

APPLICATION OF SYSTOLIC ORTHOGONAL TRANSFORMATIONS IN POLYNOMIAL SYSTEM OF RESIDUE CLASSES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING

Kalmikov I.A., Zinovjev A.V., Resenkov D.N., Gahov V.R.

Computational systolic model for orthogonal signal transformation in extended Galois $GF(p^v)$ fields based on polynomial system of residue classes is examined. Proved possible of constructing a failover non-positional special-processors, able to maintain a usable state at the expense of reconfiguring the structure in the event of failures.

Keywords: digital signal processing, polynomial system of residue classes, systolic orthogonal transformations, fault-tolerant system, reconfiguring the structure.

Калмыков Игорь Анатольевич, д.т.н., профессор Кафедры «Общематематические и естественнонаучные дисциплины» Ставропольского филиала (СФ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Ставрополь. E-mail: kia762@yandex.ru

Зиновьев Анатолий Владимирович, директор Ставропольского колледжа связи, г. Ставрополь. E-mail: sfpgati@yandex.ru

Резеньков Денис Николаевич, преподаватель Ставропольского института связи ракетных войск, г. Ставрополь. E-mail: kia762@yandex.ru

Гахов Владислав Романович, научный сотрудник 27 ЦНИИ МО РФ, г. Москва. E-mail: GVR7@yandex.ru

УДК 621.315

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ДИАМЕТРА СЕРДЦЕВИНЫ МНОГОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ПЕРЕДАЧУ СИГНАЛОВ В МАЛОМОДОВОМ РЕЖИМЕ

Бурдин А.В., Дельмухаметов О.Р., Макаров В.С., Яблочкин К.А.

Представлены результаты исследования влияния флуктуаций диаметра сердцевинки многомодовых оптических волокон (ММ ОВ) на характер искажений формы сигнала, распространяющегося в маломодовом режиме. Рассматривались два образца типовых градиентных ММ ОВ 50/125 со слабым и, напротив, сильным проявлением дефектов профиля показателя преломления. Для разных значений среднеквадратического отклонения радиуса сердцевинки выполнен расчет динамики маломодового сигнала на основе разработанной модели кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП в временной области. Показано, что флуктуации диаметра сердцевинки ММ ОВ оказывают наиболее существенное влияние на искажение формы импульса при его распространении в волокнах с сильным проявлением технологических дефектов профиля показателя преломления.

Ключевые слова: многомодовое оптическое волокно с градиентным профилем показателя преломления, маломодовый режим, моды высших порядков, хроматическая дисперсия, дифференциальная модовая задержка.

Введение

Задачи моделирования процессов, возникающих при распространении оптических сигналов по многомодовым оптическим волокнам (ОВ) в маломодовом

режиме, в полном объеме возникли и были сформулированы в середине 90-х годов на стадии разработки стандарта IEEE 802.3z (Gigabit Ethernet) [1-2]. Наиболее полно данное направление представлено в монографии [3] и публикациях авторов [4-10], непосредственно принимавших участие в разработке стандартов IEEE 802.3z и 802.3ae. Данные работы, в первую очередь, были ориентированы на теоретическое исследование эффекта дифференциальной модовой задержки (DMD – Differential Mode Delay) как основного фактора искажений сигналов, ограничивающих совместное применение лазеров и многомодовых ОВ. В частности, проявлений DMD в зависимости от условий ввода излучения выхода лазера в сердцевину ОВ и характерных дефектов градиентного профиля реальных волокон. Отдельное внимание уделяется имитационному моделированию процессов формирования, преобразования и обработки сигналов в передающих и приемных оптических модулях активного оборудования систем передач. Поскольку по стандарту IEEE 802.3z длина линии не должна превышать 500 м, а скорость передачи – 10 Гбит/с, в указанных работах, как правило, пренебрегают взаимодействиями и смешением мод, обусловленными нерегулярной структурой ОВ, микро- и макроизгибами волокон. В отдельных случаях вводят поправочные коэффициенты и «штрафы»

по так называемому модовому шуму. Однако и здесь акцент делается в основном на перераспределении мощности между модовыми группами при прохождении оптического сигнала через соединения волокон/патчкордов в распределительных боксах или оконечных устройствах коммутации.

Вместе с тем, в [5; 11-14] при сопоставлении данных экспериментальных измерений DMD на образцах ОВ и резервных волокнах линий передачи было выявлено, что в отдельных случаях взаимодействие и смещения мод в линии оказывают существенное влияние на характер искажений импульса, обусловленных DMD. Очевидно, что с увеличением скорости передачи и протяженности линии данный эффект будет проявляться сильнее.

Еще одно направление, в связи с которым возникает необходимость учета взаимодействия и смещения мод в многомодовой оптической линии передачи при моделировании процессов распространения в маломодовом режиме – оценивание значений модовой задержки по результатам сравнения формы модельного и измеренного оптических импульсов. Так, еще в работе [15] была продемонстрирована возможность использования для этих целей метода WKВ с последующим простым наложением составляющих сигнала.

Одна из наиболее существенных причин проявления связей мод в ОВ – изменения диаметра сердцевин [16]. Предлагаемая работа посвящена теоретическим исследованиям влияния данного фактора на характер искажений формы сигнала, распространяющегося по традиционным телекоммуникационным кварцевым слабнонаправляющим многомодовым ОВ с градиентным профилем показателя преломления в маломодовом режиме передачи.

