

Моделирование кварцевых волоконных световодов с увеличенным диаметром сердцевины для маломодовых волоконно-оптических линий компактных мультигигабитных сетей передачи данных разного назначения

А.В. Бурдин^а, В.А. Бурдин^а, А.Е. Жуков^а

^а Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 443010, ул. Льва Толстого, 23, Самара, Россия

Аннотация

Предложен подход к моделированию профиля показателя преломления кварцевых многомодовых оптических волокон (ММ ОВ), обеспечивающего повышенную, по сравнению с коммерческими аналогами, полосу пропускания в маломодовом режиме. Данный профиль обеспечивает выравнивание модовых задержек направляемых мод заданного порядка, которые являются непосредственно основными модовыми компонентами сигнала, переносимого по такому ОВ, возбуждаемого когерентными источниками трансиверов мультигигабитных сетей, функционирующих в маломодовом режиме передачи. Представлены результаты синтеза образцов профилей показателя преломления ММ ОВ с диаметром сердцевины 50 и 100 мкм, полученные для разных комбинаций опорной модовой задержки и параметра градиента первой итерации, а также соответствующие им спектральные характеристики дифференциальной модовой задержки в «О»-диапазоне длин волн.

Ключевые слова: маломодовый режим передачи сигнала; дифференциальная модовая задержка; многомодовые оптические волокна; диаметр сердцевины; структурированные кабельные системы; бортовые кабельные системы; промышленные и технологические сети; мультигигабитные сети передачи данных

1. Введение

На сегодняшний день применение оптических волокон (ОВ) уже давно перестало ассоциироваться исключительно с магистральными волоконно-оптическими линиями передачи (ВОЛП) сверхбольшой протяженности или оптическими кольцами городских сетей связи [1, 2]. Увеличение спроса на услуги широкополосного доступа, конвергенция информационных и телекоммуникационных технологий, появление новых мультимедийных приложений на рынке инфокоммуникаций, расширение и интеграция корпоративных информационно-вычислительных сетей, активная разработка направления тактильного Интернета, повсеместное внедрение облачных технологий, которые нередко сегодня называют современной «золотой жилой» индустрии инфокоммуникаций, – вот лишь малая часть большого перечня факторов, определяющих активное развитие сегментов инфокоммуникационных сетей, отличающихся компактностью и высокой плотностью размещения большого числа портов при одновременно малой (от нескольких десятков/сотен метров до 2 км) протяженности волоконно-оптических соединительных линий.

На сегодняшний день именно многомодовые ОВ с существенно увеличенным, по сравнению с традиционными стандартными одномодовыми ОВ, диаметром сердцевины заняли нишу таких «компактных» сетей в сочетании с технологией FTTx (Fiber To The «x» – «волокно до «x»») – в частности, FTTE («enclosure» – «волокно до конструктива») или FTTD («desk» – «волокно до рабочего места»). С утверждением стандарта IEEE 802.3z (Gigabit Ethernet) и появлением на рынке телекоммуникаций коммерческих оптических модулей на основе лазерных источников VCSEL, функционирующих на рабочей длине волны, соответствующей первому окну прозрачности $\lambda=850$ нм, эти позиции только укрепились. Широкое внедрение многомодовых ОВ на подобных сетях объясняется существующей разницей по стоимости между одномодовыми и многомодовыми оптическими модулями активного оборудования [2 – 4], которая, несмотря на общую тенденцию снижения цен, по-прежнему достигает, как минимум, 25...30% для одного и того же производителя. При этом требуемое количество устанавливаемых портов составляет, как минимум, несколько сотен, а в большинстве случаев – приближается к тысяче и более. Для бюджета таких сетей доля стоимости активного оборудования во много раз выше расходов на приобретение оптического кабеля, пассивных компонентов и проведения строительно-монтажных работ. Поэтому использование многомодовых ОВ в магистральных и распределительных кабельных системах, вне всякого сомнения, является более предпочтительным, с точки зрения минимизации затрат на реализацию подобных проектов.

При этом активное оборудование мультигигабитных сетей передачи данных использует в оптических модулях когерентные источники излучения – одномодовые лазерные диоды (ЛД) или менее дорогостоящие, по сравнению с первыми, лазеры поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором VCSEL. При этом передача оптического сигнала, возбуждаемого лазером по ОВ даже с намного увеличенным, относительно размеров одномодовых ОВ, диаметром сердцевины осуществляется в маломодовом режиме, когда число модовых составляющих ограничено [2] и определяется конструкцией / параметрами ОВ, исходным модовым составом излучения лазера и условиями ввода излучения в торец ОВ.

В общем случае, можно выделить 2 группы подобных приложений указанных «компактных» сетей. Это, в частности, структурированные кабельные системы (СКС), СКС центров обработки данных и вычислительных центров, сети

хранения данных (SAN – Storage Area Networks), локальные информационно-вычислительные сети (LAN – Local Area Networks), внутрикорпоративные сети передачи данных, беспроводные сети доступа на уровне микро- и пикосот на основе технологии FTTH («antenna» – «волокно до антенны») и многие другие. Здесь наиболее широкое применение находят многомодовые ОВ с диаметром сердцевины 50 мкм нового поколения категории OM2+...OM4 [3 – 7], оптимизированные для работы с лазерными источниками, т.е. фактически также для функционирования в маломодовом режиме. Однако в среднем, каждые 4 – 5 лет происходит ратификация нового сетевого стандарта, проводится полное обновление состава активного оборудования волоконно-оптических систем передачи таких сетей. При этом каждый последующий стандарт ориентирован на кварцевые многомодовые ОВ уже новой специально разработанной под этот стандарт категории и одновременно уменьшает допустимую протяженность ВОЛП с волокнами предыдущего поколения практически на порядок, несмотря на то, что срок службы кабельных линий связи составляет, как минимум, 25 лет. Более того, последний утвержденный стандарт IEEE 802.3ba регламентирует передачу сигналов со скоростью 40 и 100 Гбит/с по многомодовым ОВ новой категории OM4 в маломодовом режиме буквально на дистанции до 150 м исключительно в параллельном оптическом интерфейсе ленты/пучка таких ОВ 4x10/10x10 Гбит/с. В результате возникает задача разработки новых многомодовых ОВ с увеличенной полосой пропускания в маломодовом режиме передачи сигнала с диаметром сердцевины 50 мкм, которые обеспечили бы соответствующую пропускную способность ВОЛП описанных компактных многопортовых инфокоммуникационных сетей на весь срок службы.

