

СЕКЦИЯ

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Руководитель – д.т.н., профессор **СОКОЛОВ А.В.****ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА
ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

Бирюкова О.В., Бухарин Е.С., Смирнов В.И., Янина Г.М.

Московский энергетический институт (технический университет)

Оптоволоконный датчик турбулентности представляет собой изготовленный из стекловолокна упругий цилиндрический стержень микроскопических размеров, консолью выступающий из жесткой оправы-обтекателя. При наличии турбулентных пульсаций скорости набегающего потока, возникают вынужденные колебания упругого элемента. Выходным сигналом является прогиб (наклон) волоконной цилиндрической консоли, регистрируемый с помощью лазерных оптико-электронных систем.

Системы диагностики турбулентности с гибридными оптоволоконными датчиками позволяют производить измерения пульсационных характеристик потока в реальном времени с высоким пространственным и временным разрешением [1]. Важной проблемой таких измерений является исследование искажений получаемой информации о турбулентных пульсациях потока, вызванных конечными размерами и резонансными свойствами датчиков, а также демпфированием собственных колебаний датчиков в вязкой среде. Интегрально подобные искажения определяются откликом датчика на дельтаобразное воздействие - аппаратной функцией датчика.

Аналитически в этой связи в [2] решалась задача о вынужденных колебаниях консольного стержня длиной l , кругового поперечного сечения диаметра d , под действием гармонической нагрузки $q(z, t)$, равномерно распределенной по длине стержня. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний стержня относительно прогиба $v=v(z, t)$ имеет вид

$$EJ_x \cdot \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} + 2\varepsilon \rho F \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \rho F \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = q(z, t). \quad (1)$$

Здесь E – модуль Юнга, J_x – осевой момент инерции сечения стержня, ρ – плотность материала, F – площадь поперечного сечения, ε – коэффициент демпфирования. Для резонансных частот колебаний стержня в [2] из (1) получено

$$\omega_{\varepsilon k} = \sqrt{\omega_k^2 - \varepsilon^2}, \quad \omega_k = \frac{\chi_k^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_x}{\rho F}}, \quad (2)$$

где

$$\chi_1 = 1,875, \chi_2 = 4,694, \chi_k = \pi(k - 1/2), k \geq 3.$$

В данной работе проводились исследования аппаратной функции гибридного датчика дифракционным методом с фотоэлектрической регистрацией сигнала при импульсном воздействии силовой нагрузки на чувствительный элемент. Такой вариант представлен схематически на рис. 1.

На рис. 1: 1 – лазер, 2 – система формирования зондирующего излучения, 3 – чувствительный элемент датчика, 4 – оправка, 6 – проекционное оптическое устройство, 7 – система регистрации дифракционной картины, 8 – устройство, с помощью которого осуществляется импульсное силовое воздействие на чувствительный элемент датчика. Это устройство удерживает волоконную консоль с помощью реле в нормальном режиме в отклоненном положении. В режиме снятия данных реле срабатывает, высвобождая волокно, которое начинает колебаться. Одновременно запускается программа, позволяющая регистрировать сигнал.

В отличие от схем, использованных в [1,3], в представленной схеме чувствительный элемент датчика не является элементом приемной или передающей оптических систем. Поэтому, в принципе, он может быть изготовлен из любого материала, подходящего по своим упругим свойствам и дающего при облучении лазерным пучком четкую дифракционную картину. Регистрация прогиба производится фотоэлектрическим

или фотографическим методом по смещению дифракционных максимумов в различных плоскостях и (или) по изменению их интенсивности. Для достижения максимальной чувствительности метода можно использовать интерферометрическую систему регистрации и параллаксные эффекты [4].

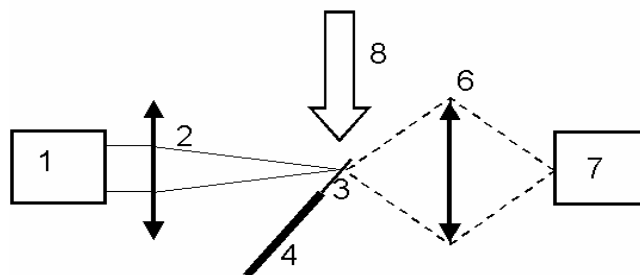


Рис. 1

В установке для проведения исследований используется лазерный анемометрический стенд [5] с цифровой регистрацией электрического сигнала с выхода фотоэлектрического преобразователя. Измерения выполнялись в воздушной и водной средах. Получены данные по аппаратным функциям в зависимости от геометрических и физических параметров чувствительного элемента датчика.

При обработке данных использовался вейвлет-анализ с ядром преобразования на основе гауссовой функции, которое принято называть DOG-вейвлетом (аббревиатура от английского словосочетания Difference of Gaussians) [6]. Использовалось следующее дискретное представление:

$$D_{i,k} = \frac{1}{b_k} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t_i}{b_k} \right)^2 \right] - \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{1}{8} \left(\frac{t_i}{b_k} \right)^2 \right] \right\},$$

где время (параметр сдвига) $t_i = i\Delta t$ ($i=0,1,\dots,n$), временной масштаб $b_k = b_0 + k\Delta b$ ($k=0,1,\dots,m$), b_0 – начальное значение временного масштаба. В проведенных модельных исследованиях для более точного изучения аппаратных эффектов использовались относительно длинные волоконные консоли с большим отношением длины к диаметру.

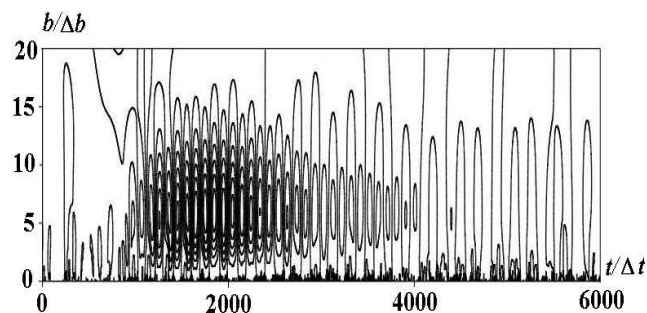


Рис. 2.

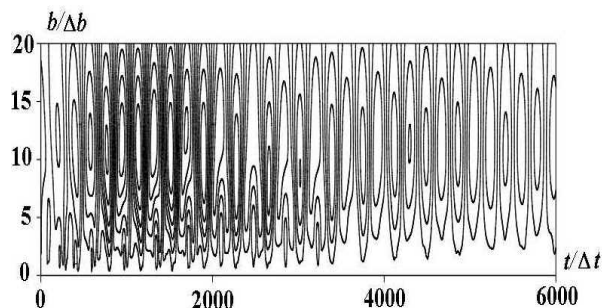


Рис. 3.

На рис.2 и рис. 3 представлены примеры карт изолиний коэффициентов вейвлет-преобразований измерений собственных затухающих колебаний, возбужденных импульсным воздействием в воздушной среде,

двух волоконных консолей (длиной 20 и 30 мм соответственно при диаметре 20 мкм). По вертикальным осям ординат дан безразмерный временной масштаб $b/\Delta b = k$, по горизонтальным осям абсцисс - безразмерное время $t/\Delta t = i$. Тактовый временной интервал Δt определялся возможностями аналогово-цифрового преобразователя и составлял 40 мкс, интервал Δb на приведенных картах составляет $5\Delta t$, $b_0 = \Delta t$.

На картах изолиний коэффициентов вейвлет-преобразований рис.2 и рис.3 наглядно прослеживается периодическая структура колебаний стержней. Вертикальное смещение максимумов определяется периодом колебаний, изменение плотности изолиний в горизонтальном направлении соответствует изменению амплитуды колебаний.

В данной работе вейвлет-анализ использовался также для оптимальной фильтрации высокочастотного шума исходных нестационарных цифровых сигналов, что позволило с высокой точностью определить временные зависимости периодов и амплитуд колебаний, которые представлены на рис. 4 и рис. 5. Круглые значки представляют данные для волоконной консоли длиной 20 мм, квадратные значки – для волоконной консоли длиной 30 мм. Расчеты показывают, что эффективный коэффициент демпфирования для обоих датчиков составляет примерно $\varepsilon \approx 0,07 \cdot \omega_1$, что соответствует достаточно высокой добротности эквивалентной колебательной системы $Q=14 \div 16$. С учетом этого значения результаты расчетов основных периодов резонансных колебаний по формулам (2) совпали с данными рис. 4 в пределах погрешностей расчета и измерений.

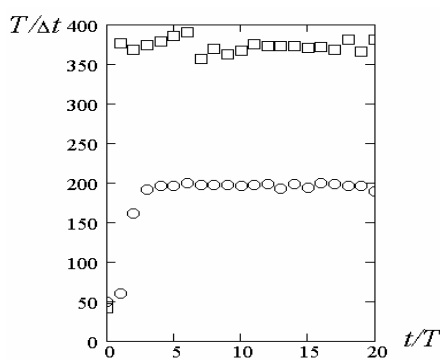


Рис. 4.

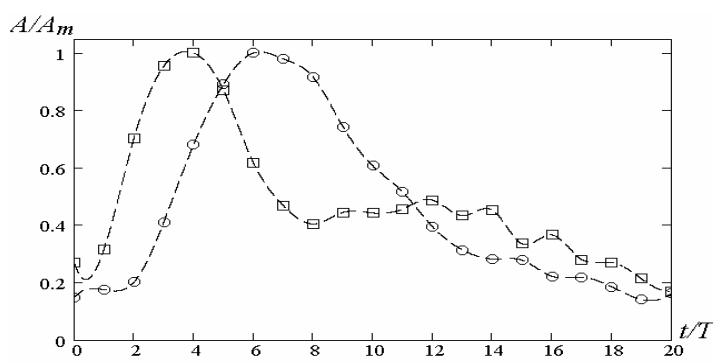


Рис. 5.

Таким образом, обработка полученной экспериментальной информации, выполненная с использованием вейвлет-анализа, позволяет детально исследовать нестационарные процессы затухания собственных колебаний датчиков в вязкой среде и дать количественные оценки их динамических характеристик. В целом, проведенные исследования показали, что в воздушной среде датчики обладают сильно выраженными резонансными свойствами, в то время как в водной среде резонансные свойства системы практически не обнаруживаются. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Минобразования РФ (Т02-02.4-998)

Литература

1. Баканова Е.В., Савич П.А., Смирнов В.И., Устименко В.В., Янина Г.М. Оптоволоконный датчик турбулентности: варианты измерительных схем, характеристики, тестирование. Труды VI Международной научно-техн. конф. Оптические методы исследования потоков. М.: МЭИ. 2001.
2. Бирюкова О.В., Смирнов В.И., Хроматов В.Е., Баженова Д.В., Бухарин Е.С. Исследование резонансных характеристик гибридного оптоволоконного механического датчика турбулентности. Труды VII Международной научно-техн. конф. Оптические методы исследования потоков. М.: МЭИ. 2003.
3. Смирнов В.И., Устименко В.В., Янина Г.М. Лазерный оптико-механический световолоконный датчик турбулентности. // Тезисы докл. 4 научно-технической конф. "Оптические методы исследования потоков". М.: МЭИ. 1997.
4. Смирнов В.И. Параллаксные эффекты в лазерной доплеровской спектроскопии. Квантовая электроника. 1999. Т.29. №3.
5. Логинов А.А. Смирнов В.И. Трехпучковые двухканальные компьютеризованные лазерные доплеровские измерения характеристик турбулентности в струе жидкости. // Измерительная техника. 1996. № 8. С. 35-40.
6. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. УФН, т. 166, № 11.

The distortion of signals of the hybrid fiber sensors of turbulence in fluid flows and gas caused by their final sizes, resonance-frequency behavior, and dampings of the self-oscillating motion of the sensors in viscous medium are explored. The data on spread functions are obtained depending on the physical properties of the sensing unit. Wave-let technique is used for representing and processing experimental data.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЗИСТОРНЫХ ОПТРОНОВ

Денисов Б.Н., Беглов В.И.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева

Расширение возможностей электронных устройств за счет совмещения нескольких функций в одном приборе является основной задачей нового направления – функциональной электроники [1]. Фоторезисторные структуры – один из основных элементов оптоэлектроники, находят широкое применение в современных системах обработки оптической информации. В таких системах полупроводниковый фотоприемник в основном выполняет функции, связанные с преобразованием оптического сигнала в электрический, обеспечивая идеальную гальваническую развязку [2]. Дальнейшие операции, связанные с обработкой сигнала, выполняет электроника.

Совмещение в фоторезисторных структурах функций регистрации и обработки информации приведет к резкому упрощению конструкции и расширению функциональных возможностей оптоэлектронных систем. Основные операции, которые совершают с электрическим сигналом электронные устройства, связаны с процессом умножения (различные виды модуляции, детектирование и др.). Эти операции может выполнять фоторезистор, перемножая оптический сигнал, преобразованный в изменение проводимости, и электрический сигнал в виде напряжения [3].

