически нивелировать нелинейность ОВ, неизбежно приведет к появлению еще большего числа новых модовых составляющих высших порядков. В результате потребуются проведение дополнительных мероприятий по управлению дифференциальной модовой задержкой (ДМЗ) – основного фактора линейного искажения оптического сигнала при распространении по ОВ в маломодовом режиме [4].

Таким образом, при переходе на маломодовые ОВ необходим поиск компромисса между диаметром сердцевинки такого ОВ, обеспечивающего устранение нелинейности, с одной стороны, и ограниченного числа модовых составляющих, с другой стороны, при одновременной минимизации ДМЗ между ними. Так, в работе [5] на основании полученных результатов моделирования ВОЛП, функционирующей в одномодовом режиме, было показано, что при мощности сигнала в 2,5 мВт, передаче 10 каналов 40 Гбит/с на 4000 км (формат RZ-DQPSK; длина волны центрального канала 1550 нм; интервал 0,4 нм; длина участка 100 км; тип ОВ SSF G.652; компенсация дисперсии 100 %; компенсация затухания 100 %, шумы усилителя не учитываются), приемлемое значение Q-фактора достигается уже при значении эффективной площади сечения основной моды $A_{эфф} = 140 \text{ мкм}^2$.

Для перехода от эффективной площади сечения моды к диаметру сердцевинки ОВ предлагается воспользоваться разработанной ранее модификацией приближения Гаусса [6], обобщенной на случай расчета параметров передачи направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления в сердцевине, ограниченной одной внешней сплошной оболочкой. Данный метод базируется на совместном применении модификации приближения Гаусса и методе стратификации, характеризуется малой погрешностью [7, 8], обеспечивает переход к аналитической форме записи вариационного выражения, характеристического уравнения, а также производных постоянной распространения и при этом позволяет выполнять анализ ОВ с профилями доста-

точно сложной конструкции, в том числе и восстановленных непосредственно по протоколам измерений промышленных образцов ОВ, при одновременно низких требованиях к вычислительным ресурсам даже в случае перехода к направляемым модам высших порядков.

Предварительно с помощью разработанного ранее метода было получено аналитическое выражение для диаметра пятна поля моды в ближнем поле на основании хорошо известной интегральной формы записи формулы Петермана [9], которое в результате соответствующих преобразований приводится к виду:

$$\text{MFD}_{\text{NF}} = 2R_0 \sqrt{\frac{(l+m-1)!}{(m-1)!} \cdot \left[\frac{(2l+m) \cdot (l+m-1)!}{(m-1)!} - (2l+q+1) \cdot \sum_{q=0}^{2m-2} C_q (l+q)! + \right.} \quad (1)$$

$$\left. + \frac{l^2 + (l+q) \cdot (l+q-1)}{2} \cdot \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (l+q-1)! \right]^{-\frac{1}{2}},$$

где $C_q = \sum_{p=\max(0, q-m+1)}^{\min(q, m-1)} b_p^{(l, m-1)} b_{q-p}^{(l+1, m-1)}$; $D_q = \sum_{p=\max(0, q-m+1)}^{\min(q, m-1)} b_p^{(l, m-1)} b_{q-p}^{(l, m-1)}$; a – радиус сердцевины исследуемого ОВ; $R_0 = \rho_e/a$ – нормированный эквивалентный, в рамках приближения Гаусса, радиус пятна моды; ρ_e – эквивалентный радиус пятна моды; $b_q^{(l, m)}$ – коэффициенты разложения явного представления полинома Лагерра $L_m^{(l)}(x)$ в виде конечного степенного ряда [10].

Далее на основе этого же разработанного приближенного метода [6, 7, 8] был проведен анализ кварцевых градиентных ОВ традиционной конструкции при разных значениях диаметра сердцевины, которые выбирались из диапазона $d = 8 \dots 50$ мкм, с градиентным профилем показателя преломления, соответствующим типовым промышленным образцам многомодовых ОВ категории OM2+/OM3 [11], приведенный на рисунке 1. Это позволило построить зависимости площади эффективного сечения как основной, так и мод высших порядков, удовлетворяющих условию отсечки при выборе заданного значения d исследуемого ОВ, от диаметра сердцевины $A_{\text{эфф}}(d)$. Полученные зависимости модовых $A_{\text{эфф}}(d)$, представленные на рисунке 2, показали, что искомая $A_{\text{эфф}}$ достигается уже для ОВ с $d = 22$ мкм. Данное ОВ поддерживает распространение 6 направляемых мод в С-диапазоне, однако значение DMD принимает неприемлемо высокие значения. В частности, в окрестностях длины волны $\lambda = 1550$ нм данный параметр достигает $DMD = 3100$ пс/км.