Ко второй группе относятся технологические и промышленные сети передачи данных разного назначения, бортовые кабельные системы, а также сети систем промышленной автоматизации. Здесь среди номенклатуры кварцевых ОВ типовой конструкции именно световоды с диаметром сердцевины 100 являются наиболее предпочтительным решением для указанных приложений. Данный факт объясняется агрессивными условиями эксплуатации соединительных линий указанных сетей – это, в частности, ограниченное пространство инсталляции и монтажа, вибрационные воздействия и «грязная» окружающая среда (пыль, взвешенные частицы и пр.). С этой точки зрения, чем больше диаметр сердцевины ОВ, тем выше надежность сети в целом: а) для ОВ 100/125 и 100/140 характерна невосприимчивость к изгибам; б) разъемные соединения с ОВ 100/125 и 100/140 практически нечувствительны к вибрациям и в) загрязнениям торцевой поверхности ферула коннектора; д) при этом кварцевая сердцевина и кварцевая оболочка ОВ обеспечивают коэффициент затухания на порядок ниже и менее, по сравнению с полимерными ОВ. В целом, применение ОВ 100/125 является более предпочтительным, по сравнению с ОВ 100/140, т.к. увеличенный, по сравнению с традиционными кварцевыми ОВ диаметр оболочки (140 мкм вместо 125 мкм) ограничивает возможность их применения в сочетании с типовыми комплектами коннекторов и адаптеров активного оборудования и устройств коммутации инфокоммуникационных сетей, а также штатных полевых технологий сращивания ОВ, что существенно ограничивает их универсальность, с точки зрения применения для сегмента подобных приложений. Известные коммерческие аналоги кварцевых ОВ с диаметром сердцевины 100 мкм ориентированы исключительно на многомодовый режим и низкие (10...100 Мбит/с) скорости передачи данных [7]. Однако сегодня для целого ряда современных приложений на указанных сетях возникает задача перехода на гигабитные и мультигигабитные скорости передачи данных [8 – 10]. Вышесказанное определяет актуальность разработки новых ОВ с сильно увеличенным (до 100 мкм) диаметром сердцевины, обеспечивающих искомую пропускную способность функционирующих в маломодовом режиме передачи оптического сигнала ВОЛП компактных сетей бортовых систем, систем промышленной автоматизации и прочих подобных приложений.

В данной работе предложен подход к моделированию указанных многомодовых ОВ, обеспечивающих увеличенную, по сравнению с коммерческими аналогами, полосу пропускания в маломодовом режиме. Данный эффект достигается за счет выбора специализированной формы градиентного профиля показателя преломления, обеспечивающего выравнивание модовых задержек направляемых мод заданного порядка, которые являются непосредственно основными модовыми компонентами сигнала, переносимого по такому ОВ в маломодовом режиме. Представлены некоторые результаты синтеза образцов профилей показателя преломления кварцевых ОВ с диаметром сердцевины 50 и 100 мкм для разных комбинаций опорного значения модовой задержки и параметра градиента профиля первой итерации, а также соответствующие им спектральные характеристики дифференциальной модовой задержки (DMD – Differential Mode Delay) в «О»-диапазоне длин волн.

2. Моделирование кварцевых многомодовых ОВ с уменьшенной дифференциальной модовой задержкой

2.1. Общие положения

Процесс распространения ограниченного числа мод, возбуждаемых лазером, по многомодовым ОВ отличается от обычного многомодового режима передачи, в первую очередь, проявлением известного эффекта DMD [2 – 7]. Именно DMD является ключевой проблемой реализации мультигигабитных сетей передачи данных на основе многомодовых ОВ. Ввод излучения с выхода лазера в многомодовое ОВ приводит к возбуждению ограниченного числа направляемых мод. Кроме того, условия ввода – присутствие осевых и угловых рассогласований заданного (специализированные согласующие устройства) или, напротив, неконтролируемого (типовое соединение на оптических разъемах) значения – определяют перераспределение мощности оптического сигнала между модовыми компонентами. Таким образом, поступающий на вход линейного тракта сигнал переносится отдельными модами с неодинаковой амплитудой и разной скоростью распространения, в результате чего на выходе ВОЛП модовые составляющие поступают с определенной задержкой относительно друг друга, которая становится все более критичной при переходе на мультигигабитные скорости передачи. Как результат, DMD сильно искажает форму импульса на приемной стороне и представляет собой

эффект «перчатки» – разделения сигнала на отдельные компоненты. Более того, из-за неопределенности ввода, обусловленной разбросом параметров лазеров, оптических разъемов и собственно самих многомодовых волокон, значения DMD для каждой комбинации лазер – многомодовое ОВ могут существенно отличаться.

Достаточно подробный обзор известных решений по разработке многомодовых ОВ с увеличенной полосой пропускания, ориентированных, в том числе, не только на уменьшение модовой дисперсии, но и на снижение DMD в маломодовом режиме представлен в монографии [11]. Большинство подходов в основном базируются на мониторинге DMD еще на стадии формирования заготовки волокна. В этом смысле, наибольший интерес представляют работы [12 – 17].

Так, в [12 – 14] целевая функция оценивает степень близости искомого профиля к некоторому профилю, наилучшему с точки зрения минимального разброса групповых скоростей всей совокупности мод, которые могут быть переданы по многомодовому ОВ, т.е. для многомодового режима передачи. В свою очередь, в работах [15 – 17] в качестве целевой функции принята разность между интегральным или локальным значением параметра α ; аппроксимации профиля заготовки степенной функцией и значением параметра 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 волокна, построенной в условиях равномерного возбуждения. В то же время, хорошо известно [2, 11, 18], что именно центрированный ввод является одним из эффективных и доступных для реализации в полевых условиях способов увеличения полосы пропускания многомодовых ВОЛП, функционирующих в маломодовом режиме передачи сигнала.

