

УДК 621.396.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДОВОЙ ЗАДЕРЖКИ МНОГОМОДОВЫХ ВОЛП

А.В. Бурдин, доцент ПГУТИ, к.т.н.; bourdine@yandex.ru

Ключевые слова: многомодовые оптические волокна (ОВ), дифференциальная модовая задержка, компенсация дифференциальной модовой задержки, многомодовые ОВ с малой дифференциальной модовой задержкой.

Введение. Сегодня в оптических модулях оборудования мультигигабитных сетей передачи данных используются когерентные источники излучения – одномодовые лазерные диоды (ЛД) или менее дорогостоящие лазеры поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором (VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser). В многомодовых ОВ при возбуждении когерентными источниками имеет место маломодовый режим распространения оптического излучения: сигнал переносится по ОВ ограниченным набором модовых составляющих, число которых в общем случае не превышает 40.

Процесс распространения ограниченного числа мод, возбуждаемых лазером, по многомодовым ОВ отличается от обычного многомодового режима передачи, в первую очередь, проявлением известного эффекта дифференциальной модовой задержки (DMD – Differential Mode Delay) [1]. DMD сильно искажает форму импульса на приемной стороне и проявляется в виде разделения сигнала на отдельные компоненты. Этот эффект является основным фактором, ограничивающим пропускную способность многомодовой волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), функционирующей в маломодовом режиме. Как следствие, подавляющее большинство технологий увеличения полосы пропускания линий с многомодовыми ОВ ориентированы в основном на подавление именно DMD [2].

К перспективным способам снижения DMD многомодовых ВОЛП относится применение волокон для компенсации модовой дисперсии (MDCF) и непосредственно многомодовых ОВ с увеличенной полосой пропускания [1, 2]. Ниже предлагается метод синтеза таких волокон.

Традиционные методы синтеза профиля показателя преломления многомодовых ОВ с увеличенной полосой пропускания и MDCF. Работы по синтезу волокон MDCF условно можно разделить на две группы относительно подхода к выбору профиля компенсирующего ОВ. В первой группе публикаций на эту тему ([3, 4] и патент US 6363195) параметр $\alpha_{\text{комп}}$ градиента профиля волокна MDCF предлагается оценивать относительно отклонения параметра $\alpha_{\text{лин}}$ основного ОВ многомодовой ВОЛП от некоторого оптимального значения $\alpha_{\text{опт}}$, при котором достигается максимальная полоса пропускания. Во второй группе работ [5, 6] выбор профиля компенсирующего ОВ базируется на подборе параметров относительно локальных отклонений профиля основного многомодового ОВ линии передачи от оптимального.

При этом во всех случаях градиентный профиль и основного, и компенсирующего ОВ описывается одной или совокупностью гладких степенных функций. Но на практике,

даже для многомодовых ОВ последнего поколения OM3/OM4, не говоря уже об образцах реальных волокон категории OM1/OM2, характерны существенные локальные флуктуации профиля [7]. Как результат, применение гладких степенных функций для описания градиентных профилей показателя преломления основного многомодового ОВ и MDCF становится не вполне корректным.

Кроме того, в перечисленных работах при синтезе MDCF используется представление оптического сигнала, возбуждаемого лазером в многомодовом ОВ, в виде двух групп мод низшего и высшего порядков. Однако с точки зрения маломодового режима отличие скоростей отдельных модовых составляющих существенно, даже если эти моды относятся к одной группе в многомодовом режиме. Очевидно, что при разработке волокон для компенсации DMD необходимо учитывать особенности маломодового режима распространения сигнала, влияние дефектов профиля реальных градиентных волокон и условия ввода излучения в ОВ с выхода источника.

Аналогичные проблемы характерны и для известных методов синтеза профиля многомодовых ОВ с увеличенной полосой пропускания, ориентированных на передачу сигнала в маломодовом режиме. Эти методы в основном базируются на мониторинге DMD еще на стадии формирования заготовки ОВ. Однако в [8] и патентах US 4286979, US 2002/0197038 целевая функция оценивает степень близости искомого профиля к некоторому профилю, наилучшему с точки зрения минимального разброса групповых скоростей всей совокупности мод. Эти моды могут быть переданы по многомодовому ОВ, т.е. для многомодового режима передачи.

В патентах WO 2007/043060, US 6574403 и работе [9] в качестве целевой функции принята разность между интегральным или локальным значением параметра α_i аппроксимации профиля заготовки степенной функцией и параметром степенного профиля α – оптимального с точки зрения многомодового режима передачи. При этом сама локальная коррекция параметра градиента α выполняется на основе воспроизведения «оптимальной» диаграммы DMD. Последняя представляет собой распределение значений DMD по соответствующим порядкам направляемых мод, пересчитанным на обобщенное модовое число, и формируется путем соответствующей модификации исходной диаграммы DMD базового модельного ОВ, построенной в условиях равномерного возбуждения. Однако известно [2], что именно с помощью центрального ввода можно эффективно и доступно реализовать в полевых условиях увеличение полосы пропускания многомодовых ВОЛП, функционирующих в маломодовом режиме передачи сигнала.