Пусть на идеальный фоторезистор подано напряжение, которое можно представить в виде ряда Фурье:

$$U = \frac{U_m}{2} + \sum_{k=1}^N U_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k), \quad (1)$$

где $U_m/2$ – постоянная составляющая приложенного напряжения; U_k , $k\omega_0$, φ_k – амплитуда, частота, фаза k -гармоники приложенного напряжения соответственно. Будем полагать, что освещение фоторезистора осуществляется светом, изменение интенсивности которого во времени можно также представить в виде ряда Фурье:

$$\Phi = \Phi_0 + \sum_{k=1}^M [\Phi_k (1 + \cos(k\Omega t + \psi_k))], \quad (2)$$

где $\Phi_0 + \sum_{k=1}^M \Phi_k$ – постоянная составляющая интенсивности света, $[\Phi] = \text{квант}/(\text{м}^2 \text{с})$, Φ_k , $k\Omega$, ψ_k – соответственно амплитуда, частота и фаза гармоник, изменяющаяся во времени интенсивности света.

Нахождение тока через фоторезистор и выяснение функциональных возможностей в этом случае является крайне сложной задачей. Это связано с тем, что нахождение установившейся концентрации свободных носителей связано в общем случае с решением уравнения непрерывности. Для обсуждения принципиальных вопросов, связанных с функциональными возможностями фоторезистивной структуры типа $n^+ - n - n^+$ мы будем полагать фоторезистор идеальным. Контакты к полупроводнику являются омическими и в процессе фотовозбуждения полупроводник остается электронейтральным, т.е. в объеме не образуется пространственный заряд. Генерация светом свободных носителей в объеме образца является однородной, т.е. $d < 1/a$, где a – коэффициент поглощения полупроводника, d – его толщина. Постоянную времени жизни свободных носителей (τ_n) будем считать малым $2\pi/\tau_n \gg k\Omega$, где $k\Omega$ – наивысшая частота в спектре модулированного по интенсивности света. Уровень интенсивности возбуждения будем полагать низким, т.е. $\Delta n \ll n_0$, где n_0 – концентрация электронов в зоне проводимости полупроводника, Δn – концентрация носителей заряда (электронов). В этом случае ток через фоторезистор при $\mu_n \gg \mu_p$ запишется в виде:

$$I = (en_0\mu_n + e\Delta n\mu_n)US/l = (\sigma_0 + \Delta\sigma)US/l, \quad (3)$$

где e – заряд электрона, n_0 – равновесная концентрация электронов, $\Delta n = a\beta\tau_n\Phi$ – неравновесная концентрация электронов, $\sigma_0 = en_0\mu_n$ – равновесная проводимость, $\Delta\sigma = ea\beta\mu_n\tau_n\Phi$, τ_n – время жизни электронов в зоне проводимости, a – коэффициент поглощения света, β – коэффициент рекомбинации, Φ – интенсивность света, U – напряжение, S – площадь контактов, l – расстояние между контактами. Подставляя выражения (1) и (2) в (3) получим соотношение для тока через фоторезистор при освещении:

$$I = \left\{ \sigma_0 + \Delta\sigma + \sum_{k=1}^M \Delta\sigma_k [1 + \cos(k\Omega t + \psi_k)] \right\} \cdot \left[\frac{U_m}{2} + \sum_{k=1}^N U_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k) \right]. \quad (4)$$

Выражение (4) является результатом перемножения двух сигналов электрического вида (1) и оптического в виде (2). Из (4) следует, что идеальный фоторезистор является устройством для перемножения двух сигналов электрического и любого другого преобразованного в оптический.

Операция умножения является одной из основных задач традиционной транзисторной электроники. Получение амплитудно-модулированных (АМ) сигналов, синхронное детектирование, получение сигналов с угловой модуляцией, детектирование фазомодулированных сигналов - все это связано с операцией перемножения двух сигналов. Задача перемножения в традиционной электронике, строго говоря, до сих пор не решена. Транзисторный (ламповый) усилитель выполняет операцию перемножения суммы двух сигналов (высочастотного и моделирующего) за счет нелинейной проходной характеристики, что приводит к значительным нелинейным искажениям. В отличие от идеального транзисторного перемножителя, идеальный фоторезистор, осуществляя операции перемножения, не вносит нелинейных искажений. В спектре сигнала на входе фоторезистора отсутствуют комбинационные частоты типа $\omega_1 + 2\omega_2$, которые приводят к неустойчивым искажениям сигнала. С помощью фоторезистора можно осуществлять амплитудную модуляцию. Пусть сигнал сообщения преобразован в оптический сигнал вида:

$$\Phi = \Phi_0 (1 + \cos \Omega t). \quad (5)$$

Подавая на фоторезистор высокочастотное напряжение вида $U = U_m \cos \omega t$, получим выражение для тока на входе фоторезистора:

$$I = I_0 \cos \omega t + \frac{\Delta I_0}{2} \cos(\omega - \Omega)t + \frac{\Delta I_0}{2} \cos(\omega + \Omega)t, \quad (6)$$

где $I_0 = (n_0 + e a \beta \Phi_m \tau_n) \mu_n U_m S / l$, $\Delta I_0 = e a \beta \Phi_m \tau_n \mu_n U_m S / l$, ω - частота высокочастотного сигнала, U_m - амплитуда переменного напряжения, Ω - частота модуляции оптического сигнала, Φ_0 - интенсивность постоянной составляющей света. Выражение (6) является классическим АМ сигналом. Как видно из (6) никаких комбинационных частот вида $\omega + 2\Omega$ в АМ сигнале не присутствует.

Рассмотрим операцию синхронного детектирования. Пусть напряжения приложенного к идеальному фоторезистору имеет вид однотонального АМ сигнала. Для осуществления операции синхронного детектирования необходимо осветить фоторезистор оптическим сигналом, интенсивность которого изменяется с частотой высокочастотного сигнала $\Phi = \Phi_0 (1 + \cos \omega t)$. В этом случае ток на входе идеального фоторезистора будет равен:

$$I = I_m \cos \omega t + \frac{I_m}{2} \cos(\omega - \Omega)t + \frac{I_m}{2} \cos(\omega + \Omega)t + I_m + \frac{I_m}{4} \cos(2\omega - \Omega)t + \frac{I_m}{4} \cos(2\omega + \Omega)t + \frac{I_m}{2} \cos \Omega t. \quad (7)$$

Последнее слагаемое в уравнении (7) является сигналом, несущим информацию. В соотношении (7) отсутствуют комбинационные частоты, кратные Ω . Сигнал информации может быть легко выделен с помощью фильтра низких частот при полном отсутствии нелинейных искажений в спектре сигнала сообщения, что в принципе невозможно осуществить с помощью средств транзисторной электроники.

Рассмотрим процесс фазового синхронного детектирования сигналов с помощью идеального фоторезистора. Пусть к фоторезистору приложено фазомодулированное напряжение вида:

$$U = U_m \sin[\omega_0 t + \varphi(t)]. \quad (8)$$

Для детектирования такого сигнала осветим фоторезистор светом, интенсивность которого изменяется по гармоническому закону с частотой ω_0 . В этом случае сигнал (ток) на выходе фоторезистора будет описываться соотношением, аналогичным (7):

$$I = I_m \sin[\omega_0 t + \varphi(t)] + \frac{I_m}{2} \sin[2\omega_0 t + \varphi(t)] + \frac{I_m}{2} \sin \varphi(t). \quad (9)$$

Если девиация фазы достаточно мала, то третье слагаемое будет пропорционально сигналу сообщения

$$I = \frac{I_m}{2} \varphi(t). \quad (10)$$

Аналогично можно детектировать частотно модулированный.

Как видно из приведенного рассмотрения фоторезистивная структура может выполнять операции с сигналом, которые осуществляются с помощью транзисторной электроники. Основное преимущество применения фоторезистора для обработки сигналов заключается в резком снижении нелинейных искажений сигнала сообщения. А главное, фоторезистор в оптронном устройстве может выполнять функции транзисторной электроники. Возможны и другие случаи применения фоторезистора в электронике, когда транзистор вы-

полняет роль управляемого сопротивления, например, в различных видах фазовых модуляторах на основе мостовых RC схем и RLC делителях [4].

Резисторный оптрон может выполнять функцию анализатора спектра электрических сигналов или других преобразованных в оптический модулированный по интенсивности сигнал. Согласно (4), при совпадении частот сигналов на выходе фоторезистора появится постоянный ток пропорциональный амплитуде гармонике исследуемого сигнала. Например, пусть исследуемым является электрический сигнал вида (1). При освещении его светом, интенсивность которого изменяется по закону (5), на выходе фоторезистора появится сигнал:

$$I = \{\sigma_0 + \Delta\sigma[1 + \cos(\Omega t)]\} \cdot \left[\frac{U_m}{2} + \sum_{k=1}^N U_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k) \right]. \quad (11)$$

При $\Omega = k\omega_0$ на выходе фоторезистора появится постоянный ток, пропорциональный амплитуде гармонике исследуемого сигнала U_k , который может быть зарегистрирован в простейшем случае интегрирующим устройством или гальванометром магнитоэлектрической системы. Резисторный оптрон может быть основой приборов, осуществляющих спектральный анализ.

Реальные фоторезисторы являются инерционными приборами. Искажения, вносимые в регистрируемый сигнал в этом случае, будут связаны с уменьшением амплитуд гармоник сигнала при увеличении частоты модуляции оптического сигнала. Это явление в ряде случаев позволяет эффективно детектировать частотно модулированные сигналы. Кинетика реальных фоторезисторов в случае межзонной рекомбинации при высоком уровне инжекции является нелинейной. Фототок в этом случае пропорционален $\sqrt{\Phi}$, где Φ – интенсивность света. Аналитическое выражение для фототока при гармоническом возбуждении может быть найдено в квазистационарном приближении. Пусть возбуждение осуществляется светом, модулированным частотой $\omega \ll 2\pi\sqrt{\gamma A}$, где $A = \alpha \cdot \beta \cdot \Phi_0$, γ – коэффициент рекомбинации, α – коэффициент поглощения, β – квантовый выход. В этом случае изменение неравновесной концентрации практически повторяет изменение интенсивности света. Изменение концентрации свободных носителей может быть записано в виде:

$$\Delta n = \sqrt{\frac{A}{\gamma} (1 - \cos \omega t)} = \sqrt{\frac{A}{\gamma}} \left| \sin \frac{\omega t}{2} \right|. \quad (12)$$

Зависимость избыточной концентрации от времени, а, следовательно, фототока имеет вид выпрямленной синусоиды. Такая зависимость позволяет осуществлять функцию умножения частоты, которая реализуется в транзисторной электронике путем отсечки коллекторного тока.

В результате проведенного рассмотрения функциональных свойств фоторезистора следует, что фоторезистор в оптроне может выполнять большинство функций транзисторной электроники для обработки сигналов. Следовательно, в резисторном оптроне возможно совмещение функций приема и обработки оптического сигнала, несущего информацию, что резко уменьшает число связей между элементами в устройствах обработки информации, обеспечивая непрерывность перехода из оптических линий связи в электронную.

Литература

1. Щука А.А. Электроника четвертого поколения - функциональная электроника - Инженерная микроэлектроника. -1999.-вып.4.-С.1-5.
2. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника, М: Радио и связь,1989. -366С.
3. Беглов В.И., Денисов Б.Н., Нищев К.Н., Турышев В.Н. Передатчик с амплитудной модуляцией. //Патент 39240, Россия, МПК-7 Н 03 С 5/02, 2004г.
4. Беглов В.И., Денисов Б.Н., Бибанина Е.М. Фазовый модулятор. // Патент 36069, Россия, МПК-7 Н 03 С 5/02, 2004г.

We have studied the functional qualities of photoresistor. We found out that photoresistor can operate as a transistor while caring out the operation of amplitude and phase modulation as well as harmonic spectrum.



ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОИЗВОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛАБОНАПРАВЛЯЮЩИХ ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Андреев Р.В.

Поволжская Государственная академия телекоммуникаций и информатики

В работе представлены результаты теоретических исследований спектральных характеристик производных нормированной частоты и высоты профиля для слабонаправляющих одномодовых оптических волокон. Исследовались первая и вторая производные. Для расчетов нормированной частоты и высоты профиля использовались известные аналитические выражения для слабонаправляющих одномодовых оптических волокон и формула Сельмейера. Вычисления, были выполнены для одномодовых оптических волокон для чистого кварца, германатного стекла, боросиликатного стекла, фтористого стекла.

Для расчета приведенной к единице длины и единице полосы длин волн источника излучения хроматическая дисперсия оптической линии передачи рассчитывается по известной формуле [1-3]

$$D = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot c} \left[\lambda^2 \cdot \frac{d^2 \beta}{d\lambda^2} + 2 \cdot \lambda \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} \right] \quad (1)$$

где D – приведенное значение хроматической дисперсии, пс/(нм·км); β – коэффициент фазы (мнимая часть постоянной распространения), рад/км; c – скорость света, км/с; λ – длина волны, нм;

Из формулы (1) следует, что для нахождения хроматической дисперсии необходимо найти постоянную распространения, и ее производные первого и второго порядков.