Вышесказанное позволяет сформулировать основные факторы, которые в обязательном порядке должны быть учтены при синтезе профиля многомодовых ОВ с пониженным значением DMD – так называемых волокон LDMDF, оптимизированных для функционирования в маломодовом режиме. Это, в частности:

- 1) в качестве начального приближения целесообразно использовать конструкцию, геометрию, профиль показателя преломления и его параметры реальных апробированных образцов многомодовых ОВ категории OM2+...OM4, но никак не волокон первых поколений категорий OM1/OM2, а также модельных ОВ с идеализированными степенными профилями показателя преломления;
- 2) разработка или модификация конструкции / профиля показателя преломления ОВ должны в обязательном порядке базироваться на сопоставлении с диаграммой или профилем DMD;
- 3) в обязательном порядке необходимо учитывать тип лазера, состав поперечных мод его излучения и условия ввода сигнала в линию.
- 4) желательно, чтобы уменьшенное значение DMD обеспечивалось не только на одной оптической несущей, а в заданной спектральной области, в частности, телекоммуникационном «О»-диапазоне с опорной длиной волны 1300...1310 нм.

2.2. Моделирование градиентного профиля показателя преломления волокон LDMDF

Как было отмечено выше, предлагаемое решение базируется на выборе специализированной формы профиля показателя преломления, обеспечивающей выравнивание задержек направляемых мод заданного порядка относительно некоторого опорного значения t_{BASE} . Конструкция такого ОВ, которое, в общем случае, удовлетворяет условиям приближения слабонаправляющего оптического волновода, является традиционной: представляет собой кварцевую сердцевину заданного диаметра, легированную Германием (SiO_2-GeO_2), окруженную одной внешней сплошной оболочкой из чистого кварца SiO_2 . В отличие от известных решений [12 – 17], для описания искомого профиля используется общий подход метода стратификации [19]. В результате 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 искомый профиль в области сердцевины ОВ представляется в виде конечного числа N слоев, в пределах которых значение показателя преломления остается постоянным:

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

а сама функция $f(R)$, описывающая профиль показателя преломления:

$$n^2(R) = n_{max}^2 [1 - \Delta \cdot f(R)], \quad (2)$$

записывается в следующем виде:

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

где $h_k = (n_{max}^2 - n_k^2) / (n_{max}^2 - n_N^2)$ – локальный параметр профиля; n_k – показатель преломления k -го промежуточного слоя ($k=0, 1, 2 \dots N-1$); n_{max} – максимум показателя преломления в области сердцевины; n_N – показатель преломления внешней сплошной оболочки; $\Delta = (n_{max}^2 - n_N^2) / 2n_{max}^2$ – параметр высоты профиля; $R_k = r_k/a$ – нормированная радиальная

координата k -го промежуточного слоя; r_k – радиальная координата k -го промежуточного слоя; a – радиус сердцевины моделируемого ОВ.

В результате искомая форма профиля показателя преломления в пределах области сердцевины волокна LDMDF выбирается таким образом, чтобы обеспечивалась минимизация некоторой величины F , которая описывается выражением вида:

$$F = \sum_{j=1}^M (t_{d(j)} - t_{BASE})^2, \quad (4)$$

где $t_{d(j)}$ – искомое значение задержки j -ой направляемой моды азимутального l и радиального m порядка $LP_{lm}^{(j)}$ диаграммы DMD, соответствующей синтезируемому профилю показателя преломления волокна LDMDF; t_{BASE} – некоторое опорное значение модовой задержки, относительно которого осуществляется выравнивание задержек направляемых мод LP_{lm} заданных порядков; M – число направляемых мод, переносящих мощность маломодового оптического сигнала в многомодовом ОВ, для которых оптический фактор ограничения составляет не менее 0,5 ($P_{cot(j)} \geq 0,5$), а нормированная амплитуда – не менее 0,1. Значение M , главным образом, определяется следующими факторами: условиями ввода сигнала с выхода лазера в многомодовое ОВ, составом поперечных мод излучения, которое формируется непосредственно на выходе источника и зависит от типа лазера и его соответствующих характеристик, а также прогнозом появления новых модовых компонент, обусловленного нерегулярной структурой ОВ и наличием микро- и макроизгибов волокон в кабеле, неизбежно возникающих при инсталляции ВОЛП. При этом, в отличие от известных решений, опорное значение модовой задержки t_{BASE} предлагается выбирать из диапазона значений диаграммы DMD, построенной, как было выше отмечено, для M направляемых мод заданного порядка, многомодовых ОВ последних поколений ОМ2+...ОМ4.

Для минимизации целевой функции (4) предлагается использовать симплексный метод Нелдера-Мида, эффективность которого была продемонстрирована в известных работах, посвященных решению задач синтеза волоконных световодов с заданными характеристиками – например, [20, 21] и др.

2.3. Решение прямой задачи расчета параметров передачи модового состава слабонаправляющего волоконного световода сна основе модификации приближения Гаусса

Очевидно, что в процессе минимизации указанной величины F (4) необходимо многократно решать прямую задачу анализа многомодового волоконного световода с направленно изменяемыми параметрами. При этом аргументы целевой функции F представляют собой массив параметров h_k , полностью описывающий профиль показателя преломления ОВ. Для этой цели предлагается использовать разработанную ранее модификацию приближения Гаусса [22], обобщенную на случай расчета параметров передачи направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, ограниченным одной внешней сплошной оболочкой, для представления которого также используется описанный выше подход на основе метода стратификации (далее ОМПГ – обобщение модификации приближения Гаусса). Это позволяет перейти от известной интегральной [23] к аналитической форме записи вариационного выражения для квадрата волноводного параметра моды в сердцевине U^2 в виде конечных вложенных сумм вида [22]:

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

где

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

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

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

$$Q = \frac{(l+m-1)!(3l+2m-1)}{(m-1)!} + 2l^2 \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (q+l-1)! - 4l \sum_{q=0}^{2m-2} C_q (q+l)!;$$

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

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

$R_0 = \rho_0/a$ – эквивалентный нормированный радиус пятна моды; ρ_0 – эквивалентный радиус пятна моды; $V = k_0 a n_{max} \sqrt{2\Delta}$ – нормированная частота (волноводный параметр), определяемая первичными параметрами ОВ; $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число для оптической волны в вакууме; λ – рабочая длина волны; c – скорость света в вакууме. $b_p^{(l,m)}$ – соответствующие коэффициенты степенного ряда формулы явного выражения полинома Лагерра $L_m^{(l)}(x)$ [24]:

$$L_m^{(l)}(x) = \sum_{q=0}^m b_q^{(l,m)} x^q = \sum_{q=0}^m (-1)^q \frac{(l+m)!}{(l+q)!(m-q)!q!} x^q.$$