Проведенный анализ и сопоставление рассмотренных здесь работ позволяют перечислить основные факторы, которые в обязательном порядке должны быть учтены при синтезе профиля многомодового ОВ с пониженным значе-

нием DMD. Во-первых, в качестве начального приближения целесообразно использовать конструкцию, геометрию, профиль показателя преломления и параметры реальных апробированных образцов многомодовых ОВ, оптимизированных для работы с лазерами так называемых волокон LOMF (Laser Optimized Multimode Fibers). К ним относятся многомодовые ОВ категории OM2+...OM4, но никак не ОВ первых поколений категорий OM1/OM2, а также модельных ОВ с идеализированными степенными профилями показателя преломления. Во-вторых, разработка или модификация конструкции/профиля показателя преломления ОВ должна в обязательном порядке базироваться на сопоставлении с диаграммой или профилем DMD. Кроме того, необходимо учитывать тип лазера, модовый состав его излучения и условия ввода сигнала в линию.

Моделирование волокон RDMDF. Предлагаемое решение по компенсации DMD многомодовой ВОЛП реализуется путем инсталляции на приемной стороне специализированных многомодовых ОВ, профиль показателя преломления которых обеспечил бы «зеркальное» или «реверсивное» воспроизведение диаграммы распределения групповых скоростей направляемых мод основного ОВ линии – многомодовых ОВ с реверсивной дифференциальной модовой задержкой (RDMDF – Reverse Differential Mode Delay Fibers). Профиль показателя преломления и длину компенсирующего волокна RDMDF предлагается выбирать из условия минимизации целевой функции

$$F = \sum_{j=1}^M \left(v_{g(j)}^{(R)} - v_{g(j)} \right)^2, \quad (1)$$

где $v_{g(j)}$ – групповая скорость j -й моды $LP_{lm}^{(j)}$, распространяющейся в основном многомодовом ОВ линии передачи; $v_{g(j)}^{(R)}$ – соответствующая ей реверсивная групповая скорость моды $LP_{lm}^{(j)}$ того же порядка, распространяющейся в компенсирующем волокне; M – число направляемых мод, переносящих мощность маломодового оптического сигнала в основном многомодовом ОВ. Для направляемых мод параметр мощности моды в сердцевине $P_{co(j)} \geq 50\%$, а нормированная амплитуда – не менее 0,1. Значение M чаще определяется двумя факторами: условиями ввода сигнала с выхода лазера в основное многомодовое ОВ линии передачи и модовым составом излучения, формируемым непосредственно на выходе источника и зависящим от типа лазера и его соответствующих характеристик. В общем случае $M \leq 40$.

Искомое реверсивное значение групповой скорости j -й моды $LP_{lm}^{(j)}$ компенсирующего многомодового волокна относительно групповой скорости моды этого же порядка, распространяющейся в основном многомодовом ОВ линии передачи, предлагается оценивать с помощью соотношения:

$$v_{g(j)}^{(R)} = v_{g(\max)} - Q \left(v_{g(j)} - v_{g(\min)} \right); \quad j = 1 \dots M, \quad (2)$$

где $v_{g(\max)}$, $v_{g(\min)}$ – максимальное и минимальное значения групповых скоростей M модовых составляющих маломодового сигнала ($j=1 \dots M$), распространяющегося в основном многомодовом волокне ВОЛП; $Q = L_{\text{лин}} / L_{\text{комп}}$ – параметр компенсации, определяющий длину волокна RDMDF.

Для расчета параметров направляемых мод произвольного порядка слабо направляющего коаксиального ОВ с заданным профилем произвольной формы использована модификация метода приближение Гаусса (МПГ) [10]. В отличие от классического приближения Гаусса [11], его модификация базируется на представлении ОВ с произволь-

ным осесимметричным профилем показателя преломления в виде многослойного волоконного световода коаксиальной конструкции с последующей аппроксимацией профиля многослойного ОВ параболическим. Это позволяет записать вариационное выражение для квадрата параметра моды в сердцевине U^2 в виде конечных вложенных сумм вида [10]:

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

Здесь

$$X_j = \begin{cases} \exp \left(-\frac{1}{R_0^2} \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \right), & j=0; \\ \exp \left(-\frac{(k+j-1)^2}{N^2 R_0^2} \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \frac{(k+j-1)^{2p}}{N^{2p}} \right), & j=1,2, \end{cases}$$

где l, m – значения азимутального и радиального порядков моды LP_{lm} , соответственно.

Характеристическое уравнение для эквивалентного радиуса пятна моды $\partial U^2 / \partial R_0 = 0$ [11], получаемое в результате дифференцирования (3) по R_0 , имеет вид [10]:

$$-M + V^2 \left[S_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (S_1 - S_2) \right] = 0, \quad (4)$$

где

$$S_j = \begin{cases} \exp \left(-\frac{1}{R_0^2} \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} (1 - p R_0^2) \right), & j=0; \\ \exp \left(-\frac{(k+j-1)^2}{N^2 R_0^2} \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \times \right. \\ \left. \times \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \frac{(k+j-1)^{2p}}{N^{2p}} \left(\frac{(k+j-1)^2}{N^2} - p R_0^2 \right) \right), & j=1,2. \end{cases}$$