Постоянная распространения, для всех типов волокон рассчитывается по известной формуле [1-3].

$$\beta^2 = \frac{1}{a^2} \left(\frac{V^2}{2\Delta} - U^2 \right) \quad (2)$$

где

$$V = k \cdot a \cdot n_0 \cdot (2 \cdot \Delta)^{1/2}; \Delta = \frac{n_0^2 - n_{cl}^2}{2 \cdot n_0^2} \quad (3)$$

V – нормированная частота; Δ – высота профиля; n_c – значение показателя преломления на оси волокна; n_o – значение показателя преломления оболочки волокна; $k = 2 \cdot \pi / \lambda$ – волновое число в свободном пространстве; a – радиус сердцевин.

Из формулы (2) видно, что постоянная распространения зависит от первого многочлена $\frac{V^2}{2\Delta}$ и ее производных. В зависимости от того, какие значения принимают производные первого и второго порядков, параметра $\frac{V^2}{2\Delta}$ во многом зависит постоянная распространения.

Величины V^2 , Δ и их производные определяются аналитически из (3), если известны спектральные характеристики показателей преломления сердцевин и оболочки оптического волокна и их производных по длине волны. Спектральные характеристики показателя преломления плавленого стекла хорошо описываются формулой Селмейера [4-5].

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \quad (4)$$

Значения коэффициентов (5) зависят от концентрации легирующей присадки. Для определения коэффициентов формулы Селмейера в зависимости от концентрации легирующего материала применяли алгоритм, предложенный в [4-5].

Подставляя (4) в (3) получаем следующую формулу (5)

$$\Delta = 0,5 * \left(1 - \left(\frac{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_o * \lambda^2}{\lambda^2 - b_o^2}}{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_c * \lambda^2}{\lambda^2 - b_c^2}} \right) \right) \quad (5)$$

Выражения для производных функций Δ получаем из (5) выполняя операцию дифференцирования. Формулы для производных первого и второго порядков имеют вид (6) (7).

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \lambda} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\partial n_o^2}{\partial \lambda} / \frac{\partial n_c^2}{\partial \lambda} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial \lambda^2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\partial^2 n_o^2}{\partial \lambda^2} / \frac{\partial^2 n_c^2}{\partial \lambda^2} \right) \quad (7)$$

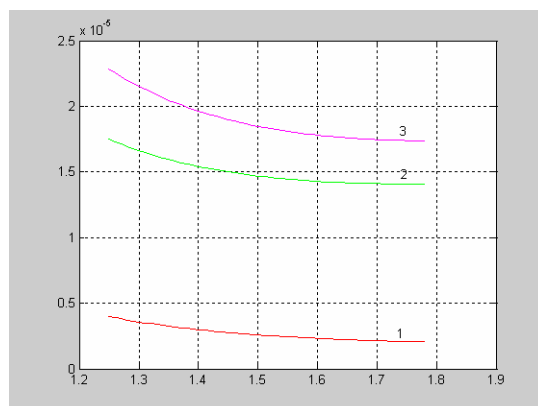
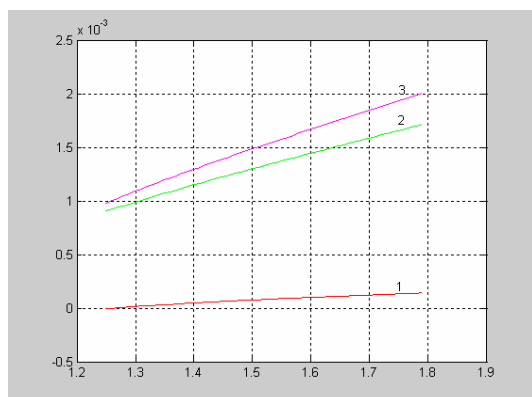
Как уже говорилось, при расчете постоянной распространения (2) важную роль играют значения первого многочлена $\frac{V^2}{2\Delta}$ и ее производные. Используя формулу (3) введем параметр

$$\bar{V} = \frac{V}{\sqrt{2 * \Delta}} \quad (8)$$

n_0 рассчитываем по формуле (4). Тогда подставляя (4), (8) в (3) получаем следующую формулу (9).

$$\bar{V}^2 = 4 * \pi^2 * a^2 * \left(\frac{1}{\lambda^2} + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \right) \quad (9)$$

Формулы для производных первого и второго порядков для параметра $\bar{V}^2$ получаем из (9) они имеют следующий вид (10), (11).



$$\frac{\partial \bar{V}^2}{\partial \lambda} = 4 * \pi^2 * a^2 * \left(-\frac{2}{\lambda^3} + \frac{\partial n_o^2}{\partial \lambda} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{V}^2}{\partial \lambda^2} = 4 * \pi^2 * a^2 * \left(\frac{6}{\lambda^4} + \frac{\partial^2 n_o^2}{\partial \lambda^2} \right) \quad (11)$$

На рис. 1 и рис. 2 показан график зависимости первой и второй производной высоты профиля от λ для разных концентраций волокна. В качестве примера на рис. 3 представлена зависимость второй производной $\bar{V}^2$ от длины волны, для разных радиусов и для разных концентраций волокна.

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \lambda}$$

Рис. 1 Зависимость $\frac{\partial \Delta}{\partial \lambda}$ от длины волны

1-германатные стекла, 2-боросиликатные стекла, 3-фтористые стекла

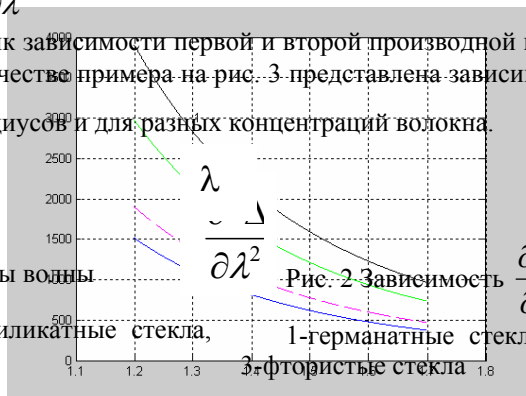


Рис. 2 Зависимость $\frac{\partial^2 \Delta}{\partial \lambda^2}$ от длины волны

1-германатные стекла, 2-боросиликатные стекла, 3-фтористые стекла

λ

λ

Рис. 3 Зависимость $\frac{\partial^2 \bar{V}^2}{\partial \lambda^2}$ от длины волны 1-чистый кварц $n=4.01$, 2-германатные стекла $n=3.8$, 3-боросиликатные стекла $n=3.5$, 4-фтористые стекла $n=2.5$

Получены количественные оценки параметров спектральных характеристик высоты профиля показателя преломления, параметра $\frac{V^2}{2\Delta}$ и их производных для слабонаправляющих одномодовых оптических волокон. Полученные результаты позволяют проанализировать нормированную частоту и высоту профиля, используемых для расчета постоянной распространения β .

Литература

1. Снайдер А., Лав Дж. Теория диэлектрических волноводов. - М.: Радио и связь, 1987. - 656 с.
2. Бурдин В. А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи. - М.: Радио и Связь, 2002. - 312 с.
3. Okamoto K. Fundamentals of Optical Waveguides. - San Diego: Academic Press, 2000. - 428 p.
4. А. С. Беланов, В. И. Кривенков, Е. А. Коломийцева Расчет дисперсии в световодах со сложным профилем показателя преломления// Радиотехника, No.3, 1998.- с. 32-35.
5. Fleming J. W. Material dispersion in lightguide glasses, Electron. Lett., vol.14, pp. 326-328, 1978.

RESEARCH OF SPECTRAL DEPENDENCES OF DERIVATIVES CHARACTERISTICS FOR WEAKLY GUIDING SINGLE-MODE OPTICAL FIBRES

In work results of theoretical researches of derivative's spectral characteristics of the normalized frequency and profile height for weakly guiding single-mode optical fibres are submitted. The first and second derivatives were investigated. Known analytical expressions for weakly guiding single-mode optical fibres and Sellmeier formula were used for calculations of the normalized frequency and profile height.



АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ КРУГЛЫХ СЛАБОНАПРАВЛЯЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ОТ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Андреев Р.В., Прапорщиков Д.Е.

Поволжская Государственная Академия Телекоммуникаций и Информатики

В работе представлены результаты теоретических исследований спектральных характеристик параметров хроматической дисперсии, (длины волны нулевой дисперсии, наклона спектральной характеристики) в зависимости от радиуса сердцевины и высоты профиля. Для расчетов дисперсии использовались известные аналитические выражения, полученные на основе модифицированного метода приближения Гаусса. Вычисления, были выполнены для одномодовых оптических волокон со ступенчатым, треугольным и параболическим профилем показателя преломления в рабочем диапазоне длин волн систем CWDM. Полученные результаты позволяют прогнозировать тенденции изменений параметров спектральных характеристик хроматической дисперсии, в зависимости от профиля показателя преломления оптического волокна.

Разработка оптических волокон, дисперсионные характеристики которых максимально удовлетворяют заданным требованиям, продолжается и в настоящее время. При этом стремятся обеспечить заданные свойства спектральной характеристики дисперсии в как можно более широком диапазоне. Важную роль играют не только значения и знак дисперсии, но и вид дисперсионной характеристики, ее параметры: длина волны нулевой дисперсии, наклон характеристики, кривизна. Заданные параметры дисперсионной характеристики обеспечиваются за счет выбора соответствующего профиля показателя преломления оптического волокна. При решении задачи синтеза профиля методами оптимизации важно при формировании начальных условий с максимальной точностью приблизиться к глобальному минимуму. Это требует предварительных исследований спектральных характеристик хроматической дисперсии в зависимости от параметров профиля показателя преломления оптического волокна. Результаты исследований спектральных характеристик хроматической дисперсии, ее параметров (длины волны нулевой дисперсии, наклона спектральной характеристики) в зависимости от радиуса сердцевины и высоты профиля представлены в данной работе.

Здесь ограничились анализом слабонаправляющих оптических волокон с осе-симметричным профилем показателя преломления и исследованиями в диапазоне нормированных частот больше единицы, что характерно для оптических волокон сетей связи. Это позволило воспользоваться для расчета хроматической дисперсии основной моды известными аналитическими выражениями, полученными на основе модифицированного метода приближения Гаусса [1-2]. Вычисления были выполнены для одномодовых оптических волокон со ступенчатым и треугольным и параболическим профилями показателя преломления.

Для расчета приведенной к единице длины и единице полосы длин волн источника излучения хроматической дисперсии оптической линии передачи использовалась известная формула [1-3]

$$D = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot c} \left[\lambda^2 \cdot \frac{d^2 \beta}{d\lambda^2} + 2 \cdot \lambda \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} \right] \quad (1)$$

где D - хроматическая дисперсия; β - постоянная распространения оптического волновода; c - скорость света; λ - длина волны.

Для расчета постоянной распространения β использовали известные выражения [1-3]

$$\beta^2 = \frac{1}{a^2} \left(\frac{V^2}{2\Delta} - U^2 \right) \quad (2)$$

$$V = k \cdot a \cdot n_0 \cdot (2 \cdot \Delta)^{1/2}; \Delta = \frac{n_0^2 - n_{cl}^2}{2 \cdot n_0^2} \quad (3)$$

$k = 2\pi / \lambda$ - волновое число в свободном пространстве.

Для расчета спектральных характеристик постоянной распространения и ее производных использовали методом приближения Гаусса и его модификацию для произвольного профиля показателя преломления [1-2].

Метод основан на аппроксимации радиальной зависимости поля основной моды функцией Гаусса.

$$F_0(R) = \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

где $R = r/a$ - приведенный радиус; R_0 - приведенный эквивалентный радиус пятна моды;

Для определения эквивалентного радиуса пятна моды необходимо решить вариационное уравнение

$$\frac{dU^2}{dR_0} = 0 \quad (5)$$

В случае приближения Гаусса параметр основной моды определяется выражением

$$U^2 = \frac{2}{R_0^2} \cdot \int_0^\infty \left\{ \left[\frac{dF_0(R)}{dR} \right]^2 + V^2 \cdot f(R) \cdot [F_0(R)]^2 \right\} \cdot R dR \quad (6)$$

Здесь $f(R)$ - функция, задающая профиль показателя преломления, который описывается формулой:

$$n^2(R) = n_0^2 \cdot [1 - 2 \cdot \Delta \cdot f(R)] \quad (7)$$

Для произвольного профиля показателя преломления можно использовать аппроксимацию [2]

$$f(R) = h_p, p \cdot \Delta R \leq R < (p+1) \cdot \Delta R, p = 0, 1, \dots, m \quad (8)$$

где m - число узлов сетки.