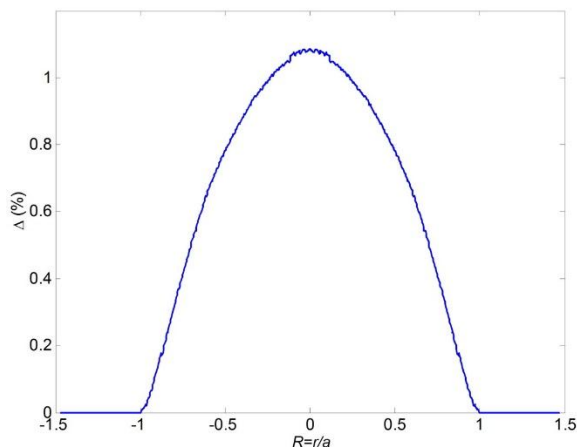


Рис. 1. Опорный градиентный профиль показателя преломления

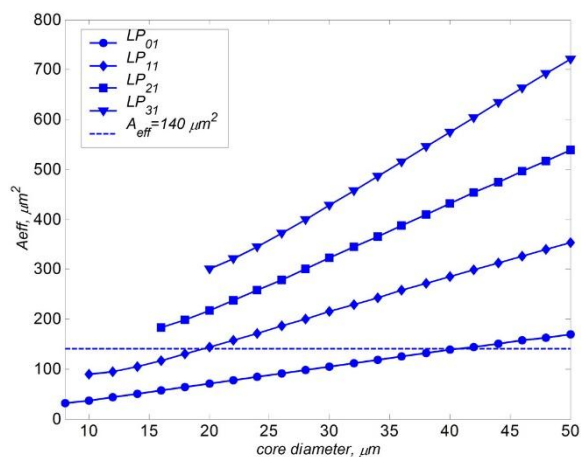


Рис. 2. Кривые зависимости площади эффективного сечения направляемых мод от диаметра сердцевины ОВ

Поэтому далее было предложено перейти к синтезу специализированной формы профиля показателя преломления для данного ОВ 22/125, которая бы позволила обеспечить искомое выравнивание задержек направляемых мод заданного порядка относительно некоторого опорного значения t_{BASE} . Как было отмечено выше, конструкция такого предлагаемого ОВ, которое, в общем случае, удовлетворяет условиям приближения слабонаправляющего оптического волновода, является традиционной и представляет собой кварцевую сердцевину диаметром 22 мкм, легированную Германием ($\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$), окруженную одной внешней сплошной оболочкой из чистого кварца SiO_2 диаметром 125 мкм. Для описания искомого профиля используется общий подход метода стратификации. Таким образом, моделируемый слабонаправляющий волоконный световод с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, ограниченным одной внешней сплошной оболочкой, рассматривается как слабонаправляющий волоконный световод с многослойным профилем показателя преломления. При этом данный профиль в области сердцевины ОВ представляется в виде конечного числа N слоев, в пределах которых значение показателя преломления остается постоянным. В результате искомая форма профиля показателя преломления в пределах области сердцевины ОВ выбирается таким образом, чтобы обеспечивалась минимизация некоторой величины F , которая описывается выражением вида:

$$F = \sum_{j=1}^6 (t_{d(j)} - t_{BASE})^2 \quad (2)$$

где $t_{d(j)}$ – искомое значение задержки j -ой направляемой моды азимутального l и радиального m порядка $LP_{lm}^{(j)}$ диаграммы ДМЗ, соответствующей синтезируемому профилю показателя преломления 6-модового ОВ 22/125.

Аргументы целевой функции F представляют собой массив значений локального параметра h_k , полностью описывающий профиль показателя прелом-

ления ОВ в области сердцевины. Для минимизации целевой функции (2) предлагается использовать симплексный метод Нелдера-Мида, эффективность которого была продемонстрирована в известных работах А. Н. Боголюбова и А. Г. Свешникова, посвященных решению задач синтеза волоконных световодов с заданными характеристиками (например, [12] и др.).

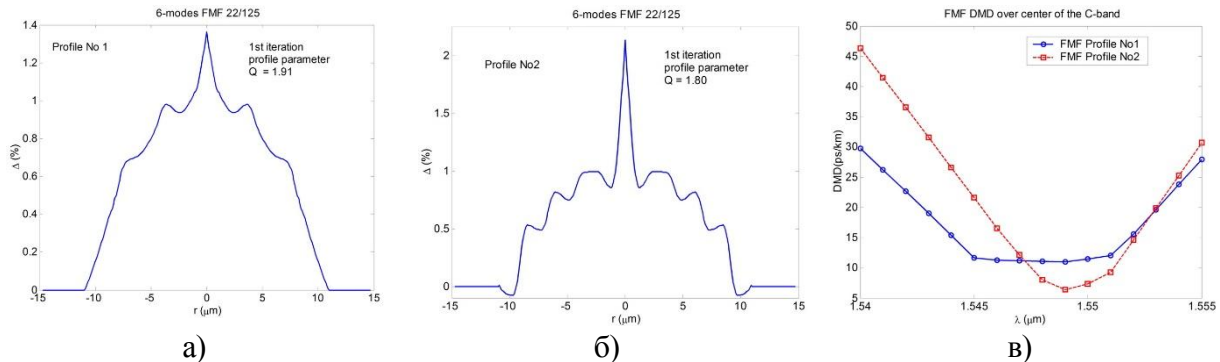


Рис. 3. Результаты синтеза профилей показателя преломления 6-модового ОВ 22/125 ($\lambda = 1550$ нм): а) и б) профили показателя преломления, полученные при разных значениях параметра градиента профиля первой итерации $Q = 1,91$ и $Q = 1,80$; в) спектральная характеристика DMD в центральной области «С»-диапазона