Результатом численного решения уравнения (4), записанного для геометрических параметров исследуемого ОВ и дискретных значений азимутального и радиального порядков заданной моды LP_{lm} , является нормированный радиус пятна искомой моды R_0 . Последующая подстановка R_0 в вариационное выражение (3) позволяет выполнить оценку параметра моды в сердцевине U . Параметр непосредственно связан с постоянной распространения известным выражением [11]:

$$\beta^2 = k^2 n_0^2 - \frac{U^2}{a^2}. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что МПГ может корректно использоваться только при нормированной частоте $V > 1$. При этом полученное решение характеристического уравнения (4) с учетом последующей подстановки в (3) и далее в (5) должно удовлетворять условию отсечки направляемых мод $kn_N < \beta \leq kn_0$ и, как было отмечено выше, неравенству $P_{co}^{(lm)} \geq 50\%$.

Предложенный подход позволяет перейти к аналитическим формулам для производных постоянной распространения $\partial \beta / \partial \lambda$ и $\partial^2 \beta / \partial \lambda^2$ через производные квадрата параметра моды в сердцевине $\partial U^2 / \partial \lambda$, $\partial^2 U^2 / \partial \lambda^2$ и эквивалентного радиуса пятна моды $\partial R_0 / \partial \lambda$, $\partial^2 R_0 / \partial \lambda^2$, полученным в результате дифференцирования вариационного выражения (3) и характеристического уравнения (4). Далее на основе известных соотношений [11], связывающих производные $\partial \beta / \partial \lambda$,

$\partial^2 \beta / \partial \lambda^2$ и параметры дисперсии, переходят к аналитическим выражениям для групповой скорости и коэффициента хроматической дисперсии направляемой моды заданного порядка [10].

Таким образом, моделирование волокон RDMDF включает следующие этапы. Предварительно задается профиль показателя преломления основного многомодового ОВ. Затем с помощью метода МПГ рассчитывают групповые скорости модового состава: для каждой моды заданного порядка численно решают характеристическое уравнение (4), определяют волноводные параметры и их производные на заданной длине волны. В результате каждой направляемой моде заданного порядка ставится в соответствие значение групповой скорости. Далее строят прямую диаграмму, на основе которой по формуле (2) переходят к базовой реверсивной скорости.

Как было показано выше, число модовых компонент M диаграммы групповых скоростей определяется условиями ввода сигнала с выхода лазера (центральный ввод, соединение с осевым смещением, угловое рассогласование) и модовым составом излучения, формируемым непосредственно на выходе пигтейла источника. Последнее зависит от типа лазера: так, например, одномодовый лазер ($l=1310$ нм) генерирует сигнал, содержащий только одну основную моду LP_{01} , в то время как излучение VCSEL ($l=850$ нм) содержит 5–6 модовых составляющих LP_{lm} . Для минимизации целевой функции (1) предлагается использовать симплексный метод Нелдера-Мида, эффективность которого продемонстрирована в [12].

Для оценки эффективности полученных решений при заданных условиях ввода была рассчитана динамика маломодового сигнала, распространяющегося в последовательном соединении многомодового ОВ традиционной конструкции и компенсирующего волокна RDMDF. Для этого использо-

вали модель кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП во временной области, описание которой подробно изложено в [13, 14]. Модель позволяет учитывать проявление эффекта DMD, хроматическую дисперсию основной и высших направляемых мод, а также взаимодействие и смешение модовых компонентов сигнала.

Стык основного многомодового ОВ и волокна RDMDF рассматривался в виде идеального строго соосного соединения двух подобных световодов с неодинаковыми параметрами. Перераспределение мощности сигнала между амплитудами отдельных составляющих — результат взаимодействия и смешения модового состава определялся путем оценки коэффициентов связи с помощью интеграла перекрытия полей взаимодействующих мод [13, 14]. Этот же подход применяется при моделировании ввода сигнала с выхода лазера в основное многомодовое ОВ через согласующий световод при заданных условиях возбуждения, например при наличии осевого или углового смещения, или в центральном вводе.

Результаты моделирования волокон RDMDF. Ниже представлены некоторые результаты апробации предложенного подхода к моделированию волокон RDMDF. Так, на рис. 1,а приведен градиентный показатель преломления основного многомодового ОВ 50/125, воспроизведенный на основе данных протокола измерения образца реального ОВ категории OM2 [7]. Профиль отличается характерным для данного поколения волокон габаритным центральным дефектом и сильными флуктуациями показателя преломления в центральной области сердцевинки.

На рис. 1,б представлен полученный в результате минимизации целевой функции (1) и при параметре $Q=1$ профиль показателя преломления волокна RDMDF 50/125 для компенсации DMD всех 24 направляемых мод LP_{lm} ($l=0-3$; $m=1-6$), возбуждаемых в основном волокне ВОЛП лазером VCSEL. Исходный маломодовый сигнал, поступающий не-