Решение задачи о длинном нерегулярном волноводе, параметры которого меняются вдоль его оси случайным образом, классическими методами в строгой постановке [17-23] требует значительных вычислительных ресурсов и труднореализуемо. Поэтому для приближенного описания такой волноведущей структуры использовали модель кусочно-регулярной линии передачи [21-23] с кварцевыми слабнонаправляющими многомодовыми ОВ с осесимметричным градиентным профилем показателя преломления и одной внешней сплошной оболочкой на регулярных участках. Полагали, что волокна на границах регулярных участков соединены строго соосно.

Моделирование процессов распространения оптического излучения в такой линии требует выполнения расчетов параметров мод, включая групповую скорость и коэффициент хроматической дисперсии, для каждого регулярного отрезка ОВ с градиентным профилем сложной формы, а также коэффициентов связи мод на каждом стыке таких регулярных ОВ. Учет сложной

формы профиля (наличие дефектов по оси ОВ и т.п.) является обязательным условием при моделировании маломодового режима передачи многомодовой ВОЛП. При этом моделирование случайного характера флуктуаций диаметра сердцевин ОВ приводит к необходимости многократных вычислений указанных выше параметров. Как следствие, используемые методы расчета параметров мод в ОВ и их соединениях должны предъявлять сравнительно низкие требования к вычислительным ресурсам.

В данной работе был использован модифицированный метод приближения Гаусса, обобщенный на случай расчета параметров передачи направляемых мод произвольных порядков, распространяющихся в многомодовых ОВ с осесимметричным профилем показателя преломления произвольной формы и одной внешней сплошной оболочкой [24]. Метод отличается относительно малыми погрешностями для ОВ с профилями достаточно сложной конструкции – в частности, профилям реальных градиентных многомодовых ОВ, которые отличаются локальными дефектами и флуктуациями. При этом обеспечивается переход к аналитической форме записи выражений для базовых параметров передачи модовых компонентов сигнала, а также коэффициентов связи мод на границах регулярных участков, что существенно снижает время вычисления даже в случае оценки характеристик мод высших порядков.

Приложение модифицированного приближения Гаусса в задачах моделирования линейного тракта кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП

Приближение Гаусса базируется на аппроксимации полей мод волоконного световода с некоторым заданным профилем показателя преломления полями мод волоконного световода с идеальным неограниченным параболическим профилем показателя преломления [19]:

$$F_m^{(l)}(R) = \left(\frac{R}{R_0}\right)^l L_{m-1}^{(l)}\left(\frac{R^2}{R_0^2}\right) \exp\left(\frac{-R^2}{2R_0^2}\right), \quad (1)$$

где $R = r/a$ – нормированный радиус; r – радиальная координата; $R_0 = \rho_0/a$ – нормированный радиус пятна моды; ρ_0 – радиус пятна моды; $L_{m-1}^{(l)}$ – полином Лагерра; l и m – азимутальный и радиальный порядки моды LP_{lm} соответственно.

Указанная аппроксимация сводится к определению эквивалентного радиуса пятна моды R_0 путем решения характеристического уравнения, которое выводится из вариационного выражения для посто-

янной распространения, записанного для исследуемого слабонаправляющего волоконного световода с заданным профилем. Найденный параметр является в рамках данного приближения базовым и полностью определяет искомые характеристики моды.

В отличие от известных решений на основе приближения Гаусса [19; 25-29], ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления рассматривается как волоконный световод с многослойным профилем показателя преломления. При этом профиль в интервале от центра сердцевины до внешней оболочки исследуемого волокна представляется в виде конечного числа N слоев, в пределах которых значение показателя преломления остается постоянным [23-24]:

$$n(R) = \begin{cases} n_k, & \frac{k}{N} \leq R \leq \frac{k+1}{N}, \quad 0 \leq k \leq N-1; \\ n_N, & 1 < R \leq +\infty, \end{cases} \quad (2)$$

а функция произвольного профиля может быть записана в следующем виде:

$$f(R) = \begin{cases} h_k, & \frac{k}{N} \leq R \leq \frac{k+1}{N}, \quad 0 \leq k \leq N-1; \\ 1, & 1 < R \leq +\infty, \end{cases} \quad (3)$$

где $h_k = \frac{n_0^2 - n_k^2}{n_0^2 - n_N^2}$ – параметр профиля; n_0 – максимальное значение показателя преломления; n_k – показатель преломления k -го слоя ($k = 0; 1; 2 \dots N$), при этом показатель преломления и функция профиля связаны следующим соотношением [19-23]:

$$n^2(R) = n_0^2 [1 - 2\Delta f(R)], \quad (4)$$

где $\Delta = (n_0^2 - n_N^2)/2n_0^2$ – параметр высоты профиля; n_N – показатель преломления внешней сплошной оболочки.

Подобное представление профиля исследуемого ОВ позволяет в результате выполнения необходимых преобразований, подробно изложенных в [24], перейти от известной [19] интегральной формы записи вариационного выражения для квадрата параметра моды в сердцевине U^2 к аналитической, представляющей собой конечные вложенные суммы вида:

$$U^2 = \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \times \left\{ \frac{M}{R_0^2} + V^2 \left[X_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1 - X_2) \right] \right\}, \quad (5)$$

$$\text{где } X_0 = \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}};$$

$$X_1 = \exp\left(-\frac{k^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \frac{k^{2p}}{N^{2p}};$$

$$X_2 = \exp\left(-\frac{(k+1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \frac{(k+1)^{2p}}{N^{2p}};$$

$$M = \frac{(l+m-1)!(3l+2m-1)}{(m-1)!} +$$

$$+ 2l^2 \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (q+l-1)! - 4l \sum_{q=0}^{2m-2} C_q (q+l)!;$$

$$D_q = \sum_{p=\max(0, q-m+1)}^{\min(q, m-1)} a_q(L_{m-1}^{(l)}) a_{q-p}(L_{m-1}^{(l)});$$

$$C_q = \sum_{p=\max(0, q-m+1)}^{\min(q, m-1)} a_q(L_{m-1}^{(l)}) b_{q-p}(L_{m-1}^{(l+1)});$$