Подставляя (4), (6), (8) в (5) получаем характеристическое уравнение для R_0

$$1 + V^2 \cdot S_1 = 0 \quad (9)$$

Отсюда следуют выражения для расчета квадрата параметра моды U^2 и его производных

$$U^2 = 1/R_0^2 + V^2 \cdot S_0 \quad (10)$$

В выражениях (8)-(10) величины S_0, S_1 рассчитываются по формуле

$$S_j = \sum_{p=1}^m h_p \cdot \left\{ (-p \cdot \Delta R)^{2 \cdot j} \cdot \exp \left(-\frac{p^2 \cdot \Delta R^2}{R^2} \right) - [(p+1) \cdot \Delta R]^{2 \cdot j} \cdot \exp \left[-\frac{(p+1)^2 \cdot \Delta R^2}{R^2} \right] \right\} \quad (11)$$

Величины V^2 , Δ и их производные определяются аналитически из (3), если известны спектральные характеристики показателей преломления сердцевинки и оболочки оптического волокна и их производных по длине волны. Спектральные характеристики показателя преломления плавленого стекла хорошо описываются формулой Селмейера [3-4]

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \quad (12)$$

Для определения коэффициентов формулы Селмейера в зависимости от концентрации легирующего материала применяли алгоритм, предложенный в [3-4]. Однако, в отличие от известного алгоритма, здесь в качестве аргумента интерполяционной формулы Лагранжа использовали параметр высоты профиля Δ , выраженный в процентах.

Формулы для производных постоянной распространения первого, второго порядка получены из (2), путем дифференцирования β по длине волны λ . Они имеют следующий вид

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \frac{d\beta^2}{d\lambda}; \quad \frac{d^2\beta}{d\lambda^2} = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[\frac{d^2\beta^2}{d\lambda^2} - 2 \cdot \left(\frac{d\beta}{d\lambda} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$\frac{d\beta^2}{d\lambda} = \frac{1}{a^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{d(V^2/\Delta)}{d\lambda} - \frac{dU^2}{d\lambda} \right]; \quad \frac{d^2\beta^2}{d\lambda^2} = \frac{1}{a^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{d^2(V^2/\Delta)}{d\lambda^2} - \frac{d^2U^2}{d\lambda^2} \right] \quad (14)$$

В качестве примера на рис.1 представлены результаты расчетов спектральных характеристик дисперсии оптических волокон со ступенчатым профилем показателя преломления. Расчеты выполнялись для фиксированного значения радиуса сердцевинки при разных значениях высоты профиля. На рис. 2, рис.3 приведены полученные в результате обработки этих спектральных характеристик зависимости длины волны нулевой дисперсии и коэффициента наклона дисперсионной характеристики на длине волны нулевой дисперсии от высоты профиля. Аналогично рассчитываются дисперсионные характеристики для параболического и треугольного профиля показателя преломления.

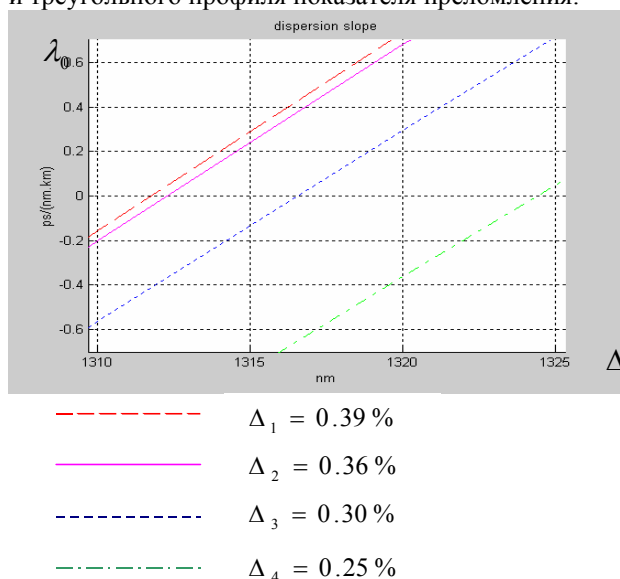


Рис.1 Спектральные характеристики дисперсии оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления и диаметром сердцевинки 4.01 мкм

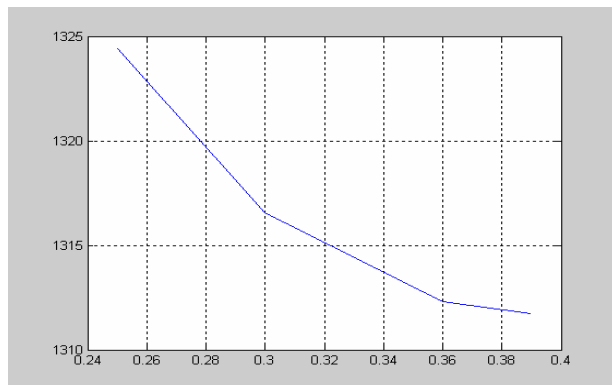


Рис.2 Зависимость длины волны нулевой дисперсии λ_0 от высоты профиля

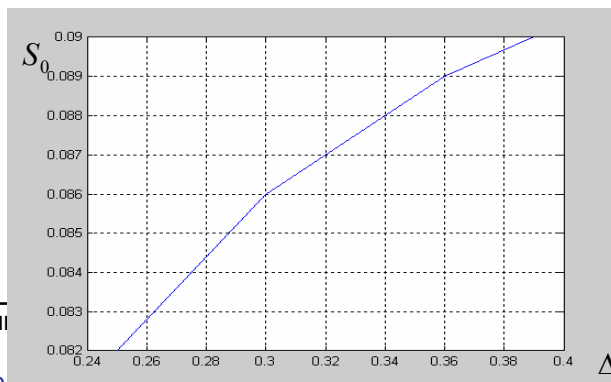


Рис.3 Зависимость коэффициента наклона дисперсионной характеристики на длине волны нулевой дисперсии S_0 от высоты профиля

Более короткая длина волны нулевой дисперсии характерна для ступенчатых волокон, более длинная – для треугольного профиля. Параболический профиль соответствует промежуточному варианту. При этом у ступенчатых волокон больший наклон дисперсионных характеристик на длине волны нулевой дисперсии. Самый малый наклон из всех перечисленных выше имеют волокна с треугольным профилем.

В [1] дано определение объема профиля и введено понятие о профилях равного объема. Если воспользоваться этим представлением, то можно сделать вывод, что при равной высоте профиля меньший наклон характеристики и большее смещение длины волны нулевой дисперсии в область длинных волн соответствует профилям меньшего объема. При этом с увеличением высоты профиля увеличивается длина волны нулевой дисперсии и уменьшается наклон характеристики на этой длине волны.

Аналогично рассчитываются дисперсионные характеристики в зависимости от радиуса профиля. Расчеты выполнялись для фиксированного значения высоты профиля при разных значениях радиуса сердцевин.

Получены количественные оценки параметров спектральных характеристик дисперсии для волокон со ступенчатым, треугольным и параболическим профилем показателя преломления в зависимости от высоты профиля и радиуса сердцевин. Показано, что большее смещение длины волны нулевой дисперсии в область длинных волн и снижение наклона характеристики на длине волны нулевой дисперсии соответствует профилям меньшего объема.

При этом длина волны нулевой дисперсии уменьшается, а наклон характеристики на этой длине волны возрастает с увеличением радиуса сердцевин волокна и снижением высоты профиля. Полученные количественные оценки позволяя более точно задавать начальные параметры при поиске профиля методами оптимизации. Рассмотренный подход позволяет получать оценки параметров дисперсионных характеристик волокон с более сложными профилями.

Литература

1. Снайдер А., Лав Дж. Теория диэлектрических волноводов. - М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
2. Бурдин В. А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи. – М.: Радио и Связь, 2002. – 312 с.
3. А. С. Беланов, В. И. Кривенков, Е. А. Коломийцева Расчет дисперсии в световодах со сложным профилем показателя преломления// Радиотехника, No.3, 1998.- с. 32-
4. Fleming J. W. Material dispersion in lightguide glasses, Electron. Lett., vol.14, pp. 326-328, 1978.

ANALYSIS OF DEPENDENCES OF CHROMATIC DISPERSION PARAMETERS FOR CIRCLE WEAKLY GUIDING OPTICAL FIBRES FROM REFRACTIVE INDEX PROFILE

In the job results of theoretical researches of chromatic dispersion slopes, its parameters (wavelength of zero dispersion, inclination of the spectral characteristic) are submitted depending on core radius and profile height. For calculations of dispersion the known analytical expressions received on the basis of the modified Gaussian approximation method were used. Calculations have been executed for single-mode optical fibres with a step, triangular and parabolic refractive index profile in the working range of wavelengths of CWDM systems. The received results allow to predict tendencies of dispersion slopes parameters changes depending on the refractive index profile of an optical fibre.

К ОЦЕНКЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛАБОНАПРАВЛЯЮЩИХ СТУПЕНЧАТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Бурдин В.А.

Поволжская Государственная Академия Телекоммуникаций и Информатики

Для решения задач оптимизации профиля показателя преломления оптических волокон с заданными дисперсионными характеристиками представляют интерес приближенные модели, которые, обеспечивая приемлемые погрешности оценок, не требуют значительных времени для вычислений. Адекватность приближенных моделей для расчета спектральных характеристик дисперсии слабонаправляющих оптических волокон можно оценить, воспользовавшись известными аналитическими решениями, полученными для отдельных профилей оптических волокон. В частности, хорошо известно [1-3] строгое решение для слабонаправляющих ступенчатых оптических волокон, согласно которому волноводные параметры определяются при решении вариационного уравнения вида

$$U \cdot \frac{J_1(U)}{J_0(U)} = W \cdot \frac{K_1(W)}{K_0(W)}, \quad (1)$$

и удовлетворяют условию

$$V^2 = U^2 + W^2 \quad (2)$$

Постоянная распространения определяется известной формулой

$$\beta^2 = \frac{1}{a^2} \left(\frac{V^2}{2\Delta} - U^2 \right)$$

где U – параметр моды; V – нормированная частота; Δ – высота профиля; a – радиус сердцевины.

Приведенная оценка хроматической дисперсии оптической линии передачи рассчитывается по формуле/1-3/

$$D = -\frac{K}{2 \cdot \pi \cdot c} \left[\lambda^2 \cdot \frac{d^2 \beta}{d\lambda^2} + 2 \cdot \lambda \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} \right] \quad (3)$$

где D – приведенное значение хроматической дисперсии, пс/(нм·км); β – коэффициент фазы (мнимая часть постоянной распространения), рад/км; c – скорость света, км/с; λ – длина волны, нм; K – коэффициент приведения размерности.

Отсюда следует, что для расчета хроматической дисперсии оптических волокон необходимо найти производные волноводных параметров по длине волны. Строгое аналитическое решение этой задачи для слаборадиационного ступенчатого волокна предлагается в данной работе.

Перепишем (1) в виде

$$U \cdot J_1(U) \cdot K_0(W) = W \cdot K_1(W) \cdot J_0(U) \quad (4)$$

После дифференцирования левой и правой частей (4), получаем

$$\frac{dU}{d\lambda} \cdot (J_1 \cdot K_0 + U \cdot J_1' \cdot K_0 - W \cdot K_1 \cdot J_0') = \frac{dW}{d\lambda} \cdot (K_1 \cdot J_0 + W \cdot K_1' \cdot J_0 - U \cdot J_1 \cdot K_0') \quad (5)$$

Обозначим

$$A_U = J_1 \cdot K_0 + U \cdot J_1' \cdot K_0 - W \cdot K_1 \cdot J_0' \quad (6)$$

$$A_W = K_1 \cdot J_0 + W \cdot K_1' \cdot J_0 - U \cdot J_1 \cdot K_0' \quad (7)$$

Тогда

$$A_U \cdot \frac{dU}{d\lambda} = A_W \cdot \frac{dW}{d\lambda}$$

Как известно /4/:

$$\frac{dU^2}{d\lambda} = 2 \cdot U \cdot \frac{dU}{d\lambda} \quad (8)$$

$$\frac{dW^2}{d\lambda} = 2 \cdot W \cdot \frac{dW}{d\lambda} \quad (9)$$

Отсюда следует

$$A_U \cdot \frac{dU^2}{d\lambda} \cdot \frac{1}{2U} = A_W \cdot \frac{dW^2}{d\lambda} \cdot \frac{1}{2W} \quad (10)$$

Дифференцируя (2), получаем

$$\frac{dW^2}{d\lambda} = \frac{dV^2}{d\lambda} - \frac{dU^2}{d\lambda} \quad (11)$$

Подставляя (10) в (11) и решая относительно производной квадрата параметра U , получаем

$$\frac{dU^2}{d\lambda} = \frac{U \cdot A_W}{W \cdot A_U + U \cdot A_W} \cdot \frac{dV^2}{d\lambda} \quad (12)$$

Обозначим

$$\bar{A} = \frac{U \cdot A_W}{W \cdot A_U + U \cdot A_W} \quad (13)$$

Тогда, окончательно

$$\frac{dU^2}{d\lambda} = \bar{A} \cdot \frac{dV^2}{d\lambda} \quad (14)$$

Из (8), (9) следует

$$\frac{dU}{d\lambda} = \frac{1}{2 \cdot U} \cdot \frac{dU^2}{d\lambda}, \quad \frac{dW}{d\lambda} = \frac{1}{2 \cdot W} \cdot \frac{dW^2}{d\lambda} \quad (15)$$