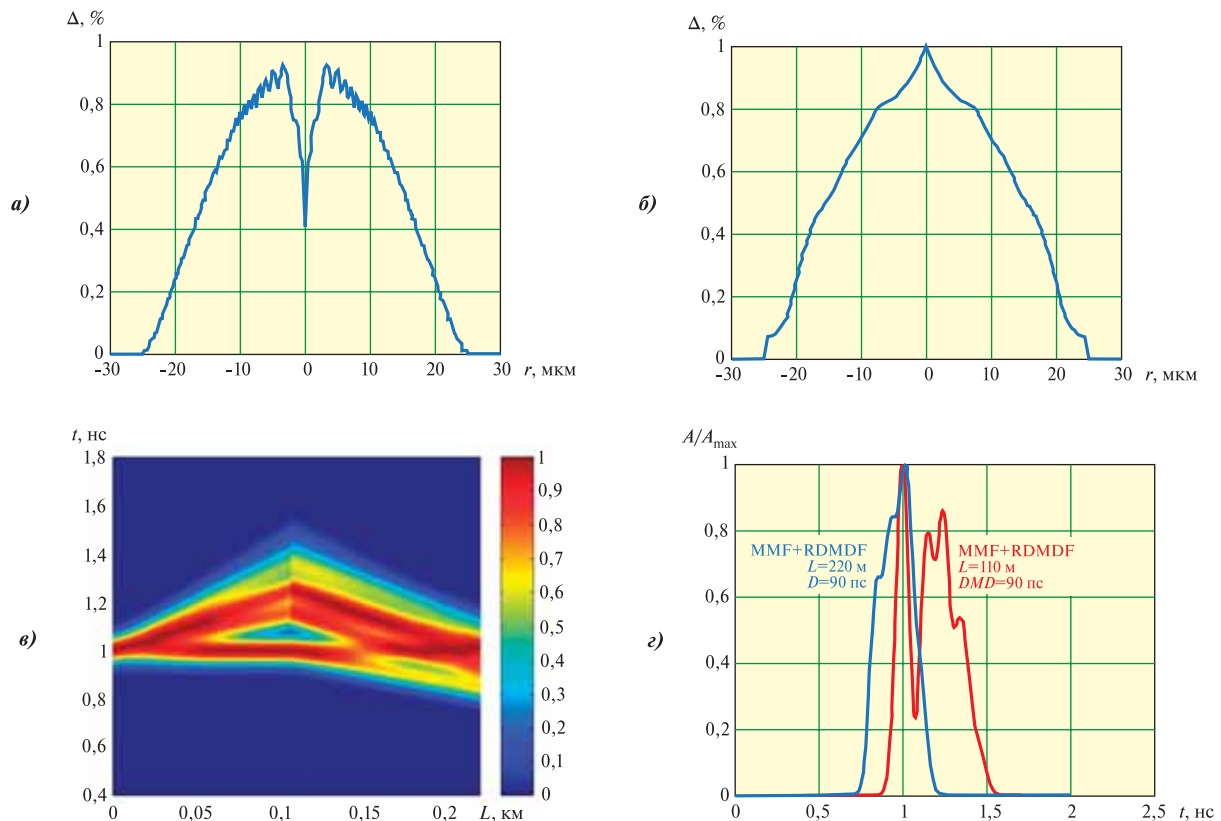


Рис. 1

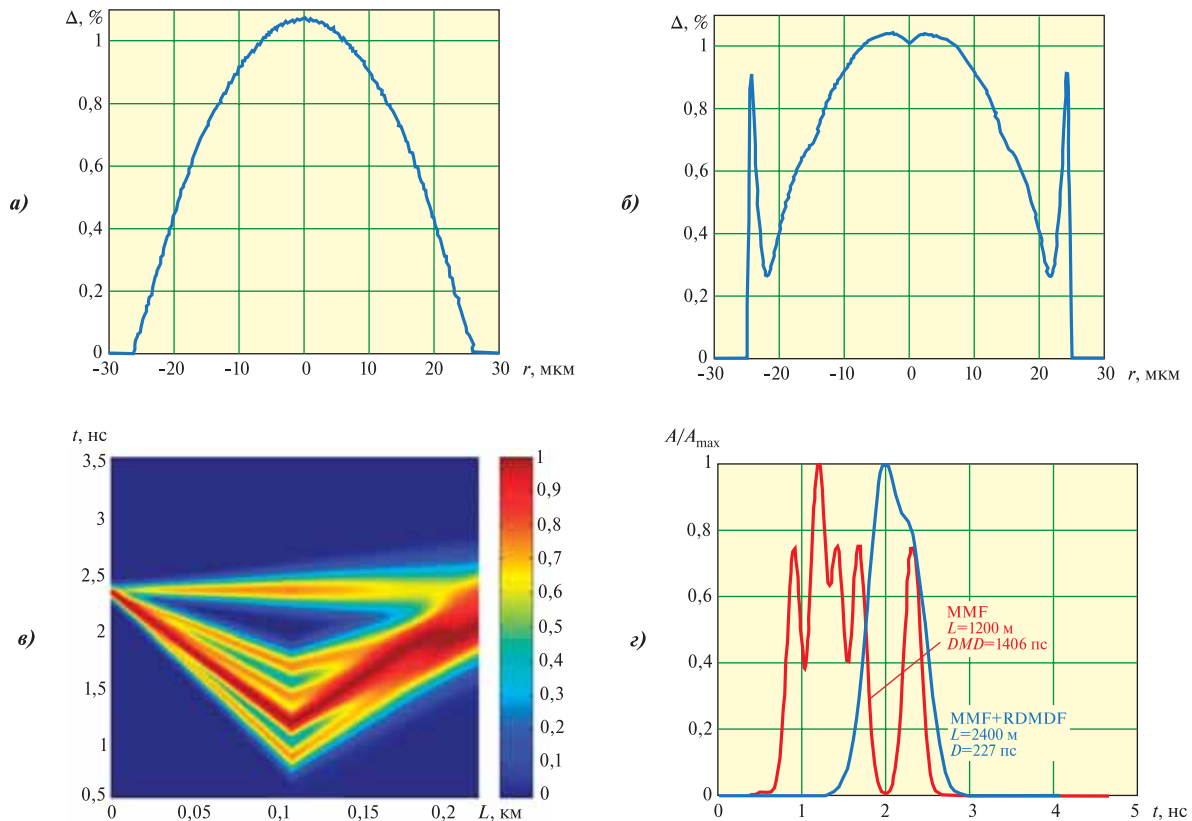


Рис. 2

посредственно с выхода VCSEL, состоит из следующих модовых компонент [15]: $LP_{01}, LP_{02}, LP_{11}, LP_{12}, LP_{21}, LP_{31}$ в условиях равномерной засветки основного ОВ или при осевом смещении 10–15 мкм на вводе.

На рис. 1,б приведены результаты расчета динамики маломодового сигнала гауссовской формы с исходной длительностью $t_{05}=90$ пс (скорость передачи $B=10$ Гбит/с) при распространении по комбинированной многомодовой ВОЛП общей протяженностью 220 м. ВОЛП состоит из основного (рис. 1) и компенсирующего (рис. 1,б) волокон длиной по 110 м каждое. Сигнал вводится с выхода указанного VCSEL при осевом смещении 12 мкм. Искаженная форма импульса на выходе основного ОВ и результат компенсации DMD за счет включения RDMDF на выходе ВОЛП представлены на рис. 1,г.

На рис. 2,а приведен градиентный показатель преломления основного многомодового ОВ 50/125, воспроизведенный на основе данных протокола измерения образца реального волокна LOMF производства компании Corning® предположительно категории OM2+ [7]. Профиль представляет собой практически идеальный градиент со слабо выраженными локальными флуктуациями показателя преломления.

На рис. 2,б приведен полученный для данного образца профиль показателя преломления волокна RDMDF 50/125 при параметре компенсации $Q=1$. Поскольку волокна LOMF изначально ориентированы на технологию центрального ввода, то в данном случае при формировании базовой реверсивной диаграммы групповых скоростей использовались только 12 модовых составляющих LP_{lm} ($l=0-3; m=1-3$), возбуждаемых в основном волокне ВОЛП лазером VCSEL. Модовые составляющие определяли по результатам расчетов коэффициентов связи мод относительно перераспределения большей части мощности сигнала, поступающего с выхо-

да источника излучения в основное ОВ. С одной стороны, это привело к некоторому усложнению формы профиля показателя преломления компенсирующего ОВ (рис. 2,б), по сравнению с предыдущим вариантом RDMDF (рис. 1,б). С другой – вызвало существенное уменьшение отклонения от базовой реверсивной диаграммы групповых скоростей: максимальная погрешность не превышала 0,01%, в то время как в предыдущем случае составила менее 0,035%.