$a_q(L_{m-1}^{(l)})$, $b_q(L_{m-1}^{(l+1)})$ – коэффициенты полиномов Лагерра $L_{m-1}^{(l)}$ и $L_{m-1}^{(l+1)}$, соответственно, определяемые из формулы явного выражения полинома Лагерра [30]:

$$L_m^{(l)}(x) = \sum_{q=0}^m a_q x^q = \quad (6)$$

$$= \sum_{q=0}^m (-1)^q \frac{(l+m)!}{(l+q)!(m-q)!q!} x^q;$$

$V = kan_0 \sqrt{2\Delta}$ – нормированная частота; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны.

В рамках общего алгоритма приближения Гаусса [19] базовый параметр аппроксимации – эквивалентный нормированный радиус пятна моды – определяется путем решения характеристического уравнения вида

$$\frac{\partial U^2}{\partial R_0} = 0. \quad (7)$$

В результате дифференцирования (5) с учетом (7) и выполнения необходимых преобразований характеристическое уравнение приводится к следующему виду:

$$-M + V^2 \left[S_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (S_1 - S_2) \right] = 0, \quad (8)$$

где $S_0 = \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} (1 - pR_0^2)$;

$$S_1 = \exp\left(-\frac{k^2}{N^2 R_0^2}\right) \times \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \frac{k^{2p}}{N^{2p}} \left(\frac{k^2}{N^2} - pR_0^2\right);$$

$$S_2 = \exp\left(-\frac{(k+1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \times \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \frac{(k+1)^{2p}}{N^{2p}} \left(\frac{(k+1)^2}{N^2} - pR_0^2\right).$$

Таким образом, анализ многомодового слабо-направляющего волоконного световода с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, ограниченным одной внешней сплошной оболочкой, включает в себя выполнение следующих этапов. Предварительно профиль исследуемого ОВ задается в виде N слоев с помощью (2)-(4). Затем для моды заданного порядка LP_{lm} в результате численного решения уравнения (8) определяется нормированный эквивалентный радиус пятна моды R_0 , который должен удовлетворять условию существования направляемых мод [19-22]:

$$kn_N < \beta \leq kn_0, \tag{9a}$$

где β – постоянная распространения, и неравенству

$$P_{co}^{(lm)} \geq 0,5; \tag{9б}$$

где $P_{co}^{(lm)}$ – нормированная мощность моды, переносимая в сердцевине ОВ [19]. Данный параметр в рамках приближения слабонаправляющего оптического волновода [19] с учетом (1)-(4) описывается выражением вида [31]:

$$P_{co}^{(lm)} = \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \times \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (l+q)! \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{p=0}^{l+q} \frac{1}{p! R_0^{2p}} \right]. \tag{10}$$

Подстановка R_0 , удовлетворяющего (9а) и (9б), в выражение (3) позволяет оценить параметр моды в сердцевине U , который непосредственно

связан с постоянной распространения β следующим известным соотношением [19-22]:

$$\beta^2 = k^2 n_0^2 - \frac{U^2}{a^2}. \tag{11}$$

Для оценки значения групповой скорости направляемой моды заданного порядка предлагается воспользоваться известным соотношением [19-22], предварительно переписанным относительно первой производной квадрата постоянной распространения:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \beta} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} = -\frac{4\pi\beta c}{\lambda^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \beta^2} = -\frac{k^2 \beta c}{\pi} \frac{\partial \lambda}{\partial \beta^2}, \tag{12}$$

где ω – угловая частота; c – скорость света в вакууме.

Далее в результате дифференцирования (11) выражение для первой производной постоянной распространения приводится к виду:

$$\frac{\partial \beta^2}{\partial \lambda} = -\frac{2k^2 n_0^2}{\lambda} + k^2 \frac{\partial n_0^2}{\partial \lambda} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial U^2}{\partial \lambda}. \tag{13}$$

При этом в рамках предложенной модификации приближения Гаусса первая производная квадрата параметра моды в сердцевине, полученная в результате дифференцирования (5), имеет следующий вид:

$$\frac{\partial U^2}{\partial \lambda} = \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \times \left\{ -\frac{2M}{R_0^3} \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} + \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} \left[X_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1 - X_2) \right] + 2V^2 X_0^{(1)} \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} + V^2 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\partial h_k}{\partial \lambda} (X_1 - X_2) + 2V^2 \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1^{(1)} - X_2^{(1)}) \right\}; \tag{14}$$

где $X_0^{(1)} = \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p+3}} (1 - pR_0^2)$;

$$X_1^{(1)} = \exp\left(-\frac{k^2}{N^2 R_0^2}\right) \times \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p+3}} \frac{k^{2p}}{N^{2p}} \left(\frac{k^2}{N^2} - pR_0^2\right);$$

$$X_2^{(1)} = \exp\left(-\frac{(k+1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \times \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)! (k+1)^{2p}}{p! R_0^{2p+3} N^{2p}} \left(\frac{(k+1)^2}{N^2} - pR_0^2\right).$$