Дифференцируя (14), получаем

$$\frac{d^2U^2}{d\lambda^2} = \bar{A} \cdot \frac{d^2V^2}{d\lambda^2} + \bar{A}_1 \cdot \frac{dV^2}{d\lambda} \quad (16)$$

Где

$$\bar{A}_1 = \frac{C_1}{(1 + C_0)^2}$$

$$C_0 = \frac{B_{U0}}{B_{W0}}, \quad C_1 = \frac{B_{U1} \cdot B_{W0} - B_{U0} \cdot B_{W1}}{B_{W0}^2}$$

$$B_{U0} = U \cdot A_W, \quad B_{W0} = W \cdot A_U$$

$$B_{U1} = A_W \cdot \frac{dU}{d\lambda} + A_{W1} \cdot U, \quad B_{W1} = A_U \cdot \frac{dW}{d\lambda} + A_{U1} \cdot W$$

$$A_{U1} = W' \cdot K_0' \cdot (J_1 + U \cdot J_1') + U' \cdot K_0' \cdot (2 \cdot J_1' + U \cdot J_1'') - W' \cdot J_0' \cdot (K_1 + W \cdot K_1') - W \cdot U' \cdot K_1 \cdot J_0''$$

$$A_{W1} = U' \cdot J_0' \cdot (K_1 + W \cdot K_1') + W' \cdot J_0' \cdot (2 \cdot K_1' + W \cdot K_1'') - U' \cdot K_0' \cdot (J_1 + U \cdot J_1') - U \cdot W' \cdot J_1 \cdot K_0''$$

На рис. 1 – рис.2 в качестве примера приведены результаты расчета спектральных зависимостей квадрата волноводного параметра U^2 и его первой и второй производных по длине волны для стандартного ступенчатого оптического волокна SMF28. Необходимые для расчета данные о конструкции волокна взяты из /5/. Расчет производных нормированной частоты был выполнен на основе формулы Зелмейера и известных выражений /1, 6-8/.

На рис.3 представлена рассчитанная согласно (3) и полученных формул для производных волноводных параметров спектральная характеристика хроматической дисперсии оптического волокна типа SMF28. Расхождение теоретических оценок и паспортных значений хроматической дисперсии не превысило 2,0 пс/(нм·км).

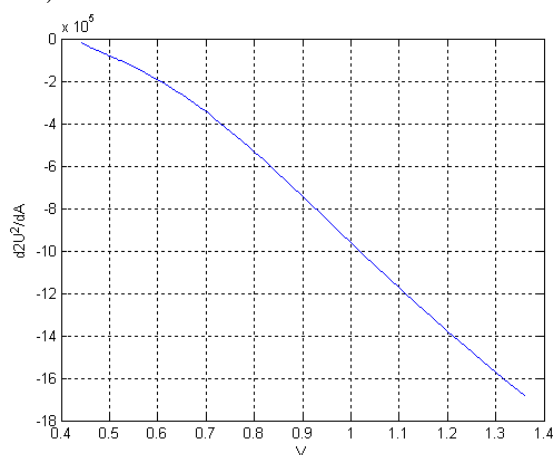


Рис.1 Спектральная зависимость первой производной от U^2

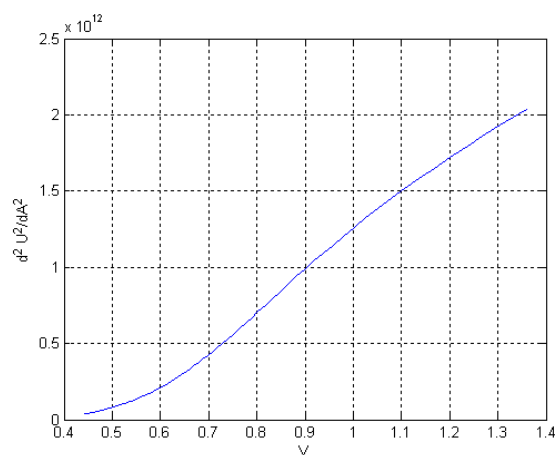


Рис.2 Спектральная зависимость второй производной от U^2

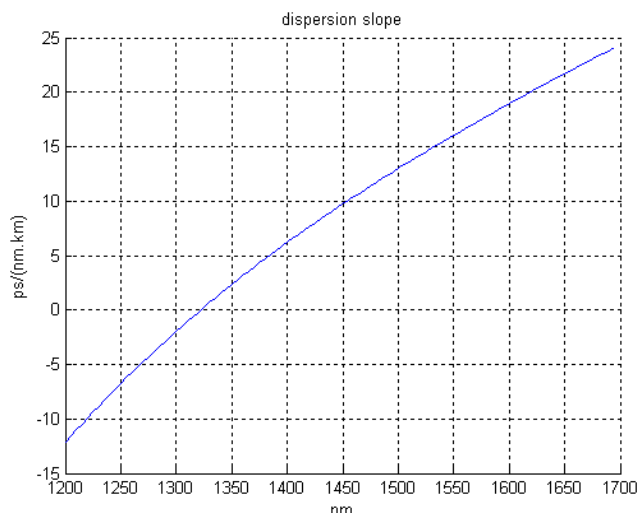


Рис. 3 Результаты расчета спектральной характеристики хроматической дисперсии волокна SMF28

Таким образом, получены строгие аналитические формулы для расчета производных волноводных параметров слабонаправляющих ступенчатых оптических волокон. Строгость вывода и удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных оценок дисперсии позволяют говорить об адекватности модели и, в свою очередь, рекомендовать ее для проверки адекватности приближенных моделей для расчета хроматической дисперсии слабонаправляющих оптических волокон.

Литература

1. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. - Мю: Мир, 1984. - 512 с.
2. Снайдер А., Лав Дж. Теория диэлектрических волноводов. - М.: Радио и связь, 1987. - 656 с.
3. Okamoto K. Fundamentals of Optical Waveguides. - San Diego: Academic Press, 2000. - 428 p.
4. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. - М.: Наука, 1979. - 832 с.
5. Листвин А. В., Листвин В. Н. Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. - М.: ЛЕСАРпт, 2003. - 288 с.
6. Fleming J. W. Material dispersion in lightguide glasses, Electron. Lett., vol.14, pp. 326-328, 1978.
7. А. С. Беланов, В. И. Кривенков, Е. А. Коломийцева Расчет дисперсии в световодах со сложным профилем показателя преломления, Радиотехника, 3, с. 32 – 35, 1998.
8. Бурдин В. А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи. - М.: Радио и Связь, 2002. - 312 с.

ABOUT ESTIMATION OF WAVEGUIDE PARAMETERS DERIVATIVES SPECTRAL CHARACTERISTICS OF WEAKLY GUIDING STEP-INDEX OPTICAL FIBER

Exact solution and analytical expression for waveguide parameters derivatives of weakly guiding step-index optical fiber are represented. Data of step-index optical fiber waveguide parameters derivatives spectral characteristic calculation are proposed. Chromatic dispersion spectral characteristic of standard step-index optical fiber is calculated by means of this expression. Good agreement between theoretical and experimental step-index optical fiber chromatic dispersion estimations is demonstrated. It makes possible to recommend represented exact solution for adequacy verification of approximate models for weakly guiding optical fiber chromatic dispersion calculation.



РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ НАПРАВЛЯЕМЫХ МОД ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ПРИБЛИЖЕНИЯ ГАУССА

Бурдин А.В.

Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики

В данной работе представлено обобщение модифицированного метода приближения Гаусса на случай расчета параметров передачи направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в сердцевине оптического волокна с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления. В отличие от известных решений на основе приближения Гаусса [1 – 7] исследуемое оптическое волокно предлагается

рассматривать как волоконный световод с многослойным профилем показателя преломления. При этом профиль показателя преломления сердцевины волокна представляется в виде конечного числа N оболочек, в пределах которых значение показателя преломления остается постоянным. Это позволяет записать вариационное выражение для параметра моды в сердцевине и характеристическое уравнение, решением которого является эквивалентный нормированный радиус пятна моды, в виде конечных вложенных сумм, что значительно уменьшает время вычислений даже при расчете параметров передачи направляемых мод высших порядков.

В основе модифицированного метода приближения Гаусса лежит аппроксимация поля моды $F_m^{(l)}(R)$ волоконного световода с произвольным профилем показателя преломления полем моды волоконного световода с некоторым параболическим профилем показателя преломления [1 – 7]:

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

где l – азимутальный порядок моды; m – радиальный порядок моды; $R=r/a$ – нормированный радиус; r – координата; a – радиус сердцевины волоконного световода; $R_0=\rho_0/a$ – нормированный радиус пятна моды; ρ_0 – радиус пятна моды; $L_{m-1}^{(l)}$ – полином Лагерра.

Для определения R_0 воспользуемся известным скалярным вариационным выражением для параметра моды в сердцевине U круглого слаборадиационного волоконного световода [1 – 7]:

$$U^2 = \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \frac{2}{R_0^2} \int_0^\infty \left[\left(\frac{dF_m^{(l)}}{dR} \right)^2 + \left(\frac{l^2}{R^2} + V^2 f(R) \right) [F_m^{(l)}]^2 \right] R dR, \quad (2)$$

где $V = kan_0 \sqrt{2\Delta}$ – нормированная частота (волноводный параметр), определяемая первичными параметрами ОВ; $k=2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – рабочая длина волны; $\Delta = (n_0^2 - n_1^2)/2n_0^2$ – параметр высоты профиля показателя преломления; n_0 – значение показателя преломления в центре сердцевины; n_1 – показатель преломления оболочки; $f(R)$ – функция профиля показателя преломления, удовлетворяющая выражению, описывающего профиль показателя преломления ОВ:

$$n^2(R) = n_0^2 [1 - 2\Delta \cdot f(R)]. \quad (3)$$

Выражение (2) перепишем в виде суммы двух интегралов: $U^2 = I_1 + I_2$,

$$\text{где } I_1 = \frac{2}{R_0^2} \int_0^\infty \left[\left(\frac{dF_m^{(l)}}{dR} \right)^2 + \frac{l^2}{R^2} (F_m^{(l)})^2 \right] R dR \text{ и } I_2 = \frac{2V^2}{R_0^2} \int_0^\infty f(R) (F_m^{(l)})^2 R dR, \text{ соответственно.}$$

После выполнения необходимых преобразований, использующих рекуррентные формулы относительно степени ортогональных многочленов, формулы интегрирования полиномов Лагерра, свойство ортогональности полиномов Лагерра а также формулы умножения и возведения в степень рядов [8 – 9] интеграл I_1 приводится к выражению вида [10 – 11]:

$$I_1 = \frac{M}{R_0^2}, \quad (4)$$

где

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

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

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

$a_q \binom{l}{L_{m-1}^{(l)}}$, $b_q \binom{l+1}{L_{m-1}^{(l+1)}}$ – коэффициенты полиномов Лагерра $L_{m-1}^{(l)}$ и $L_{m-1}^{(l+1)}$, соответственно, определяемые из формулы явного выражения полинома Лагерра [8 – 9]:

$$L_m^{(l)}(x) = \sum_{q=0}^m a_q x^q = \sum_{q=0}^m (-1)^q \frac{(l+m)!}{(l+q)!(m-q)!q!} x^q. \quad (5)$$

В свою очередь, интеграл I_2 требует подстановки функции $f(R)$, описывающий профиль показателя преломления. В данном случае исследуемое волокно предлагается рассматривать как световод с многослойным профилем, а профиль сердцевины задавать в виде конечного числа N оболочек. При этом значение показателя преломления n_k в пределах k -ой оболочки полагается постоянным. В соответствии с вышесказанным, произвольный профиль показателя преломления представляется в следующем виде:

$$n(R) = \begin{cases} n_k, & \frac{k}{N} \leq R \leq \frac{k+1}{N}, \quad 0 \leq k \leq \frac{N-1}{N}, \\ n_N, & 1 < R \leq +\infty \end{cases}, \quad (6)$$

а функция данного профиля может быть записана как

$$f(R) = \begin{cases} h_k, & \frac{k}{N} \leq R \leq \frac{k+1}{N}, \quad 0 \leq k \leq \frac{N-1}{N}, \\ 1, & 1 < R \leq +\infty \end{cases}, \quad (7)$$

при этом $h_k = \frac{n_0^2 - n_k^2}{n_0^2 - n_N^2}$ – параметр профиля; n_k – показатель преломления k -ой оболочки ($k=0 \dots N$).