Результаты расчета динамики маломодового сигнала гауссовской формы с исходной длительностью $t_{05}=90$ пс ($B=10$ Гбит/с) при его распространении по комбинированной многомодовой ВОЛП общей протяженностью 2400 м, составленной из основного (рис. 2,а) и компенсирующего (рис. 2,б) волокон длиной по 1200 м каждое, представлены на рис. 2,в. Сигнал вводится с выхода VCSEL в основное ОВ соосно без каких-либо осевых или угловых рассогласований. Искаженная форма импульса на выходе основного ОВ и результат компенсации DMD за счет включения RDMDF на выходе ВОЛП приведены на рис. 2,г.

Анализ полученных результатов показывает возможность применения предложенного подхода для компенсации DMD. Благодаря соответствующей форме профиля волокна RDMDF (даже при наличии определенной погрешности воспроизведения базовой реверсивной диаграммы групповых скоростей) удается практически полностью устранить искажения сигнала, обусловленные проявлением указанного нежелательного эффекта.

Например, предельная допустимая протяженность ВОЛП с многомодовыми ОВ категории OM2 ограничена спецификацией 10GBase-SR/SW стандарта IEEE 802.3ae (10Gb Ethernet) до 82 м [1]. Данное нормированное значение может быть увеличено более чем на 30% с помощью модулей компенсации DMD с волокнами RDMDF, включаемыми на

приемной стороне линии в рамках проведения реконструкции многомодовой ВОЛП с ОВ первого поколения подсистемы 10Gb Ethernet.

В свою очередь, максимально допустимая протяженность ВОЛП с волокнами OM2+/OM3, регламентированная указанной спецификацией стандарта 10Gb Ethernet, увеличена (по сравнению с ОВ первого поколения) до 95–300 м в зависимости от конкретной марки ОВ заданного производителя. Однако включение на приемной стороне компенсирующего волокна RD MDF (рис. 2, б) обеспечивает практически полное восстановление огибающей импульса даже при длине основного ОВ до 1200 м.