Характеристическое уравнение для эквивалентного нормированного радиуса пятна моды $\partial U^2 / \partial R_0 = 0$, получаемое, согласно общему алгоритму приближения Гаусса [23] в результате дифференцирования (5) по R_0 , также приводится к аналитическому виду:

$$-Q + V^2 \left[S_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (S_1 - S_2) \right] = 0, \quad (6)$$

где

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

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

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

Результатом численного решения уравнения (6), записанного для геометрических параметров исследуемого ОВ и дискретных значений азимутального и радиального порядков заданной моды LP_{lm} , является эквивалентный нормированный радиус пятна искомой моды R_0 . Последующая подстановка R_0 в вариационное выражение (5) позволяет выполнить оценку параметра моды в сердцевине U , который непосредственно связан с постоянной распространения известным выражением [23]:

$$\beta^2 = k_0^2 n_0^2 - \frac{U^2}{a^2}. \quad (7)$$

Полученное решение характеристического уравнения (6) с учетом последующей подстановки в (5) и далее в (7) должно удовлетворять условию отсечки направляемых мод $kn_N < \beta \leq kn_0$, а также неравенству для оптического фактора ограничения $P_{co}^{(lm)} \geq 0,5$, для которого, в рамках приближения слабонаправляющего оптического волновода, с учетом приближения Гаусса, также было получено аналитическое выражение вида:

$$P_{co}^{(lm)} = \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (l+q)! \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{p=0}^{l+q} \frac{1}{p! R_0^{2p}} \right]. \quad (8)$$

Переход к аналитическому выражению для задержки моды, обратно пропорциональной ее групповой скорости, потребует вывода формул для производных параметра моды в сердцевине $\partial U^2 / \partial \lambda$:

$$\frac{\partial U^2}{\partial \lambda} = \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \left\{ -\frac{2Q}{R_0^3} \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} + \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} \left[X_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1 - X_2) \right] + 2V^2 X_0^{(1)} \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} + \right. \\ \left. + V^2 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\partial h_k}{\partial \lambda} (X_1 - X_2) + 2V^2 \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1^{(1)} - X_2^{(1)}) \right\}; \quad (9)$$

где

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

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

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

и эквивалентного нормированного радиуса пятна моды:

$$\frac{\partial R_0}{\partial \lambda} = \frac{S_0 \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} + \sum_{k=0}^{N-1} \left[(S_0 - S_1) \left(h_k \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} + V^2 \frac{\partial h_k}{\partial \lambda} \right) \right]}{-2V^2 \cdot \left[S_0^{(i)} + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (S_1^{(i)} - S_2^{(i)}) \right]}; \quad (10)$$

где

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

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

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

Затем, соответственно, перейти к уже непосредственно к производной постоянной распространения $\partial\beta/\partial\lambda$:

$$\frac{\partial\beta^2}{\partial\lambda} = -\frac{2k_0^2 n_{max}^2}{\lambda} + k_0^2 \frac{\partial n_{max}^2}{\partial\lambda} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial U^2}{\partial\lambda}. \quad (11)$$

и далее получить конечное аналитическое выражение для модовой задержки t_d , обратно пропорциональной групповой скорости v_g , направляемой моды LP_{lm} заданного порядка в виде:

$$t_d = \frac{1}{v_g} = -\frac{\lambda^2}{4\pi\beta c} \frac{\partial\beta^2}{\partial\lambda} = -\frac{\pi}{k_0^2 \beta c} \frac{\partial\beta^2}{\partial\lambda}. \quad (12)$$

Материальная дисперсия, обусловленная спектральной зависимости показателя преломления, учитывается с помощью хорошо известно уравнения Селлмейера [19]. В свою очередь, поиск коэффициентов Селлмейера для нетабулированных значений концентрации примеси осуществляется с помощью метода, представленного в работе [25].

Таким образом, моделирование волокон LDMDF включает в себя следующие этапы. Предварительно выбирается опорное значение модовой задержки t_{BASE} . Как было отмечено выше, в рамках данной работы это предлагается сделать по результатам анализа диаграммы DMD, построенной для направляемых мод заданного порядка многомодовых ОВ, оптимизированных для совместной работы с лазерными источниками, категорий OM2+...OM4, на оптической несущей $\lambda=1310$ нм. Здесь расчет параметров модового состава также осуществляется на основе представленного ОМПГ. Число мод M , используемых при формировании диаграммы DMD, как было показано выше, определяется условиями ввода сигнала с выхода лазера, составом поперечных мод излучения, которое формируется непосредственно на выходе пигтейла источника, а также прогнозом появления новых модовых составляющих, обусловленного нерегулярной структурой ОВ и наличием микро- и макроизгибов волокон в кабеле, неизбежно возникающих при инсталляции ВОЛП.

3. Результаты моделирования многомодовых ОВ 50/125 с уменьшенной дифференциальной модовой задержкой

В качестве базового многомодового ОВ для определения границ диапазона выбора опорного значения модовой задержки t_{BASE} использовалось многомодовое ОВ 50/125 категории OM2+/OM3, профиль показателя преломления которого, восстановленный на основе протоколов измерения промышленного образца этого ОВ сертифицированным анализатором волоконных световодов [26], представлен на рис. 1. Данный профиль можно рассматривать как наиболее близкий к гладкому степенному. Однако, как хорошо видно из рис. 1, в целом он не является α -профилем и, кроме того, отличается от последнего наличием слабых локальных флуктуаций показателя преломления.

Анализ результатов проведенного на основании ОМПГ расчета данного выбранного опорного ОВ показал, что для такого волоконного световода с диаметром сердцевины 50/125 36 мод удовлетворяют условию отсечки во всем «О»-диапазоне, и при этом их оптический фактор ограничения $P_{co}>0.5$.