После подстановки функции профиля показателя преломления (7) в слагаемое I_2 (2) и выполнения соответствующих преобразований с использованием рекуррентных формул относительно степени ортогональных многочленов, формул интегрирования полиномов Лагерра, свойства ортогональности полиномов Лагерра, а также формулы умножения и возведения в степень рядов [12 – 13], с учетом I_1 вариационное выражение для параметра моды в сердцевине волоконного световода с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления примет вид:

$$\begin{aligned} U^2 = & \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \left\{ \frac{M}{R_0^2} + V^2 \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} + \right. \\ & + V^2 \sum_{k=0}^{N-1} h_k \exp\left(-\frac{k^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)! k^{2p}}{p! N^{2p} R_0^{2p}} - \\ & \left. - V^2 \sum_{k=0}^{N-1} h_k \exp\left(-\frac{(k+1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!(k+1)^{2p}}{p! N^{2p} R_0^{2p}} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Согласно общему алгоритму приближения Гаусса, необходимо найти минимум функции $U^2(R)$, при котором аппроксимирующая радиальная зависимость поля моды $F_m^{(l)}(R)$ будет наиболее близкой к реальному распределению поля моды исследуемого волоконного световода с профилем показателя преломления, описываемого функцией $f(R)$. Для этого необходимо решить следующее уравнение [1–7]:

$$\frac{\partial U^2}{\partial R_0} = 0 \quad (9)$$

Дифференцирование (8) с учетом (9) позволяет записать характеристическое уравнение, решением которого является значение эквивалентного нормированного радиуса пятна моды LP_{lm} волоконного световода с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления:

$$\begin{aligned} & -M + V^2 \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} (1 - p R_0^2) + \\ & + V^2 \sum_{k=0}^{N-1} h_k \exp\left(-\frac{k^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)! k^{2p}}{p! N^{2p} R_0^{2p}} \left(\frac{k^2}{N^2} - p R_0^2\right) - \end{aligned} \quad (10)$$

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

Необходимо отметить, решение уравнения (10), которое является значением эквивалентного радиуса пятна направляемой моды LP_{lm} , справедливо при $V > 1$ и должно удовлетворять условию существования направляемых мод [1, 12 – 14]:

$$kn_1 < \beta \leq kn_0, \quad (11)$$

где β – постоянная распространения, которая непосредственно связана с параметром моды в сердцевине и нормированной частотой следующим соотношением [1]:

$$\beta = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{V^2}{2\Delta} - U^2}. \quad (12)$$

Ниже представлены результаты расчета параметров передачи направляемых мод маломодового волоконного световода (т.н. волокна НОМF – High Order Mode Fiber) для компенсаторов хроматической дисперсии на модах высших порядков, выполненного на основе модифицированного метода приближения Гаусса. Профиль показателя преломления исследуемого световода представлен на рис.1. (рабочая длина волны $\lambda=1550$ нм) [15]. Анализ волокна НОМ с помощью модифицированного метода приближения Гаусса выполнялся при $N=100$. В табл. 1. Приведены значения нормированного эквивалентного радиуса пятна моды R_0 , полученные в результате решения характеристического уравнения (10) с учетом (11), при этом рассматриваются направляемые моды, более 70% мощности которых сосредоточено в сердцевине.

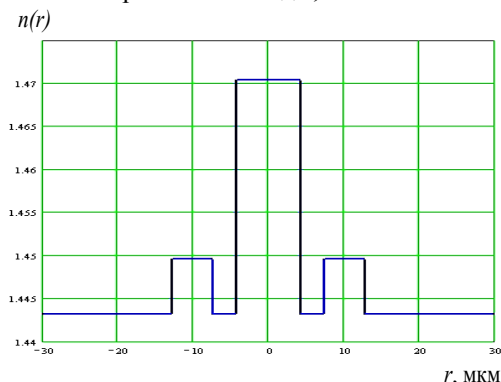


Рис. 1. W-образный профиль показателя преломления исследуемого маломодового волокна НОМ [15].

Таблица 1. Значения эквивалентного нормированного радиуса сердцевины R_0 направляемых мод LP_{lm} исследуемого маломодового оптического волокна НОМ.

l/m	1	2	3
0	0,1905	0,1566	0,3061
1	0,1735	0,3321	—
2	0,1635	0,2907	—
3	0,4354	—	—
4	0,4067	—	—

Полигон значений параметра моды в сердцевине U в зависимости от азимутального и радиального порядков направляемой моды приведен на рис. 2., а распределение значений постоянной распространения β по азимутальному порядку l направляемых мод LP_{lm} представлено на рис. 3.

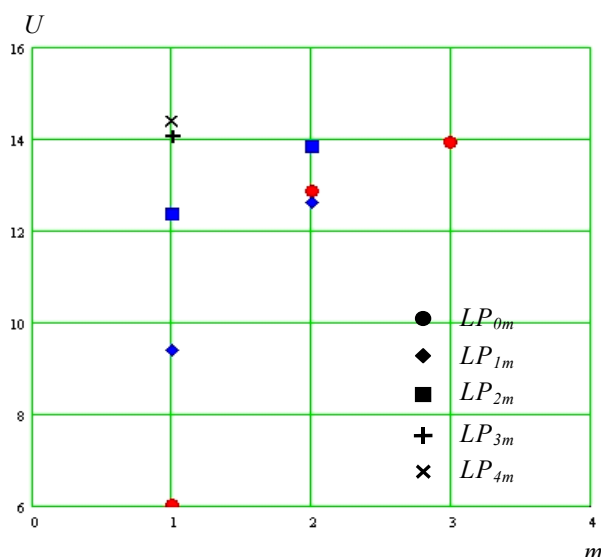


Рис. 2. Значения U направляемых мод LP_{lm} .

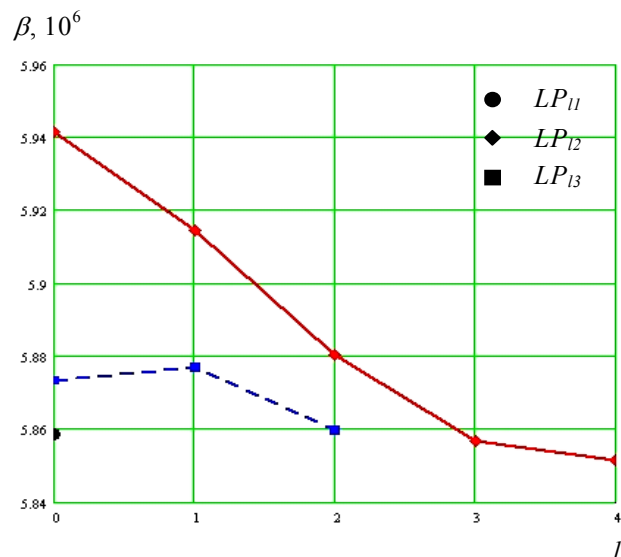


Рис. 3. Значения β направляемых мод LP_{lm} .

Полученные аналитические выражения могут быть использованы в разработке методов и алгоритмов компенсации межмодовой дисперсии, подавления дифференциальной модовой задержки и увеличения полосы пропускания многомодовых волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), а также компенсации хроматической дисперсии высокоскоростных одномодовых ВОЛП.

Литература

1. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
2. Mishra P., Hosain S.I., Goyal C., Sharma A. Scalar variational analysis of single-mode, graded core, W-fibers // Optical Quantum Electronics, 1982. Vol. MTT-30. pp. 1 – 5.
3. Peng G. D., Ankiewicz A. New evanescent field approximation for weakly guiding fibers // IEEE Proceedings Journal, 1991. Vol. 138. pp. 33 – 38.
4. Holmes M. J., Spirit D. M., Payne F. P. New Gaussian-based approximation for modelling non-linear effects in optical fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology, 1994. Vol. 12(2). pp. 193 – 201.
5. Hosain S. I., De Fornel F., Goudonnet J.P. Characterization of single-mode graded-index fibers: a new method based on transverse offset splice loss // Microwave Optical Technology Letters, 1994. Vol. 7. P. 301 – 304.
6. Chao S. C., Tsai W. H., Wu M. S. Extended Gaussian approximation for single-mode graded-index fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology, 1994. Vol. 12. pp. 392 – 395.
7. Mu-Shiang Wu, Mei-Hua Lee, Woo-Hu Tsai Variational analysis of single-mode graded-core W-fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology, 1996. Vol. 14(1). pp. 121 – 125.
8. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. – М.: Наука, 1979. – 830 с.
9. Градштейн И., Рыжик И. Таблицы интегралов. – М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.
10. Bourdine A. Comparing analysis of guided modes excitation by fundamental mode injection through the USF, DSF and NZDSF fibers coupled to conventional multimode fiber // Optical Technologies for Communications, edited by Salavat T. Kusimov, Vladimir A. Andreev, Albert H. Sultanov, Vladimir A. Burdin, Proceedings of SPIE, 2004. Vol. 5485. pp. 75 – 89.
11. Андреев В.А., Бурдин А.В. Многомодовые оптические волокна. Теория и приложения на высокоскоростных сетях связи. – М.: Радио и связь, 2004. – 248 с.
12. Okamoto K. Fundamentals of optical waveguides. – San Diego: Academic Press, 2000. – p. 430.
13. Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. Оптика и связь: Оптическая передача и обработка информации: Пер. с фр. – М.: Мир, 1984. – 504 с.
14. Чео П.К. Волоконная оптика. Приборы и системы: Пер. с англ. // М. – Энергоатомиздат, 1988. – 220 с.
15. Rosenbelit M., Danzieger Y. Limited mode dispersion compensating optical fiber // United States Patent, Patent Number US6442320. Publication date 27.08.2002.

HIGH-ORDER GUIDED MODE PARAMETERS ESTIMATION BASED ON MODIFIED GAUSSIAN APPROXIMATION

Extension of the modified Gaussian approximation method for analysis of multimode optical fiber with an arbitrary axial-symmetric refractive index profile is proposed. Core mode parameter variational expression and normal-

ized equivalent mode field radius characteristic equation were obtained. Results of analysis of lowmode optical fiber with W-index profile, applied in high-order mode chromatic dispersion compensators, are presented.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ОДНОМОДОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ STM-4 ПО ЛИНЕЙНОМУ ТРАКТУ МНОГОМОДОВОЙ ВОЛП

Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А.

Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики

Дифференциальная модовая задержка (DMD – Differential Mode Delay) является основной проблемой, ограничивающей совместное применение одномодовых оптических систем передачи (ОСП) и многомодовых волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП). Ограниченное число направляемых мод, возбуждаемых одномодовым лазером в многомодовых оптических волокнах (ОВ) линейного тракта ВОЛП, а также большой разброс значений групповой скорости указанных мод, обусловленный неидеальностью градиентного профиля реальных ОВ, приводит к сильным искажениям формы импульса вплоть до его распада на отдельные составляющие. Наиболее сильно эффект DMD проявляется в многомодовых ОВ первого поколения, профиль показателя преломления которых отличается наличием характерного дефекта в центральной области сердцевины, обусловленный особенностями технологического процесса производства градиентных многомодовых ОВ. В свою очередь, характер искажения формы импульса, возбуждаемого одномодовым источником оптического излучения, при распространении по волокнам многомодовой ВОЛП определяется достаточно большим количеством факторов. К ним относятся параметры профиля показателя преломления и геометрии линейных многомодовых волокон, условия ввода сигнала, тип одномодового согласующего световода «источник – линейное волокно», а также характеристики самой одномодовой ОСП.

Предположим, что направляемая мода распространяется в сердцевине многомодового ОВ с изменяющейся групповой скоростью, которая принимает значения $v_{gi} \pm \varepsilon$, где v_{gi} – среднее значение групповой скорости i -ой направляемой моды, соответствующее заданным усредненным значениям параметров исследуемого многомодового ОВ, а $\varepsilon \in [-\Delta v_g; +\Delta v_g]$ – некоторая малая величина ($\varepsilon \ll 1$), на которую изменяется значение v_{gi} . Δv_g – максимальная девиация значений групповой скорости направляемых мод, которая определяется степенью нерегулярности самого многомодового ОВ, а также проявлением хроматической и материальной дисперсии. Предполагается, что значение Δv_g для всех направляемых мод, распространяющихся в заданном многомодовом ОВ, одинаково. Таким образом, полагая, что величина групповой скорости i -ой направляемой моды принимает значения из диапазона $[v_{gi} - \Delta v_g; v_{gi} + \Delta v_g]$, форма импульса, переносимого i -ой модой, на расстоянии x от начала линии описывается выражением вида [1]:

$$\Phi_i(t, L) = A_i \cdot \exp(-\alpha_i L) \frac{\sigma \cdot v_{gi}^2}{2 \cdot \Delta v_g \cdot L} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{1}{\sigma \sqrt{2}} \left(t - \frac{L}{v_{gi}} + \frac{L \cdot \Delta v_g}{v_{gi}^2} \right) \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{1}{\sigma \sqrt{2}} \left(t - \frac{L}{v_{gi}} - \frac{L \cdot \Delta v_g}{v_{gi}^2} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где A_i – амплитуда импульса, переносимого i -ой модой; σ – среднеквадратическая длительность импульса на входе ОВ; α_i – коэффициент затухания i -ой моды; t – время; erf – интеграл вероятностей (функция ошибок).