В свою очередь, полученное в результате дифференцирования уравнения (8) и выполнения соответствующих преобразований аналитическое выражение, описывающее первую производную нормированного эквивалентного радиуса пятна моды, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial R_0}{\partial \lambda} = \frac{S_0 \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} + \sum_{k=0}^{N-1} \left[(S_0 - S_1) \left(h_k \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} + V^2 \frac{\partial h_k}{\partial \lambda} \right) \right]}{-2V^2 \cdot \left[S_0^{(1)} + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (S_1^{(1)} - S_2^{(1)}) \right]}, \quad (15)$$

где

$$S_0^{(1)} = \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \times \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p+3}} \left[(1 - pR_0^2)^2 - pR_0^4 \right];$$

$$S_1^{(1)} = \exp\left(-\frac{k^2}{N^2 R_0^2}\right) \times \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)! k^{2p}}{p! N^{2p} R_0^{2p+3}} \left[\left(\frac{k^2}{N^2} - pR_0^2\right)^2 - pR_0^4 \right];$$

$$S_2^{(1)} = \exp\left(-\frac{(k+1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \times \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)! (k+1)^{2p}}{p! N^{2p} R_0^{2p+3}} \left[\left(\frac{(k+1)^2}{N^2} - pR_0^2\right)^2 - pR_0^4 \right].$$

Аналогичным образом, переписав известное [19-22] выражение для коэффициента хроматической дисперсии относительно производных квадрата постоянной распространения:

$$D = -\frac{\lambda}{2\pi c} \left(2 \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} + \lambda \frac{\partial^2 \beta}{\partial \lambda^2} \right) = -\frac{\lambda^2}{4\pi \beta c} \left[\frac{2}{\lambda} \frac{\partial \beta^2}{\partial \lambda} + \frac{\partial^2 \beta^2}{\partial \lambda^2} - \frac{1}{2\beta^2} \left(\frac{\partial \beta^2}{\partial \lambda} \right)^2 \right], \quad (16)$$

в результате повторного дифференцирования (13):

$$\frac{\partial^2 \beta^2}{\partial \lambda^2} = k^2 \left(\frac{\partial^2 n_0^2}{\partial \lambda^2} + \frac{6n_0^2}{\lambda^2} - \frac{4}{\lambda} \frac{\partial n_0^2}{\partial \lambda} \right) - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 U^2}{\partial \lambda^2}, \quad (17)$$

а также повторного дифференцирования (14) и (15), можно получить выражения, связывающие параметр D с первой и второй производными квадрата параметра моды в сердцевине $\partial U^2 / \partial \lambda$, $\partial^2 U^2 / \partial \lambda^2$ и нормированного эквивалентного радиуса пятна моды $\partial R_0 / \partial \lambda$, $\partial^2 R_0 / \partial \lambda^2$. Эти формулы достаточно громоздкие, имеют вид конечных вложенных сумм и представлены в полном объеме в работе [24].

Спектральную зависимость материалов сердцевины и оболочки кварцевых многомодовых ОВ предлагается аппроксимировать хорошо известной формулой Селлмейера [19-22]. Однако и в этом случае выполняется переход к производным квадрата показателя преломления $\partial n^2 / \partial \lambda$; $\partial^2 n^2 / \partial \lambda^2$. Это существенно упрощает вывод выражений для производных параметров профиля – например, Δ и h_k , а также нормированной частоты V .

Наконец, использование приближения Гаусса обеспечивает переход к аналитической форме записи коэффициентов связи мод [31] на границах регулярных участков через интеграл перекрытия полей падающей и возбуждаемой мод [32]:

$$\eta_{pq} = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(l+p)\Gamma(l+q)} (2\rho_p \rho_q)^{2l+2} \times \left[\frac{(\rho_p - \rho_q)^{p+q-2}}{(\rho_p^2 + \rho_q^2)^{p+q+l-1}} \right]^2 \left\{ \sum_{k=0}^{\min(p-1, q-1)} (-1)^k \times \frac{\Gamma(p+q+l-k-1)}{\Gamma(p-k)\Gamma(q-k)k!} \left(\frac{\rho_p^2 + \rho_q^2}{\rho_p^2 - \rho_q^2} \right)^k \right\}^2, \quad (18)$$

где p и q – радиальные порядки падающей и возбуждаемой моды соответственно; ρ_p и ρ_q – радиусы пятна моды p и q соответственно; Γ – гамма-функция.

Таким образом, предложенная модификация приближения Гаусса позволяет реализовать модель линейного тракта кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП во временной области. Волокно разбивается на регулярные участки, в пределах которых параметры световода остаются постоянными. Предполагается, что каждая направляемая мода, возбужденная источником излучения (или падающей на границу регулярного участка модовой компонентой сигнала), переносит оптический импульс гауссовой формы. Также предполагается, что в пределах регулярного участка отсутствуют процессы взаимодействия и смешения

мод. Сигнал претерпевает искажение за счет разброса значений групповых скоростей модовых компонентов, или, иными словами, благодаря проявлению DMD. Кроме того, за счет хроматической дисперсии происходит увеличение длительности импульса, переносимого каждой возбужденной направляемой модой, распространение которой поддерживается на заданном регулярном участке ОВ. Перераспределение мощности внутри модового состава сигнала за счет нерегулярной структуры реального ОВ учитывается путем оценки значений коэффициентов связи мод на стыках регулярных участков. Следует отметить, что в рамках данной работы рассматриваются только направляемые моды, представляющие наибольший интерес с точки зрения исследования динамики импульса в нерегулярном многомодовом ОВ. Тем не менее, потери мощности сигнала за счет преобразования направляемых мод высших порядков в вытекающие, а также на отражение фактически учитываются при расчете коэффициентов связи на стыках регулярных участков.