На рисунках 3а, б представлены результаты синтеза профиля показателя преломления 6-модового ОВ 22/125 км при разных значениях параметра профиля первой итерации $Q = 1,91$ и $Q = 1,80$. Полученные формы профилей показателя преломления для ОВ описанной конструкции обеспечивает значение ДМЗ менее 12 пс/км для всего модового состава в центральной области волнового диапазона «С» (рис. 3в). При этом площадь эффективного сечения низшей направляемых моды LP_{11} составляет более 150 мкм², а для остальных направляемых мод высших порядков – до 300 мкм², что позволяет, согласно полученным ранее результатам моделирования линейного тракта ВОЛП [5], нивелировать проявление нежелательных нелинейных эффектов.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-6001515 мол_а_дк и гранта Президента РФ в рамках научного проекта МД-9418.2016.8

Список используемых источников

1. Essiambre R.-J., Kramer G., Winzer P. J., Foschini G. J., Goebel B. Capacity limits of optical fiber networks // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2010. 28 (4). pp. 662–701.
2. Mecozzi A., Essiambre R.-J. Nonlinear Shannon limit in pseudolinear coherent systems // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2012. 30 (12). pp. 2011–2024.
3. Ricardson D. J., Fini J. M., Nelson L. E. Space-division multiplexing in optical fibers // Nature Photonics. 2013. 7 (5). pp. 354–362.
4. Bottacchi S. Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre. Theory and design methods for 10GbE systems. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2006. 654 p.
5. Andreev V. A., Burdin V. A., Bourdine A. V., Dashkov M. V., Volkov K. A. Research of potentiality of nonlinear effects mitigation by considerable increasing of optical fiber core diameter // Proceedings of SPIE. 2015. 9533. pp. 953306-1–953306-8.

6. Bourdine A. V. Method for chromatic dispersion estimation of high-order guided modes in graded index single-cladding fibers // Proceedings of SPIE. 2007. 6605. pp. 660509-1–660509-13.
7. Бурдин А. В., Дельмухаметов О. Р. Расчет параметров передачи направляемых мод высших порядков на основе комбинации модифицированного приближения Гаусса и метода конечных элементов // Телекоммуникации. 2010. № 9. С. 33–40.
8. Bourdine A. V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime // Advances in Optical Technologies. 2013. pp. 469389-1–469389-18.
9. Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres. ITU COM 15-273-E. 1996.
10. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов. М.: Физматгиз, 1962. 1100 с.
11. Бурдин А. В., Яблочкин К. А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // Инфокоммуникационные технологии. 2010. № 2. С. 22–27.
12. Боголюбов А. Н., Буткарев И. А., Свешников А. Г. Синтез волоконных световодов // Радиотехника. 2004. № 12. С. 4–12.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УВЕЛИЧЕНИЯ ДЛИНЫ ОДНОПРОЛЕТНОГО УЧАСТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

М.С. Былина, С.Ф. Глаголев, В.С. Кузнецов

Целью работы является исследование возможности увеличения длины однопролетного участка волоконно-оптической линии связи с плотным спектральным мультиплексированием без использования в оптических кабелях медных жил для дистанционного электропитания. В работе предложены и промоделированы варианты построения схем однопролетных участков с использованием эрбиевых оптических усилителей с удаленной накачкой. Полученные результаты можно использовать в качестве рекомендаций для разработчиков оптических усилителей и проектировщиков линий связи.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, оптический усилитель, оптическое волокно, однопролетный участок, оптический сигнал, излучение накачки, усиленное спонтанное излучение, спектральное мультиплексирование, оптический усилитель с удаленной накачкой

ANALYSIS OF POSSIBILITIES TO INCREASE THE LENGTH OF THE SINGLE-SPAN SECTION OF THE FIBER-OPTICAL COMMUNICATION LINE

Bylina M, Glagolev S, Kuznetsov V.

The article is devoted to the investigation of the possibilities to increase the length of the single-span section of the fiber-optical communication line with dense wavelength division multiplexing without using remote power supply. The work includes proposed and simulated variants of schemes of the single-span sections with linear optical amplifiers EDFA with remote pump signal. The results can be used as a recommendation for amplifier developers and communication line designers.

Keywords: fiber-optical communication line, optical amplifier, optical fiber, single-span section, optical signal, pump emission, amplified spontaneous emission, wavelength division multiplexing, remote optical pumped amplifier