Суммирование частичных мощностей выполняется по квадратичному закону. Соответственно, форма импульса, возбуждаемого одномодовым источником оптического излучения и переносимого N направляемыми модами по многомодовому ОВ, на выходе линии длиной L будет иметь вид:

$$\Phi_{out}(t) = \sqrt{\sum_{l=0}^{N_l} \sum_{m=1}^{N_m} (\Phi_{lm}(t, L))^2}, \quad (2)$$

где l – азимутальный порядок моды LP_{lm} ; m – радиальный порядок моды LP_{lm} ; N_l – максимальное значение азимутального порядка направляемых мод, возбуждаемых в исследуемом многомодовом ОВ; N_m – максимальное значение радиального порядка направляемых мод, возбуждаемых в исследуемом многомодовом ОВ, для заданного азимутального порядка.

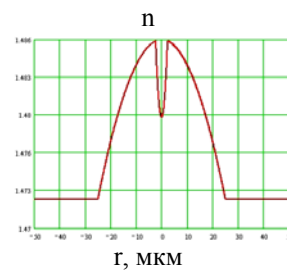
Параметры передачи направляемых мод волокон линейного тракта многомодовой ВОЛП определяются с помощью модифицированного метода приближения Гаусса [1]. Применение данного метода позволяет также записать аналитические выражения для групповой скорости направляемой моды заданного порядка

LP_{lm} , а также мощности указанной моды в сердцевине $P_{co}^{(lm)}$. Последнее непосредственно определяют значение коэффициента затухания моды α_{lm} .

Оценка перераспределения мощности основной моды между модами высших порядков при возбуждении многомодового ОВ линейного тракта ВОЛП одномодовым источником излучения выполняется в виде анализа стыка «одномодовый согласующий световод – линейное многомодовое ОВ» с использованием элементов теории связи мод. Данная задача может быть сведена к расчету коэффициентов связи мод на исследуемом стыке через интегралы перекрытия полей взаимодействующих мод. В этом случае радиальное распределение поле моды одномодового согласующего световода также предлагается определять с помощью модифицированного метода приближения Гаусса. Это позволяет не только рассчитать эквивалентные радиусы пятна моды ОВ со сложным профилем показателя преломления, но и получить аналитические выражения для расчета коэффициентов связи мод на стыке волокон неодинаковой конструкции, выполненного как строго соосно, без каких-либо рассогласований, так и с учетом некоторого заданного осевого смещения d и углового рассогласования θ , а также оценить номинальное значение вносимых потерь на исследуемом стыке.

Ниже представлены результаты моделирования распространения оптического сигнала при по волокнам многомодовой ВОЛП, возбуждаемой одномодовым источником оптического излучения ОСП STM-4 Metropolis[®] AM производства компании Lucent Technologies [2], в зависимости от протяженности элементарного кабельного участка, типа одномодового согласующего световода, а также условий ввода сигнала в линейный тракт исследуемой ВОЛП. Рассматривались типовые многомодовые ОВ [3] первого поколения с MCVD профилем показателя преломления. Параметры передачи указанной одномодовой ОСП и характеристики исследуемого многомодового ОВ представлены в табл. 1.

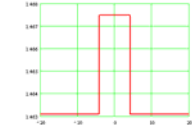
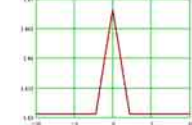
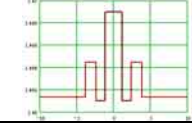
Таблица 1.

Параметры ОСП STM-4 Metropolis [®] AM		Характеристики многомодового ОВ с MCVD профилем показателя преломления		
Скорость передачи, В	622 Мбит/с	Радиус сердцевины, a	25 мкм	
Предельное значение коэффициента ошибок, BER_{nom}	10^{-12}	Максимум показателя преломления на оси сердцевины градиентного ОВ, n_0	1,486000	
Рабочая длина волны, λ	1310 нм	Радиус области провала, a_0	2,33 мкм	
Мощность на выходе источника излучения, p_0	–8 дБм	Глубина провала, n_2	1,479435	
Чувствительность фотоприемника, p_R	–28 дБм	Числовая апертура, NA	0,2	
		Коэффициент затухания на длине волны $\lambda=1310$ нм, α	0,8 дБ/км	

Предполагается, что ввод сигнала с выхода лазера в линейный тракт осуществляется через согласующий световод, представляющий собой как типовое одномодовое оптическое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления (SSF – Standard Singlemode Fiber, рекомендации ITU-T G.652) [3], так и волокна со смещенной дисперсией (DSF – Dispersion Shifted Fibers, рекомендации ITU-T G.653) с треугольным профилем и с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF – Non Zero Dispersion Shifted Fibers, рекомендации ITU-T G.655) с W-образным профилем. Основные параметры согласующих световодов вышеперечисленных типов, используемые в расчетах, представлены в табл. 2. Также исследовались следующие варианты соединения «согласующий световод – линейное волокно»: строго соосный стык, стык с осевым смещением d и стык с угловым рассогласованием θ .

Если полученная форма импульса была сильно искажена эффектом DMD, т.е. импульс расщеплялся на отдельные составляющие, амплитуды которых составляли более 10% от главного максимума, согласно [4], определялась величина дифференциальной модовой задержки DMD и делался вывод о невозможности совместной работы многомодовой ВОЛП с исследуемым ОВ и заданной одномодовой ОСП STM-4 при заданных условиях ввода сигнала без проведения дополнительных мероприятий. Если форма сигнала сохранилась, и, соответственно, эффект DMD слабо выражен, выполнялся расчет дисперсии D сигнала, в соответствии с известной методикой анализа сигналов произвольной формы [5]. Для уменьшения погрешности при расчете D анализ формы импульса выполнялся по уровню не ниже 10% от максимума. Полученное значение D затем использовалось в расчете коэффициента ошибок BER по соответствующей методике, разработанной и рекомендованной к применению в рамках стандарта IEEE 802.3z [6].

Таблица 2.

Профиль	Диаметр сердцевин- ны, мкм	Показатель преломления серцевинны	Параметр высо- ты профиля	Примечание
	8,3	1,46750	0,36 %	Corning® SMF 28e™
	4,4	1,46750	1,20 %	
	7,1	1,47100	0,72 %	$n_2=1,46380$ $n_3=1,46650$

Указанная методика позволяет построить глаз-диаграмму цифрового канала связи на выходе линейного тракта исследуемой многомодовой ВОЛП при передаче сигналов одномодовой ОСП, рассчитать ее основные параметры, оценить Q-фактор и, соответственно, коэффициент ошибок BER, который затем сравнивается с предельно допустимым значением $BER_{\text{ном}}$, соответствующим ОСП STM-4. Некоторые результаты расчета представлены на рис. 1 – 3. Так, для строго соосного ввода с использованием согласующих световодов, представляющих собой одномодовые ОБ со ступенчатым, треугольным и W-образным профилями показателя преломления, соответствующие им потери на вводе и построенные формы импульсов приведены на рис. 1. Аналогично, результаты расчета формы оптического сигнала, вводимого в линейное многомодовое ОБ с некоторым смещением d представлены на рис. 2, а для ввода с угловым рассогласованием θ – на рис. 3.

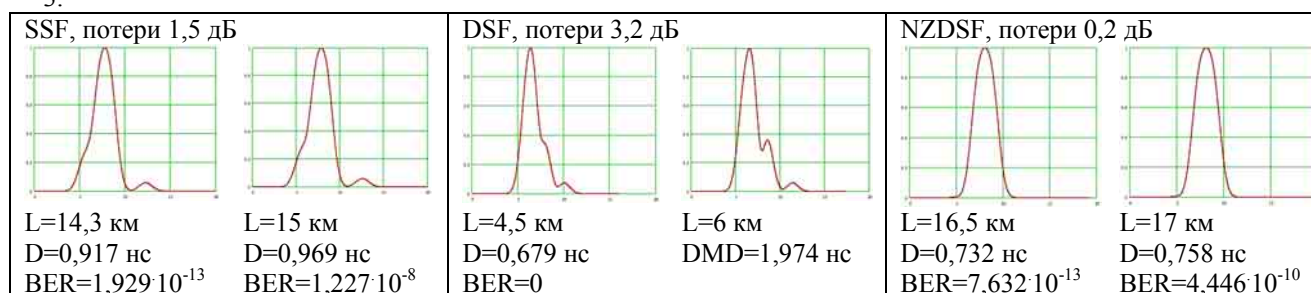
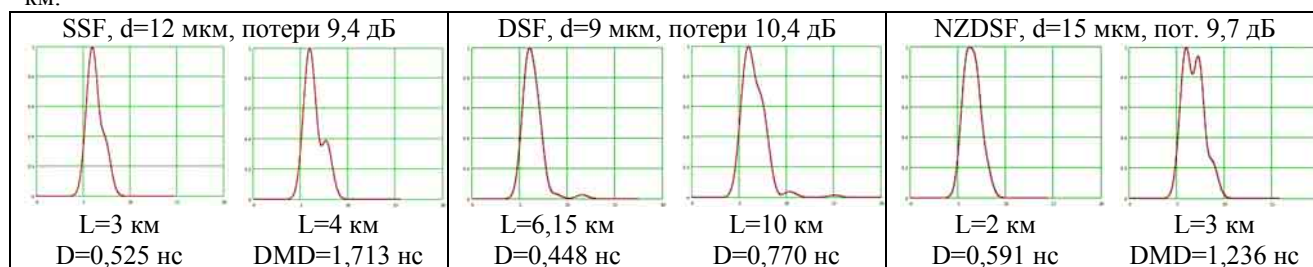


Рис. 1. Искажение формы оптического сигнала при строго соосном вводе и разных согласующих световодах.

Из приведенных данных хорошо видно, что наиболее протяженный элементарный кабельный участок (ЭКУ) многомодовой ВОЛП, в пределах которого обеспечивается передача сигнала одномодовой ОСП со скоростью 622 Мбит/с (STM-4) без существенных искажений, а коэффициент ошибок BER не превышает допустимого нормированного значения 10^{-12} , соответствует строго соосному вводу с использованием согласующего световода, представляющего собой одномодовое ОБ NZDSF с W-профилем показателя преломления. В этом случае $L_{\text{ЭКУ}}$ составляет около 16,5 км. В свою очередь, максимальная длина ЭКУ многомодовой ВОЛП, подключенной к ОСП через одномодовое ОБ SSF, в пределах которой поддерживается требуемое значение BER, достигает порядка 14 км также при условии строго соосного ввода. Применение одномодовых ОБ DSF с треугольным профилем показателя преломления для согласования источника одномодовой ОСП и волокон многомодовой ВОЛП, не представляется эффективным, по сравнению с использованием согласующих световодов SSF и NZDSF. В этом случае максимальное значение $L_{\text{ЭКУ}}$ составляет менее 4,5 км.



BER=0	BER=1,104·10 ⁻¹³	BER=1,107·10 ⁻⁴	BER=0
-------	-----------------------------	----------------------------	-------

Рис. 2. Искажение формы оптического сигнала при вводе с осевым смещением и разных согласующих световодах.

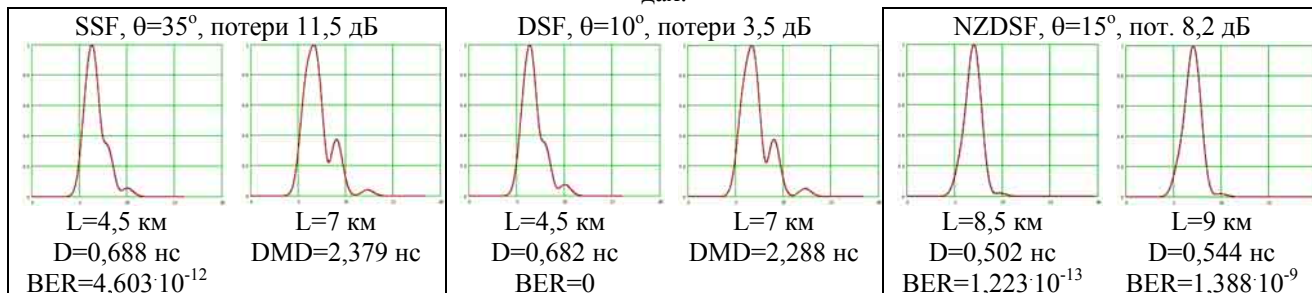


Рис. 3. Искажение формы оптического сигнала при вводе с осевым смещением и разных согласующих световодах.

Анализ полученных данных показал, что увеличение полосы пропускания многомодовой ВОЛП за счет выравнивания амплитуд возбуждаемых мод, которое достигается путем дополнительных рассогласований на стыке «согласующий световод – линейное ОВ», менее эффективно, по сравнению со строгом соосным вводом сигнала в многомодовое ОВ. При выполнении расчетов, в зависимости от типа одномодового согласующего световода, значения d и θ выбирались таким образом, чтобы разброс амплитуд направляемых мод, возбуждаемых в исследуемом многомодовом ОВ основной модой LP_{01} с выхода источника, составлял менее 10%. В общем случае, это приводит к достаточно большим потерям на вводе, что существенно уменьшает протяженность ЭКУ, в пределах которой значение коэффициента ошибок BER не превышает нормы, из-за ограниченного энергетического потенциала реальных ОСП. Выравнивание амплитуд возбуждаемых мод, в зависимости от параметров дефекта MCVD профиля показателя преломления многомодового ОВ, типа одномодового согласующего световода и самих условий ввода, может привести как проявлению эффекта DMD уже на сравнительно коротких длинах ЭКУ, так и превышению BER нормируемого значения коэффициента ошибок даже при слабых искажениях формы оптического импульса.