Результаты расчета

Теоретические исследования влияния флуктуаций диаметра сердцевинки на характер искажения формы передаваемого в маломодовом режиме сигнала были выполнены для двух образцов кварцевых многомодовых ОВ 62,5/125. Распределение значений показателя преломления задавалось в соответствии с протоколами измерения профилей реальных ОВ, воспроизведенных на рис. 1. Образцу «1» соответствует слабый центральный дефект, в то время как для образца «2», напротив, характерны высокие значения радиуса и глубины провала, а также флуктуации профиля в центральной области сердцевинки.

Рассматривалось распространение оптического импульса гауссовой формы исходной длительности 200 пс, возбуждаемого источником VCSEL на длине волны $\lambda = 850$ нм и шириной спектра излучения $\Delta\lambda = 1$ нм, по указанным образцам многомодовых ОВ протяженностью 500 м каждый. Ввод сигнала в сердцевину ОВ с выхода VCSEL осуществлялся в условиях осевого смещения $d = 2$ мкм, при этом, согласно [33-34], исходный импульс содержал следующие пять модовых компонентов: LP_{01} , LP_{02} , LP_{11} , LP_{12} , LP_{21} , LP_{31} .

Длина регулярного участка для обоих образцов волокон выбиралась равной 5 м. В работе [16] было показано, что флуктуации диаметра сердцевинки вдоль продольной оси многомодовых ОВ подчиняются нормальному закону распределения. Предполагалось, что форма профиля при изменении диаметра сердцевинки остается неизменной. Параметры профилей, задавались в интервале $r = 0 \dots a$ с помощью 120 точек. В качестве среднего значения использовались исходные

данные, представленные на рис. 1, а дисперсия выбиралась равной $3,75 \cdot 10^{-4}$. Аналогичным образом задавались флуктуации диаметра сердцевинки ОВ: среднее значение соответствовало номинальному диаметру 62,5 мкм, дисперсия принималась равной $\sigma_d = 1$ мкм и 0,1 мкм. При этом полученные значения не выходили за границы удвоенного максимально допустимого отклонения диаметра от номинального, которое для подавляющего большинства многомодовых ОВ, согласно спецификациям [35], не превышает ± 3 мкм.

Анализ регулярных многомодовых волоконных световодов, составляющих модельные образцы ОВ, с помощью модификации приближения Гаусса показал, что максимальное значение радиального порядка направляемой моды, удовлетворяющей условиям (9а) и (9б), не превышает $m = 6$ как в случае $\sigma_d = 1$ мкм, так и $\sigma_d = 0,1$ мкм для обоих образцов ОВ. Соответственно, последующий расчет параметров передачи направляемых мод для каждого из регулярных участков, включающий в том числе оценку групповой скорости и коэффициента хроматической дисперсии, проводился для мод $LP_{1l} \dots LP_{l6}$, где $l = 0 \dots 3$.

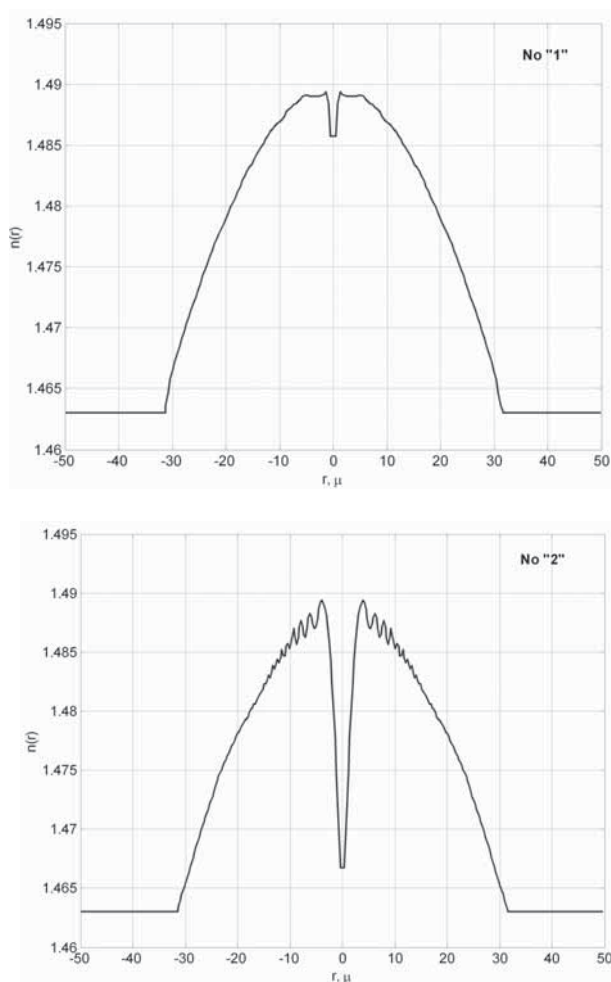


Рис. 1. Профили показателя преломления исследуемых образцов градиентных многомодовых ОВ 62,5/125

На рис. 2 представлены результаты расчета диаграмм динамики возбуждаемого при указанных условиях оптического импульса при его распространении по образцам ОВ «1» и «2» длиной 500 м для разной степени флуктуации диаметра сердцевины. На рис. 3 приведены модельные формы сигналов на выходе ВОЛП с многомодовыми ОВ «1» и «2».