Последующие расчеты для многомодовой ВОЛП с увеличением протяженности в 2 и более раз продемонстрировали подавление эффекта DMD с помощью волокон RD MDF. Однако для таких больших расстояний на передний план выходит проблема компрессии квазигауссовского импульса увеличенной длительности, которая может быть решена средствами электронной компенсации дисперсии (EDC – Electronic Dispersion Compensation). В то же время протяженность многомодовых ВОЛП современных внутриобъектовых инфокоммуникационных сетей редко превышает 1000 м [1], поэтому вопрос компенсации DMD на ВОЛП длиной более 2000 м вряд ли представляется актуальным.

С другой стороны, полученные результаты показывают высокие потенциальные возможности использования предложенного подхода для решения задачи адаптации линейного тракта многомодовых ВОЛП как с ОВ первого поколения OM1/OM2, так и волокон LOMF OM2+/OM3 для передачи сигналов активного оборудования мультитерабитных сетей (в том числе и 40/100 Гбит/с), ратифицированного в июне 2010 г. стандарта IEEE 802.3ba.

Моделирование волокон с малой DMD. Предлагаемое решение фактически является развитием представленного выше подхода к моделированию волокон RD MDF. Здесь также форма профиля показателя преломления искомого ОВ выбирается таким образом, чтобы минимизировать целевую функцию F , которая, в отличие от RD MDF, описывается выражением вида:

$$F = \sum_{j=1}^M \left(v_{g(j)} - \bar{v}_g \right)^2, \quad (6)$$

где \bar{v}_g – некоторое опорное значение групповой скорости, относительно которого и выравниваются групповые скорости направляемых мод LP_{lm} заданных порядков.

Соответственно, моделирование волокон с малой DMD включает следующие этапы. Предварительно выбирается опорное значение групповой скорости \bar{v}_g . В данной работе это предлагается сделать путем усреднения значений групповой скорости направляемых мод, распространяющихся в многомодовом ОВ LOMF. Параметры передачи модового состава также оцениваются методом МПГ. Как было показано выше, число модовых компонент M , используемых для нахождения \bar{v}_g , определяется условиями ввода сигнала с выхода лазера и модовым составом излучения, формируемым непосредственно на выходе пигтейла источника. Для минимизации целевой функции (6) используется симплексный метод Нелдера-Мида.

Для оценки эффективности полученного профиля показателя преломления ОВ с уменьшенным значением DMD рассчитывается динамика маломодового сигнала, распространяющегося в линии с искомым ОВ при заданных условиях ввода на основе описанной выше модели кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП во временной области.

Результаты моделирования волокон с малой DMD. Ниже представлены некоторые результаты апробации предложенного подхода к моделированию волокон с малой DMD. Так, на рис. 3, а приведен профиль показателя преломления многомодового ОВ 50/125 с уменьшенным значением DMD. Профиль получен для передачи маломодовых сигналов, возбуждаемых лазером VCSEL ($\lambda=850$ нм) в данном ОВ через центральный ввод. Модовый состав излучения непосредственно с выхода VCSEL приведен выше. Соответственно в условиях соосного ввода в типовом градиентном многомодовом ОВ 50/125 обеспечивается возбуждение 12 направляемых мод LP_{lm} ($l=0-3; m=1-3$), для которых параметр мощности моды в сердцевине составляет не менее 50%, а нормированная амплитуда – не менее 0,1. В качестве опорного значения \bar{v}_g выбиралась средняя групповая скорость перечисленного модового состава, распространяющегося в многомодовом ОВ LOMF, в частности, образца OM2+ [7], профиль показателя преломления которого представлен на рис. 2, а.

Результаты предварительных расчетов динамики гауссовского импульса с исходной длительностью $t_{05}=90$ пс ($B=10$ Гбит/с) показали, что даже при увеличении протяженности линейного тракта многомодовой ВОЛП с рассматриваемым волокном до 1500 м и выше, огибающая сигнала сохраняет свою форму и проявление эффекта DMD не наблюдается. При этом длительность импульса в силу дисперсионных искажений увеличивается не более, чем в 3,5 раза. Поэтому последующие расчеты проводились уже для оптических импульсов $t_{05}=20$ пс, что соответствует скорости передачи данных $B=40$ Гбит/с.

На рис. 3, б представлена диаграмма динамики указанного маломодового сигнала при распространении по многомодовому ОВ с малой DMD протяженностью 200 м, а на рис. 3, в – исходная форма импульса и сигнал, полученный на выходе волокна. В данном случае дисперсия не превысила $D=16,7$ пс, и длительность импульса увеличилась менее, чем в 2 раза. Последующие расчеты для многомодовой ВОЛП с возрастанием протяженности в 2 и более раз также продемонстрировали отсутствие эффекта DMD для рассматриваемых ОВ. Однако увеличение длительности сигнала, обусловленное дисперсионными искажениями – основной причиной межсимвольной интерференции, требует решения проблемы компрессии квазигауссовского импульса, например, с помощью средств EDC.