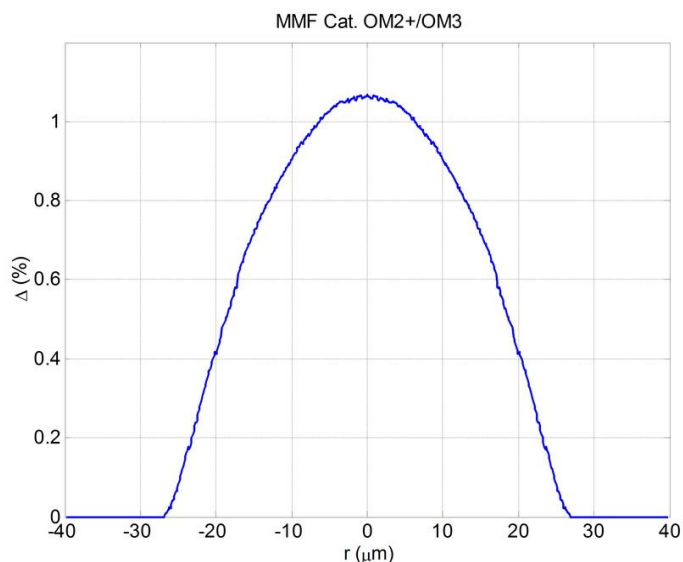


Рис. 1. Опорный градиентный профиль со слабыми флуктуациями показателя преломления промышленного образца многомодового ОВ 50/125 категории OM2+/OM3.

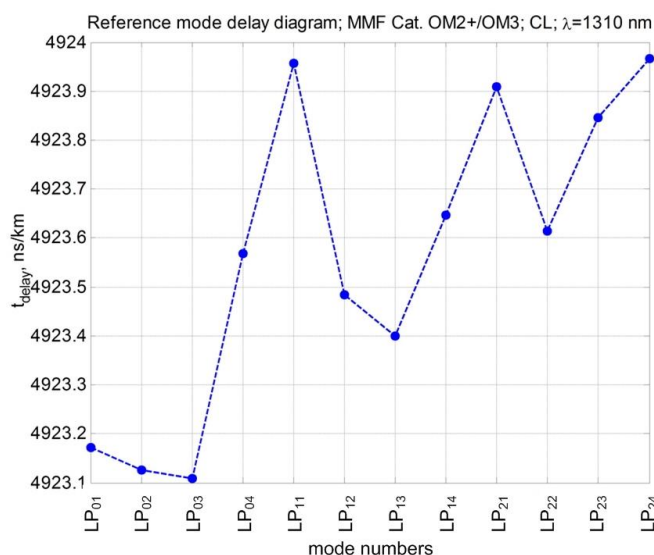


Рис. 2. Диаграмма DMD опорного многомодового ОВ 50/125 категории OM2+/OM3 на длине волны 1310 нм при центрированном вводе оптического сигнала с выхода лазерного диода, пигелированного стандартным одномодовым ОВ.

Как было отмечено выше, увеличение полосы пропускания ОВ в многомодовом режиме потребовало бы разработки градиентного профиля, выравнивающего задержки всех направляемых мод, в то время как согласно предлагаемому подходу, ориентированному на маломодовый режим, следует принимать во внимание только те направляемые моды, значение нормированной амплитуды которых при вводе излучения с выхода лазера и далее при распространении по ОВ, с учетом процессов взаимодействия и смещения модовых компонентов сигнала, составляет не менее 0,1. Так, согласно проведенному расчету коэффициентов связи мод на стыке одномодового согласующего световода, представляющего собой стандартное одномодовое ОВ рек. МСЭ-Т G.652, и рассматриваемого опорного многомодового ОВ в условиях центрированного ввода основной моды LP_{01} и высшей моды LP_{11} с выхода одномодового лазера на длине волны $\lambda=1310$ нм, с учетом последующего моделирования процесса распространения излучения в нерегулярном опорном ОВ, подробно описанного в работе [22], только 12 направляемых мод LP_{lm} ($l=0\dots2$; $m=1\dots4$) непосредственно участвуют в переносе оптического сигнала в маломодовом режиме, и значение их нормированной амплитуды составляет не менее 0,1. Для этих 12 мод была построена диаграмма DMD, приведенная на рис. 2, на основании которой были определены границы выбора опорной задержки t_{BASE} .

Далее была проведена серия синтеза более 40 вариантов искомого профиля показателя преломления LDMDF 50/125 для центрированного ввода излучения с выхода лазера в «О»-диапазоне длин волн при разных комбинаций значений опорной задержки t_{BASE} и α -параметра градиента профиля первой итерации. В результате были отобраны образцы, продемонстрировавшие наилучшие результаты, как с точки зрения минимизации DMD непосредственно на оптической несущей $\lambda=1310$ нм, так и во всем «О»-диапазоне, по сравнению со спектральной характеристикой DMD опорного ОВ. Некоторые из них представлены на рис. 3 (а)...(в). Все три профиля получены для $t_{BASE}=4923,54$ нс/км и $\alpha=1,925$; 1,745 и 1,755, соответственно. Диаграммы DMD для указанных профилей LDMDF 50/125, а также опорного ОВ, сведенные на одном полигоне, приведены на рис. 4. На рис. 5 представлены спектральные характеристики DMD по основной моде LP_{01} , значение которой рассчитывалось по следующей формуле:

$$DMD_{LP01} = \max \left| t_{delay}^{(LP01)} - t_{dealy}^{(LP1m)} \right|. \quad (13)$$

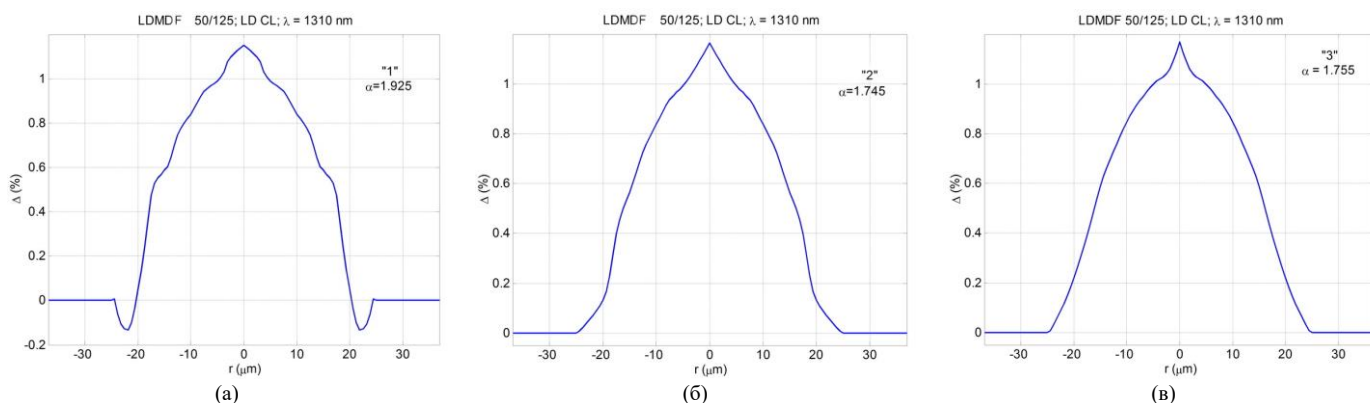


Рис. 3. Результаты синтеза профиля показателя преломления LDMDF 50/125 (центрированный ввод, $\lambda=1310$ нм) при выборе комбинации опорного значения модовой задержки $t_{BASE}=4923,54$ нс/км и параметра градиента профиля первой итерации: (а) $\alpha=1,925$; (б) $\alpha=1,745$; (в) $\alpha=1,755$.