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что в обоих случаях формы сигналов, построенные без учета нерегулярности ОВ и, соответственно, с учетом процессов взаимодействия и смешения модовых компонентов, различаются достаточно сильно.

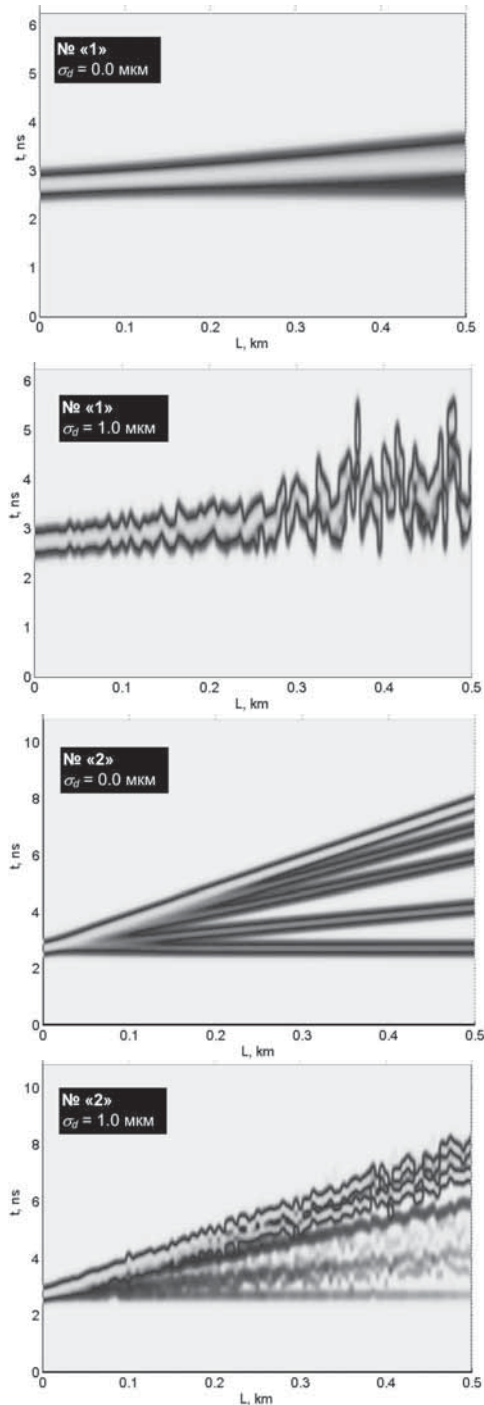


Рис. 2. Диаграммы распространения сигналов

При этом для образца «2» с более ярко выраженными дефектами профиля показателя преломления отмеченное расхождение проявляется сильнее. С точки зрения сравнения формы импульсов, полученных для разных значений параметра σ_d , для ОВ «1» наблюдается практически полное совпадение, в то время как для волокна «2» можно зафиксировать не только отличие амплитуд модовых составляющих, но и появление дополнительной компоненты сигнала.

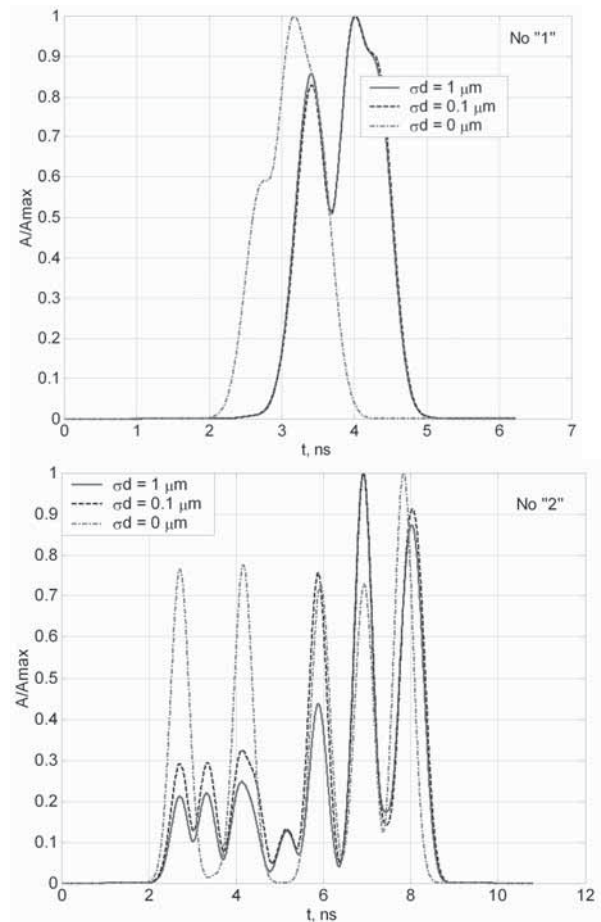


Рис. 3. Формы импульсов на выходе образцов ОВ «1» и «2» длиной 0,5 км для разных значений СКО

Заключение

В работе представлены результаты исследований влияния степени флуктуаций диаметра сердцевины ОВ на характер искажений сигнала в многомодовой ВОЛП, работающей в маломодовом режиме, с учетом DMD, хроматической дисперсии мод высшего порядка и связей модовых компонентов. Предложена модель кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП, в основе которой расчет параметров передачи направляемых мод на каждом регулярном участке осуществляется

с помощью предложенной модификации приближения Гаусса, обобщенной на случай анализа слабонаправляющих многомодовых ОВ с произвольным осесимметричным градиентным профилем показателя преломления, ограниченным одной сплошной внешней оболочкой. Метод обеспечивает низкую погрешность вычислений характеристик направляемых мод произвольного порядка при сравнительно низких требованиях, предъявляемых к вычислительным ресурсам. Так, время вычисления параметров 24 мод LP_{lm} ($l = 0 \dots 3$; $m = 1 \dots 6$) на каждом из 100 регулярных участков, составляющих ОВ длиной 500 м при задании профиля с помощью 120 точек и последующем построении диаграммы распространения сигнала не превысило 15 мин. (Intel® Pentium® M740; 1,73 ГГц; RAM 512 Мб).