Полученный в результате минимизации целевой функции (6) профиль показателя преломления многомодового ОВ 50/125 с малой DMD, ориентированный на передачу маломодовых импульсов, генерируемых одномодовым ЛД ($\lambda=1310$ нм), представлен на рис. 4, а. Исходный оптический сигнал непосредственно на выходе пигтейла одномодового ЛД содержит только одну основную моду LP_{01} , обеспечивающую передачу большей части мощности пяти направляемым модам LP_{lm} ($l=0; m=1-5$) в опорном многомодовом ОВ LOMF. Для них параметр мощности моды в сердцевине составляет не менее 50%, а нормированная амплитуда – не менее 0,1. Здесь также в качестве опорного значения \bar{v}_g выбиралась средняя групповая скорость перечисленного модового состава, распространяющегося в многомодовом ОВ OM2+ (см. рис. 2, а).

Благодаря ограниченному набору модовых компонентов сигнала, полученный градиентный профиль ОВ с уменьшенным значением DMD является универсальным с точки зрения условий ввода сигнала: данное ОВ может быть использовано как для соосного ввода, так и равномерного возбуждения перечисленного модового состава, реализуемого, например, с помощью осевого смещения.

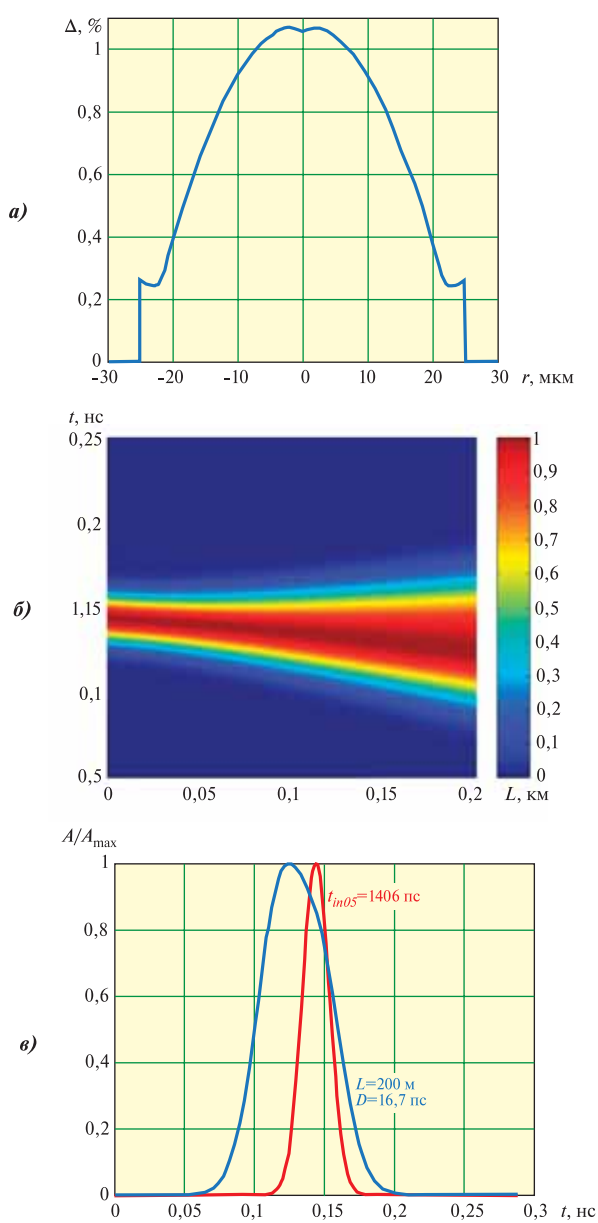


Рис. 3

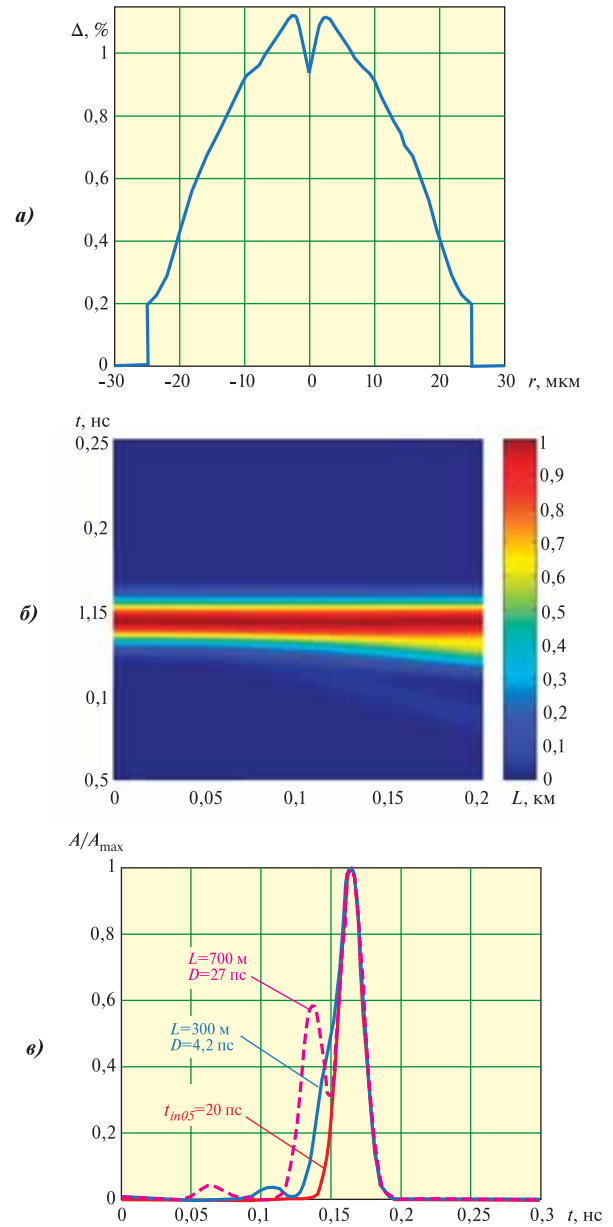


Рис. 4

Очевидно, что более высокие показатели соответствуют центральному вводу. Так, на рис. 4,б представлены результаты расчета диаграммы динамики гауссовского импульса с исходной длительностью $t_{05}=20$ пс по ОВ с увеличенной (по сравнению с предыдущим случаем) в 2 раза протяженностью (до 400 м); на рис. 4,в – исходная форма импульса и сигнал, полученный на выходе ОВ. При этом дисперсия не превысила $D=6,2$ пс и соответственно длительность импульса увеличилась менее, чем на 20%.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что применение многомодовых ОВ с малой DMD (рис. 3,а и 4,а), позволяет увеличить протяженность многомодовой ВОЛП в 1,5–2,5 раза и более, по сравнению с длиной линии, ограниченной спецификацией 40GBase-SR4 стандарта IEEE 802.3ba. Эта длина доходит до 150 м даже для ОВ последнего поколения категории OM4. Кроме того, она базируется на параллельной передаче потоков 10 Гбит/с по отдельным парам многомодовых ОВ кабельной сборки ленточного типа.

Заключение. Результаты апробации полученных на основе представленного решения примеров профилей показателя преломления волокон RDMDF и многомодовых ОВ с малой DMD демонстрируют достаточно высокие потенциальные возможности использования предложенного подхода для минимизации DMD в многомодовых ВОЛП при передаче сигналов активного оборудования мультигигабитных инфокоммуникационных сетей, в том числе и 10/40/100 Гбит/с ратифицированных стандартов IEEE 802.3ae и 802.3ba.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bottacchi S.** Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre. Theory and design methods for 10GbE systems. – John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 654 p.