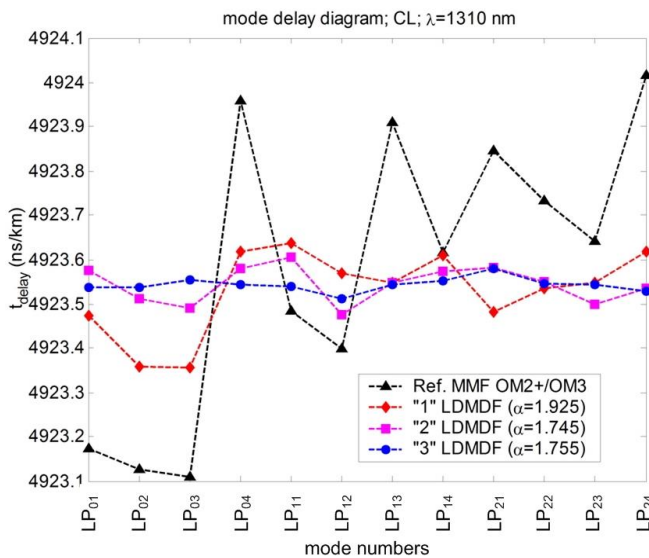


Рис. 4. Диаграммы DMD опорного многомодового ОВ 50/125 категории OM2+/OM3 и LD MDF 50/125.

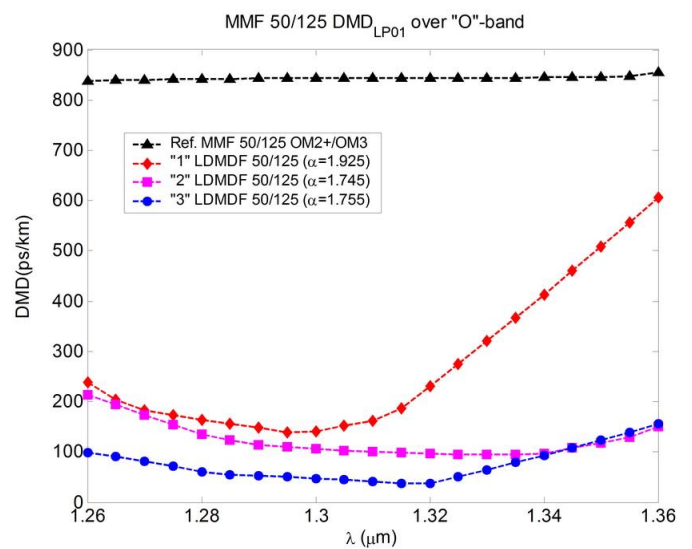


Рис. 5. Спектральные характеристики DMD по основной моде LP_{01} опорного многомодового ОВ 50/125 категории OM2+/OM3 и LD MDF 50/125 в «О»-диапазоне длин волн.

Анализ полученных результатов показывает, что образцы №01...03 градиентных профилей показателя преломления обеспечивают снижение DMD относительно опорного многомодового ОВ не менее чем в 5; 8 и даже 20 раз, соответственно, в центральной области $\lambda=1310$ нм «О»-диапазона длин волн. При этом для образцов №02 и 03 во всем «О»-диапазоне DMD не превышает 200 пс/км, что, как минимум, в 4 раза меньше аналогичного параметра для опорного многомодового ОВ категории OM2+/OM3.

4. Результаты моделирования многомодовых ОВ 100/125 с уменьшенной дифференциальной модовой задержкой

По аналогии с предыдущим разделом, предварительно с помощью ОМПГ был проведен расчет параметров передачи модового состава в «О»-диапазоне длин волн многомодового ОВ с опорным градиентным профилем показателя преломления, представленным на рис. 1 и масштабированным до искомого диаметра сердцевинки 100 мкм. Согласно полученным результатам данное ОВ 100/125 поддерживает распространение до 145 направляемых мод ($l=0...24$; $m=1...11$) в пределах указанной спектральной области, для которых выполняется условие отсечки и оптический фактор ограничения $P_{co} > 0,5$. Однако в случае центрированного ввода основной LP_{01} и высшей LP_{11} мод при подключении лазерного диода, через согласующий световод, представляющий собой стандартное одномодовое ОВ рек. ИТУ-Т G.652, даже с учетом процессов взаимодействия и смешения модовых составляющих, обусловленных нерегулярностью ОВ, а также его микро- и макро-изгибами, неизбежно возникающих на практике при инсталляции реальных кабельных линий [22], основная мощность оптического сигнала будет переноситься только 21 направляемой модой LP_{lm} ($l=0...7$; $m=1...5$), для которых значение нормированной амплитуды будет превышать 0,1. Далее была также проведена серия синтеза более 40 вариантов искомого профиля показателя преломления LD MDF 100/125 для центрированного ввода излучения с выхода лазера в «О»-диапазоне длин волн при разных комбинаций значений опорной задержки t_{BASE} и α -параметра градиента профиля первой итерации. В результате были отобраны образцы, продемонстрировавшие наилучшие результаты, как с точки зрения минимизации DMD непосредственно на оптической несущей. Три из них, полученные для опорной задержки $t_{BASE}=4923,08$ нс/км и $\alpha=1,870$; 1,900 и 1,890 представлены на рис. 6 (а)...(в), соответственно.