Исследования были выполнены для двух образцов многомодовых ОВ, отличающихся параметрами дефектов профиля показателя преломления. Показано, что изменение диаметра сердцевины ОВ оказывает наиболее существенное влияние на искажение формы импульса при его распространении в ОВ с сильным проявлением DMD, которое обусловлено наличием значительных технологических дефектов профиля показателя преломления. Напротив, для более «качественного» образца ОВ со слабо выраженным центральным провалом профиля существенных расхождений между формой импульса на выходе ВОЛП для разных значений параметра σ_d не наблюдалось. В то же время для обоих образцов волокон были выявлены значительные расхождения между формой сигналов, построенных без учета нерегулярности ОВ и, соответственно, с учетом процессов взаимодействия и смешения модовых компонентов. Как и в предыдущем случае, у образца с более сильно выраженным дефектом профиля расхождение больше.

Литература

1. Cunningham D., Nowell M., Hanson D. Proposed worst case link model for optical physical media dependent specification development // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, January 1997 meeting. – 1997.
2. Abbot J.S., Hackert M.J., Harshbarger D.E., Cunningham D.G., Di Minico Ch.T., White I.H. Analysis of multimode fiber behavior with laser sources in the development of the Gigabit Ethernet fiber optic specifications // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, November 1998 meeting. – 1998.
3. Bottachi S. Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre. Theory and design methods for 10GbE systems. West Sussex: Wiley, 2006. – 654 p.
4. Cunningham D.G., Nowell M., Hanson D.C., Kazovsky L. The IEEE 802.3z worst case link model for optical physical media dependent specification // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, February 1998 meeting. – 1998.
5. Raddatz L., White I.H., Cunningham D.G., Nowell M.C. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1998. Vol. 16(3). – P. 324-331.
6. Webster M., Raddatz L., White I., Cunningham D. A statistical analysis of conditioned launch for Gigabit Ethernet links using multimode fiber // IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 17(9)? 1999. – P. 1532-1541.
7. Pepeljugoski P., Golowich S., Ritger A., Kolesar P., Risteski A. Modeling and simulation of next-generation multimode fiber links // IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 21(5), 2003. – P. 1242-1255.
8. Pepeljugoski P., Kuchta D. Design of optical communications data links // IBM Journal of Research and Development. Vol. 47(2/3), 2003. – P. 223-237.
9. Shaulov G., Whitlock B. Multimode fiber communication system simulation // IEEE 802.3aq Task Force. Presentation materials, July 2004 meeting. – 2004.
10. Morikuni J., Mena P., Whitlock B.K., Scarmozzino R. Link-Level Design, Analysis, and Simulation of Multimode Data Communication Systems // 19th Annual National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC). Technical Proceedings, 2003. – P. 858-867.
11. Cunningham D., Nowell M. EMB, WCMB and ROFL Testing // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, July 1997 meeting. – 1997.
12. Aronson L., Buckman L. Guide to HP Labs ROFL/OFL fiber measurements from 12/15/97 – 12/19/97 // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, February 1998 meeting. – 1998.
13. Risteski A., Borich E., Ewen J., Tierno J., Pepeljugoski P. DMD measurements and equalization simulations for 62,5- and 50-mm legacy multimode fibers at 1300 nm // IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 16(8), 2004. – P. 1960-1962.

14. Бурдин А.В. Дифференциальная модовая задержка кварцевых многомодовых оптических волокон разных поколений // Фотон-Экспресс. Т. 69/70, № 5/6, 2008. – С. 20-22.
15. Ramskov-Hansen J.J., Nicolaisen E. Propagation in graded-index fibers: comparison between experiment and three theories // Applied optics. Vol. 17(17), 1978. – P. 2831-2835.
16. Krawarik P., Watkins L. Fiber geometry specifications and its relations to measured fiber statistics // Applied optics. Vol. 17(24), 1978. – P. 3984-3989.
17. Кацелененбаум Б.З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: Мир, 1961. – 216 с.
18. Барыбин А.А. Электродинамика волноводящих структур. Теория возбуждения и связи мод. М.: Физматлит, 2007. – 512 с.
19. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
20. Маркузе Д. Оптические волноводы. Пер. с англ. М.: Мир, 1974. – 576 с.
21. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. – 656 с.
22. Okamoto K. Fundamentals of optical waveguides. San Diego: Academic Press, 2000. – 430 p.
23. Бурдин В.А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи. М.: Радио и связь, 2002. – 312 с.
24. Bourdine A.V. Method for chromatic dispersion estimation of high-order guided modes in graded index single-cladding fibers // Proceedings of SPIE. Vol. 6605, 2006. – P. 660509-1-660509-13.
25. Mishra P., Hosain S., Goyal C., Sharma A. Scalar variational analysis of single-mode, graded core, W-fibers // Opt. Quantum. Electron. MTT-30, 1982. – P. 1-5.
26. Peng G., Ankiewicz A. New evanescent field approximation for weakly guiding fibers // IEEE Proc. J. Vol. 138, 1991. – P. 33-38.
27. Hosain S., De Fornel F., Goudonnet J. Characterization of single-mode graded-index fibers: a new method based on transverse offset splice loss // Microwave Optic. Technol. Lett. No. 7, 1994. – P. 301-304.
28. Chao S-C., Tsai W-H., Wu M-S. Extended Gaussian approximation for single-mode graded-index fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 12, 1994. – P. 392-395.
29. Wu M-S., Lee M-H., Tsai W-H. Variational analysis of single-mode graded-core W-fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol. 14(1), 1996. – P. 121-125.
30. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. – 830 с.
31. Андреев В.А., Бурдин А.В. Многомодовые оптические волокна. Теория и приложения на высокоскоростных сетях связи. М.: Радио и связь, 2004. – 248 с.
32. Срапионов В.А. Связь мод в стыках оптических волокон с разбросом параметров // Электросвязь. №10, 1985. – С. 10-12.
33. Valle A., Sarma J., Shore K. Spatial hole burning and self-focusing in vertical cavity surface emitting diodes // IEEE Journal of Quantum Electronics. Vol. 31(8), 1995. – P. 1423-1431.
34. HFE4092-341 850 nm VCSEL Datasheet. Honeywell Inc. – 2003.
35. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. – 288 с.