2. **Freund R.E., Bunge Ch.-A., Ledentsov N.N. et al.** High-speed transmission in multimode fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2010. –Vol. 28(4). – P. 569 – 586.
3. **Morishita K., Ikeda H., Kumagi N.** Compensation of intermodal dispersion by splicing two graded-index multimode fibers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology. – 1982. –Vol. 30. – P. 694 – 700.

4. **Xia Ch., Ajaonkar M.** Optical compensation of differential mode delay in MMF links for 10-Gigabit Ethernet // European Conference on Optical Communications (ECOC): proc. – Stockholm, Sweden. – 2004. – P. We4.P.025-1 – We4.P.025-2.
5. **Marcuse D.** Multimode delay compensation in fibers with profile distortions // Applied Optics. – 1979. – Vol. 18(23). – P. 4003 – 4005.
6. **Guang N., Takenaga K., Matsuo Sh., Himeno K.** Multimode fibers for compensating intermodal dispersion of graded-index multimode fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2004. – Vol. 22(7). – P. 1714–1719.
7. **Бурдин А.В., Яблочкин К.А.** Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – №2. – С. 22–27.
8. **Stone F.T., Ritger A.J., Head E.D.** The use of a quantitative differential mode delay technique to improve fiber bandwidth // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 1983. – Vol. LT-1(4). – P. 585–587.
9. **Achten F.J., Jetten M.P.M., Krabshuis G.-J et al.** New generation of broad wavelength window multimode fibres // 30-th European Conference on Optical Communication (ECOC): Proc. – Stockholm, Sweden. – 2004. – Vol. 4. – P. Th 3.3.3-1 – Th 3.3.3-3
10. **Bourdine A.V.** Method for chromatic dispersion estimation of high-order guided modes in graded index single-cladding fibers // Proceedings of SPIE. – 2006. – Vol. 6605. – P. 660509-1 – 660509-13.
11. **Снайдер А., Лав Дж.** Тория оптических волноводов // Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
12. **Боголюбов А.Н., Буткарев И.А., Свешников А.Г.** Синтез волоконных световодов // Радиотехника. – 2004. – №12. – С. 4–12.
13. **Bourdine A.V.** Simulation results of few-mode signal propagation over graded multimode optical fibers with periodical slowly varying core diameter // Proceedings of SPIE. – 2009. – Vol. 7374. – P. 737406-01 – 737406-11.
14. **Бурдин А.В., Дельмухаметов О.Р., Макаров В.С., Яблочкин К.А.** Влияние флуктуаций диаметра сердцевины многомодовых оптических волокон на передачу сигналов в маломодовом режиме // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – №3. – С. 12–21.
15. **Valle A., Sarma J., Shore K.** Spatial hole burning and self-focusing in vertical cavity surface emitting diodes // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1995. – Vol. 31(8). – P. 1423–1431.

Получено 16.02.11