Диаграммы DMD для указанных профилей LD MDF 100/125, а также опорного ОВ, сведенные на одном полигоне, приведены на рис. 7. В свою очередь, на рис. 8 представлены спектральные характеристики DMD по основной моде LP_{01} . Согласно полученным результатам расчета, все три образца синтезированных градиентных профилей LD MDF 100/125 обеспечивают снижение DMD в области длины волны $\lambda=1310$ не менее чем в 6 раз, по сравнению с опорным многомодовым ОВ. При этом для образцов №02 и 03 DMD не превышает 400 пс/км во всем «О»-диапазоне, что, как минимум, в 4 раза меньше, по сравнению с аналогичными локальными значениями спектральной характеристики DMD на этих же оптических несущих опорного многомодового ОВ 100/125.

5. Заключение

В работе представлен альтернативный подход моделирования градиентного профиля показателя преломления кварцевых ОВ с сильно увеличенным до 50 и 100 мкм диаметром сердцевинки и уменьшенной DMD. Искомый профиль оптимизирован для маломодового режима передачи оптических сигналов в центральной области (окрестности оптической несущей $\lambda=1310$ нм) телекоммуникационного «О» диапазона длин волн при центрированном вводе излучения с выхода лазерного источника через одномодовый согласующий световод, представляющий собой стандартное одномодовое ОВ рек. ИТУ-Т G.652. На основании предложенного подхода проведено моделирование искомого градиентного профиля показателя преломления. Показано, что при соответствующей комбинации опорного значения модовой задержки t_{BASE} и параметра градиента профиля первой итерации α удастся добиться снижения DMD по основной моде до значений менее 200 пс/км в указанной центральной области «О»-диапазона, что, как минимум, в

4 и 8 раз меньше, по сравнению с аналогичным параметром опорных многомодовых ОВ 50/125 и 100/125, соответственно.

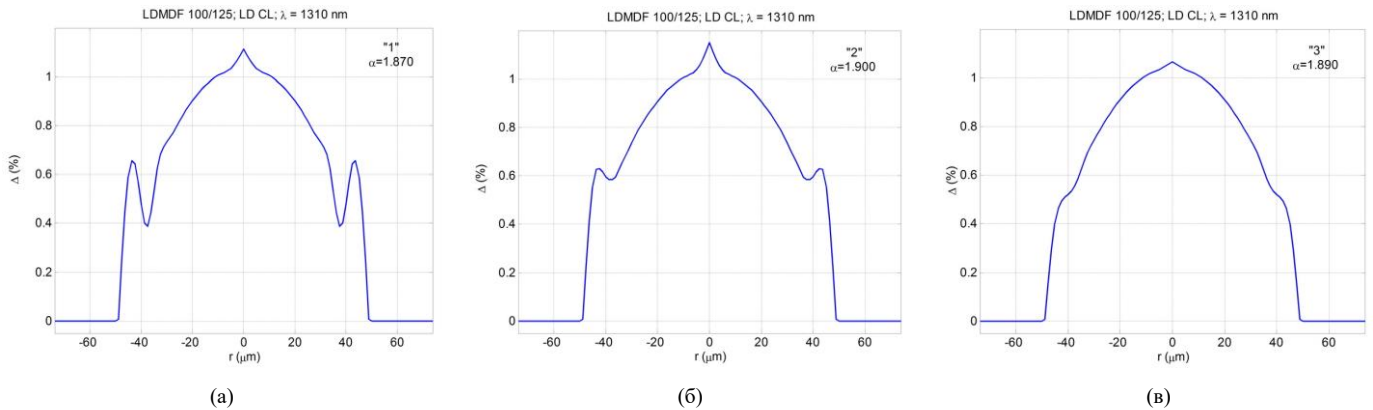


Рис. 6. Результаты синтеза профиля показателя преломления LD MDF 100/125 (центрированный ввод, $\lambda=1310$ нм) при выборе комбинации опорного значения модовой задержки $T_{BASE}=4923,08$ нс/км и параметра градиента профиля первой итерации: (а) $\alpha=1,870$; (б) $\alpha=1,900$; (в) $\alpha=1,890$.

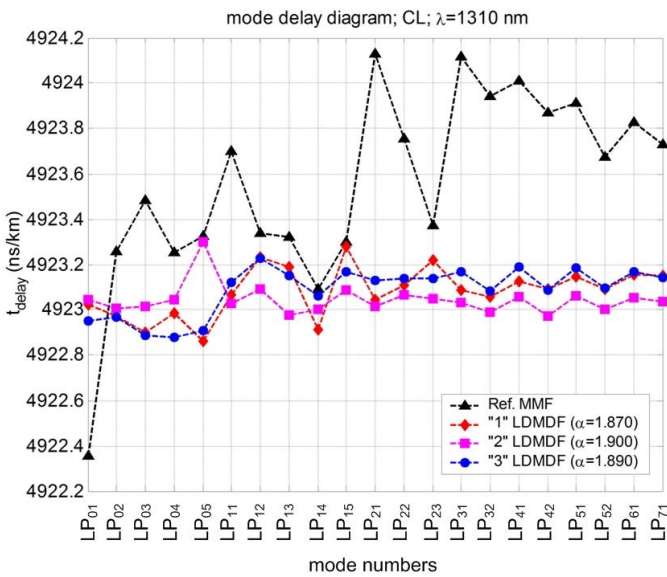


Рис. 7. Диаграммы DMD опорного многомодового ОВ 100/125 категории OM2+/OM3 и LD MDF 100/125.

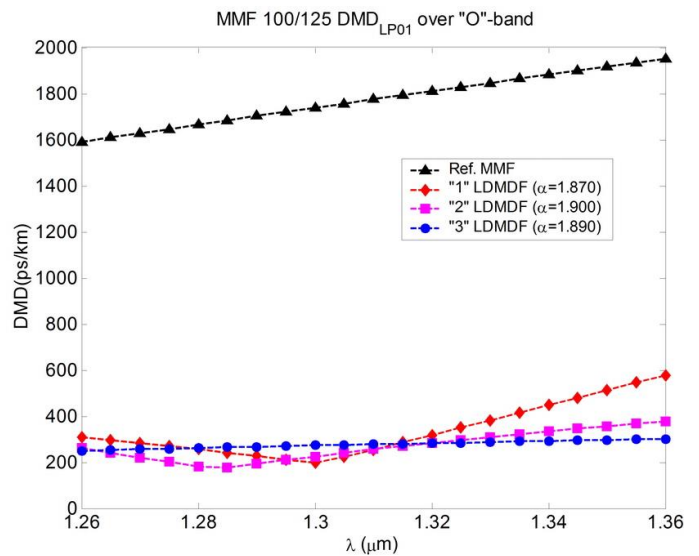


Рис. 8. Спектральные характеристики DMD по основной моде LP_{01} опорного многомодового ОВ 100/125 категории OM2+/OM3 и LD MDF 100/125 в «O»-диапазоне длин волн.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МД-9418.2016.8.