MULTIMODE OPTICAL FIBER CORE DEVIATION INFLUENCE ON SIGNAL PROPAGATION UNDER FEW-MODE CONDITIONS

Burdin A.V., Delmuhametov O. R., Makarov V.S., Yablochkin K.A.

Time-domain model of piece-wise regular multimode fiber link is presented. It allows to evaluate pulse distortions due to differential mode delay, higher-order mode chromatic dispersion, and mode coupling. Based on developed model, results of computing of pulse form, propagating along two 500 m samples of graded multimode fibers with low and huge central dips in profile center region, excited by VCSEL with quite low offset, under different core deviation order are proposed.

Keywords: graded multimode fiber, few-mode conditions, higher-order mode, chromatic dispersion, mode coupling, differential mode delay.

Бурдин Антон Владимирович, к.т.н., доцент Кафедры «Линии связи и измерения в технике связи» (ЛС и ИТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 228-00-66. E-mail: bourdine@yandex.ru

Дельмухаметов Олег Равилевич, аспирант Кафедры «Телекоммуникации» Уфимского государственного авиационного технического университета. Тел. (8-347) 273-45-63. E-mail: delmukhametov@mail.ru

Макаров Виталий Сергеевич, аспирант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-66. E-mail: westwarrior@yandex.ru

Яблочкин Константин Александрович, аспирант Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-66. E-mail: yablochkin@mail.ru

УДК 621.391

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ СЛУЧАЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Фомин Л.А., Жук А.П., Скоробогатов С.А., Романько Д.В.

Предложена методика получения аналитических выражений для определения нормированных автокорреляционных функций случайных импульсных последовательностей, позволяющих производить оценку времени корреляции с целью выявления последовательностей, обладающих «хорошими» корреляционными свойствами для использования их в системах передачи информации, и последовательностей, обладающих свойством самоподобия для моделирования трафика в сетевых структурах.

Ключевые слова: долговременная зависимость, автокорреляционная функция, время корреляции, моделирование.

Введение

Технология многостанционного доступа с кодовым разделением каналов (Code Division Multiple Access – CDMA) получает все более широкое распространение в современных системах радиосвязи различного назначения. Системы такого рода используют для передачи информации по каналу связи шумоподобные сигналы (ШПС). Благодаря уникальной кодовой структуре каждого из используемых ШПС, они могут быть переданы одновременно в общей полосе частот и при этом эффективно разделяться на приемном конце [2].

Сегодня технологии CDMA находят применение в сотовых системах подвижной связи, системах беспроводного абонентского доступа, спутниковых системах подвижной связи, беспроводных ЛВС и др. Данная технология легла в основу большей части проектов стандартов, разрабатываемых для глобальных систем подвижной связи третьего поколения (IMT-2000), развертывание которых уже началось.

Важными особенностями технологии CDMA, определяющими ее столь широкое распростра-

нение, являются возможность обеспечения устойчивой связи в условиях действия комплекса помех и достижение конфиденциальности при обмене информацией между пользователями.

Конфиденциальность передачи сообщений по радиоканалам может быть достигнута путем обеспечения:

- энергетической скрытности сигналов – переносчиков информации;
- структурной скрытности этих сигналов;
- информационной скрытности самого сообщения.

Энергетическая и структурная скрытность являются важнейшими характеристиками сигнала, применяемого в системе радиосвязи. Энергетическая скрытность характеризует способность противостоять мерам, направленным на обнаружение сигнала разведывательным приемным устройством. Оценка энергетической скрытности системы радиосвязи с ШПС показывает, что чем больше ширина спектра ШПС, тем больше время анализа в обнаружителе сигнала. Кроме того, время анализа растет при увеличении требуемого отношения «сигнал/шум» на выходе обнаружителя. В результате оказывается, что эффективным средством повышения энергетической скрытности является расширение спектра ШПС до значений, определяемых отводимым на систему в целом частотным ресурсом.

Наряду с обнаружением ШПС возникает задача определения параметров, в частности, нахождения структуры и метода формирования сигнала. Под структурной (сигнальной) скрытностью понимают степень затруднения определения структуры обнаруженного сигнала. Сигнальная скрытность, в первую очередь, обеспечивается выбором сигнала, по возможности близким по