Литература

- [1] Мардер, Н.С. Современные телекоммуникации / Н.С. Мардер. – М.: ИРИАС, 2006. – 384 с.
- [2] Bottacchi, S. Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre. Theory and design methods for 10GbE systems / S. Bottacchi. – West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2006. – 654 p.
- [3] Мазарес, Д. Выбор оптического волокна для центров обработки данных // Технологии и средства связи. – 2009. – №4. – С. 30 – 32.
- [4] Bois, Sh. Next generation fibers and standards. FOLS Presentation materials, 2009 [Electronic resource]. – Access mode: http://www.fols.org/fols_library/presentations/index.cfm
- [5] Roberts, C. Fiber selection and standards guide for premises networks. Corning White Paper. / C. Roberts, R. Ellis. – NY: Corning, 2013. – 8 p.
- [6] Irujo, T. OM4 fiber – the next generation of multimode fiber. FOLS Webconference materials 2010. TIA FOLS Library [Electronic resource]. – Access mode http://www.tiafotc.org/fols_library/archived_webconferences/documents/OM4Final.pdf.
- [7] Семенов, А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. – 632 с.
- [8] Olson, E. The case for fiber in commercial aircraft: solving the bandwidth/distance challenge. Military and Aerospace Electronics N05. 2016 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.militaryaerospace.com/na/te-connectivity/the-case-for-fiber-in-commercial-aircraft.html>
- [9] Liu, Sh. Ship information system: overview and research trends / Sh. Liu, B. Xing, B. Li, M. Gu // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2014. – N 6. – P. 670 – 684. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0204.
- [10] Indra, A. Industrial fiber optics in train transportation systems. White Paper. – Avago Technologies. – 2012.
- [11] Бурдин, А.В. Маломодовый режим передачи оптических сигналов по многомодовым волокнам: приложения в современных инфокоммуникациях. – Самара: ПГУТИ, 2011. – 274 с.
- [12] Patent 4286979 United States Patent, IPC Classification C03B37/07, C03B37/075, G01N21/00. Fabrication of optical fibers using differential mode-group delay measurement / M.J. Buckler, R. Kummer, S.C. Mettler, M. Miller, Bell Telephone Laboratories Inc., USA, – No 19800162263, priority date 23.06.1980; publication date 01.09.1981.

- [13] Stone, F.T. The use of a quantitative differential mode delay technique to improve fiber bandwidth / F.T., Stone, A.J. Ritger, E.D. Head // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 1983. – Vol. LT-1(4). – P. 585 – 587.
- [14] Patent US 2002/0197038 United States Patent, IPC Classification G02B6/18, G02B6/16. Laser optimized multimode fiber and method for use with laser and system employing same / J.S. Abbot, D.E. Harsbarger, Corning Inc., USA, – No 10/217812, priority date 12.08.2002; publication date 26.12.2002.
- [15] Patent WO 2007/043060 A1 World Intellectual Property Organization, IPC Classification C03B37/025, C03B37/07. Optical fiber having higher bandwidth and method for producing the same / P. Bangalore Krishnaswamy, S. Dutta, S.R. Panneerselvam, S.K. Nageswaran, Sterlite Optical Technologies Ltd., India, – No PCT/IN2005/000354, priority date 07.10.2005; publication date 19.04.2007.
- [16] Patent US 6574403 B1 United States Patent, IPC Classification G02B6/02, G02B6/16. Apparatus and method for improving bandwidth of multimode fibers / S.E. Golowich, S.L. Jones, A.J. Ritger, K.S. Thornburg, Fitel USA Corp., USA, – No 09/575867, priority date 17.05.2002; publication date 03.06.2003.
- [17] Achten, F.J. New generation of broad wavelength window multimode fibres / F.J. Achten, M.P.M. Jetten, G.-J. Krabshuis, G. Kuyt, P. Matthijsse, M.J.N. van Stralen // 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.
- [18] Freund, R.E. High-speed transmission in multimode fibers / R.E. Freund, Ch.-A. Bunge, N.N. Ledentsov, D. Molin, Ch. Caspar // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2010. – Vol. 28(4). – P. 569 – 586. DOI: 10.1109/JLT.2009.2030897.
- [19] Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 512 с.
- [20] Боголюбов, А.Н. Метод конечных разностей для решения задач синтеза волноводных систем / А.Н. Боголюбов, А.В. Красильникова, Д.В. Минаев, А.Г. Свешников // *Математическое моделирование*. – 2000. – Т. 12, №1. – С. 13 – 24.
- [21] Боголюбов, А.Н. Синтез волоконных световодов / А.Н. Боголюбов, И.А. Буткарев, А.Г. Свешников // *Радиотехника*. – 2004. – №12. – С. 4 – 12.
- [22] Bourdine, A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime // *Advances in Optical Technologies*. – 2013. – Vol. 2013. – P. 469389-1 – 469389-18. DOI: 10.1155/2013/469389.
- [23] Snyder, A.W. Optical waveguide theory / A.W. Snyder, J. Love. – London: Chapman & Hall, 1983. – 738 p.
- [24] Таблицы интегралов / под ред. И.С. Градштейна, И.М. Рыжика. – М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.
- [25] Бурдин, В.А. Методы определения коэффициентов формулы Селлмейера в задачах анализа дисперсионных характеристик кварцевых оптических волокон // *Инфокоммуникационные Технологии*. – 2006. – №2. – С. 30 – 34.
- [26] Бурдин, А.В. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи / А.В. Бурдин, К.А. Яблочкин // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2010. – №2. – С. 22 – 27.
- [27] Bourdine, A.V. Investigation of defects of refractive index profile of silica graded-index multimode fibers / D.E. Praporshchikov, K.A. Yablochkin // *Proceedings of SPIE*. – 2011. – Vol. 7992. – P. 799206-1 – 799206-8. DOI: doi:10.1117/12.887258.