Литература

1. Андреев В.А., Бурдин А.В. Многомодовые оптические волокна. Теория и приложения на высокоскоростных сетях связи. – М.: Радио и связь, 2004. – 248 с.
2. Metropolis® AM and Metropolis® AMS. Application and Planning Guide. Release 4.0. – Lucent Technologies, 2003.
3. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. – М.: ЛЕСАРпт, 2003. – 288 с.
4. Aronson L., Buckman L., Fieldworthy ROFL/OFL multimode fiber differential mode delay measurement system // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, February 1998 meeting. – 1998.
5. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
6. 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.

SIMULATION RESULTS OF SINGLEMODE OPTICAL SYSTEM STM-4 PULSE PROPAGATION ALONG MULTIMODE FIBER-OPTIC LINK

Results of modeling of singlemode optical system STM-4 signal propagation along multimode optical link with conventional fibers are presented. Pulse distortions under different launch conditions including axial offset and angular misalignment and type of singlemode conjugating fiber were investigated. DMD and dispersion were estimated depending on output pulse form. The best results correspond to axial launch without any misalignments through the singlemode fiber with W-index profile.

МЕТОДЫ ПОИСКА ЗОНЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

Воронков А.А., Алфимов М.Г.

Поволжская Государственная Академия Телекоммуникаций и Информатики

Высокая надежность функционирования волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) невозможна без оперативного поиска мест повреждений волоконно-оптических кабелей связи (ВОК) и устранения ава-

рийных ситуаций в кратчайшие сроки. При этом главные трудности связаны с поиском мест повреждения наружных изолирующих покровов при большом переходном сопротивлении в цепи «металлопокрытый-земля». Данной проблема наиболее успешно решается с использованием современной приборной базы [1-4].

Современные методы поиска мест повреждений достаточно эффективны для контроля проложенного в земле кабеля на линиях передачи большой протяженности и широко применяются в России, однако стоимость таких трассопоисковых приборов составляет несколько тысяч долларов, что снижает их доступность для телекоммуникационных предприятий.

При дефиците современных трассопоисковых приборов используются традиционные методы, которые идентичны применяемым для локализации мест повреждений изоляции обычных электрических кабелей связи. Однако при их реализации на ВОЛП есть специфика. В настоящее время для поиска мест повреждений электрических кабелей связи используется метод поверхностных потенциалов совместно с индуктивным методом. Данные методы отличает простота реализации и невысокая стоимость приборной базы. Однако из-за низкой чувствительности, характерной для подобного класса приборов, локализация зоны повреждения ВОЛП непосредственно данным способом является весьма трудоемкой и затратной по времени. В целях снижения трудоемкости желательно предварительно оценить зону, в которой имеет место повреждение, с тем, чтобы работа с трассопоисковыми приборами проводилась в дальнейшем только в этой ограниченной зоне. Обычно задача решается в три этапа:

- первый — определение номера элементарного кабельного участка (ЭКУ), на котором имеет место повреждение;
- второй — определение зоны повреждения в пределах ЭКУ;
- третий — уточнение места повреждения трассопоисковыми приборами в пределах ранее определенной зоны.

Для измерений расстояний до мест повреждения при определении зоны повреждения используются методы измерений на постоянном токе. Применение того или иного метода зависит от условий повреждения, типа кабеля и способа его прокладки, а также ряда других факторов. В частности при выборе метода измерений необходимо учитывать следующее.

1. Проводимость изоляции между металлической оболочкой и землей распределена по длине линии неравномерно и зависит от состояния грунта.
2. Сопротивление изоляции между металлической оболочкой и землей при их исправном состоянии пренебрежимо малы по сравнению с сопротивлением изоляции центрального силового элемента (в том случае, если он металлический).
3. Шланговые покрытия могут иметь не одно, а несколько повреждений.
4. Переходное сопротивление ($R_{пер}$) в месте повреждения пластмассового покрытия может быть соизмеримо с сопротивлением изоляции покровов на протяженных длинах кабеля при их исправном состоянии.
5. Состояние грунта подвержено сезонным колебаниям.
6. Измерения могут выполняться в условиях внешних электромагнитных помех.

Важное значение при выборе метода измерений играет тип кабеля. Если ОК имеет металлический центральный силовой элемент, задача измерителя существенно упрощается. Для определения района повреждения применяют классические одно и двухсторонние методы моста с переменным отношением плеч. Однако более чем в 80% случаев кабеля прокладываемого в земле, последний имеет неметаллические центральные силовые элементы. Учитывая, что система передачи для ОК – однокабельная, в подавляющем большинстве случаев поиск должен осуществляться для системы металлические бронепокровы кабеля-земля. Здесь используются специальные способы измерений. Они отличаются большой погрешностью. Однако, учитывая последующее применение высокоточных трассопоисковых методов это допустимо. В рассматриваемом случае при измерениях имеют дело с цепями, составленными из проводников (центральный силовой элемент и металлическая оболочка или броня), которые в исправном состоянии имеют различные сопротивления изоляции относительно земли. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только методы применяемые для этой группы цепей. Мостовые методы базируются в основном на использовании уравновешенного моста. Методы неуравновешенного моста из-за их невысокой точности измерений получили ограниченное применение и в данной статье не рассматриваются. Теоретической базой мостовых методов является теория распространения энергии по направляющим системам. Она охватывает все случаи определения места повреждения изоляции на ОК в металлических оболочках (бронепокровах) с изолирующим покрытием.

При выборе метода измерений необходимо исходить из следующих основных критериев

- погрешности измерений при определении расстояния до места повреждения;
- длительности и многократности измерений;
- числа жил занятых в процессе измерений;
- универсальность метода;
- сложности расчетных формул;

- сложность измерительной аппаратуры;
- пределов величины переходных сопротивлений.

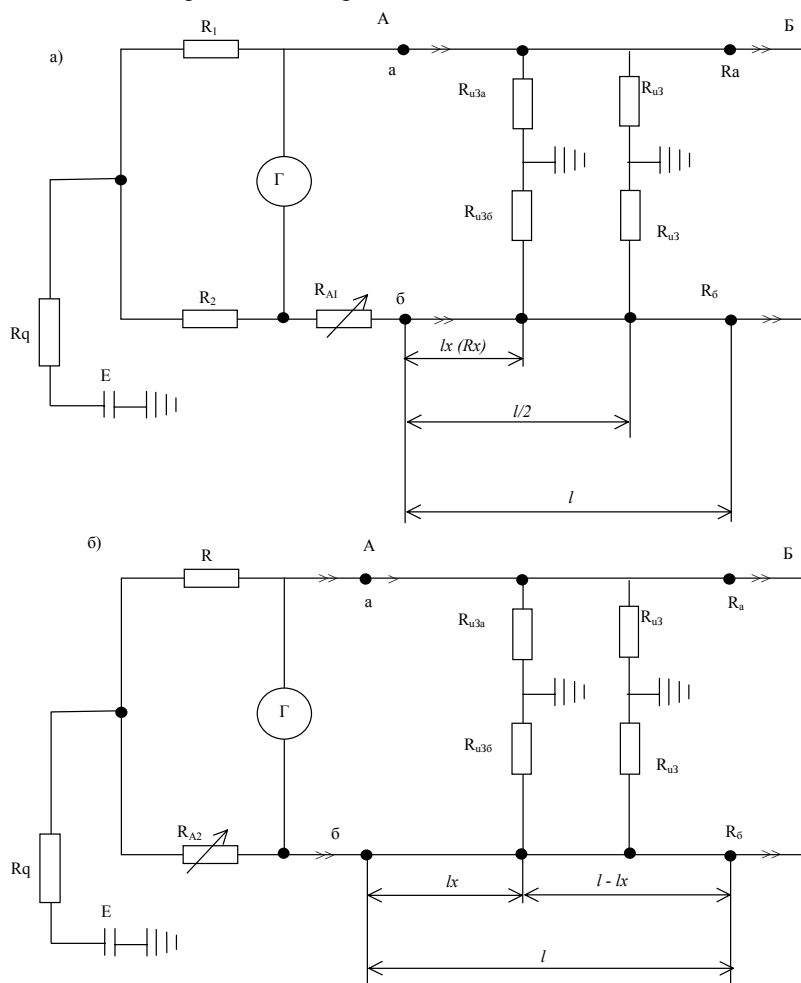


Рис. 1.1. Общие мостовые схемы измерений для определения места повреждения изоляции при неравных переходных сопротивлениях в случае равномерного распределения проводимости изоляции вдоль линии.

Измерение с помощью мостовых методов подразделяются на методы с постоянным отношением плеч и с переменным отношением плеч. Однако, такая классификация является чисто условной и производится лишь для получения наиболее общих уравнений. При выборе конкретных методов измерений классификация проводится по коэффициенту изоляции [5-8].

$$K_n = \frac{R_{изаэ}}{R_{избэ}}$$

где $R_{изаэ}$ — эквивалентное переходное сопротивление условно исправленного провода (металлического элемента)

$$R_{изаэ} = \frac{R_{иза} \cdot R_{из}}{R_{иза} + R_{из}}$$

$R_{иза}$, $R_{из}$ — переходные сопротивления в месте повреждения

$R_{избэ}$ — эквивалентное переходное сопротивление условно неисправленного провода (металлического элемента),

$$R_{избэ} = \frac{R_{изб} \cdot R_{из}}{R_{изб} + R_{из}}$$

$R_{из}$ — сопротивление изоляции проводов а и б относительно земли

Под металлическими элементами а и б в дальнейшем будем называть центральный силовой элемент — металлический и металлическую оболочку (бронепокровы) в изолирующем шланге, соответственно. Причем $R_{изз} > R_{изб}$ при любых случаях.

Все методы, применяемые для определения места повреждения изоляции можно разделить по классификационному признаку, т.е. по K_u на три группы.

- методы, применяемые при больших отношениях переходных сопротивлений ($K_u \geq 400 \dots 500$);
- методы, применяемые как при больших, так и при малых отношениях переходных сопротивлений $3 \leq K_u \leq \infty$;
- методы, применяемые при мало отличающихся и небольших по величине переходных сопротивлений ($1 \leq K_u \leq 3$).

В общем случае теоретические основы мостовых методов адекватны как для мостовых схем с постоянным отношением плеч, так и с переменным отношением плеч. При выводе уравнений мостовых методов каждая схема может быть представлена в виде эквивалентных четырехполосников с учетом параметров передачи линии. В случае равномерного распределения вдоль линии проводимостей изоляции, измерительные схемы могут быть представлены в следующем виде (рис. 1.1).

Рассматриваемые способы измерений предназначены для определения зоны повреждений, с последующим определением места повреждения трассо-поисковыми приборами. Как следствие, от них не требуется высокая точность оценок. Это позволяет рекомендовать для использования упрощенные методы поиска зоны повреждения оптического кабеля связи.

Литература

1. A. Ivanoff, *Fiber Optics*, Syrus Systems, Moscow, 1999г.
2. Андреев В.А. и др. Аварийно-восстановительные работы на ВОЛП. Учебное пособие. г.Самара, 2004г.
3. Вестник связи №9, 2003г.
4. Техническое описание. Прибор трассопоисковый Dynatel 2273М.
5. Шумилин Н.П. Специальные измерения в проводной связи. М.: Связь, 1974. 343 с.
6. Соловьев Н.Н. Основы измерительной техники в проводной связи. Часть I, II, III. М.: Связь, 1971. 376, 340, 300 с.
7. Шварцман В.О. Электрические измерения междугородных линий связи. М.: Связь, 1972г.
8. Андреев В.А. и др. Измерения на КЛС. Учебное пособие. г.Самара, 2005г.

METHODS FOR FAULT ZONE LOCALIZATION IN OPTICAL CABLE

One of the problems of the method performance is how to maintain satisfactory sheath condition of FOC. In general, the main trouble is how to localize faults on the protective sheath. There are however some which are similar to the applied techniques in fault localization in copper media, but when applied for FOL, the techniques have specifics. The purpose of the paper is to analyze specifics of the implementation for fault localization of protective sheath of FOC.

ОБ АДАПТАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА МУФТ К ОСОБЕННОСТЯМ КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

Алехин Н.И., Алфимов М.Г., Андреев В.А., Бурдин В.А.,
Бурдин А.В., Григоров И.В., Никулина Т.Г., Попов Б.В.

Поволжская Государственная Академия Телекоммуникаций и Информатики

Современные сети связи развиваются в условиях непрерывного роста потребностей в объеме передаваемой информации. Сегодня, скорости передачи 10 Гбит/с, 40 Гбит/с и выше для волоконно-оптических линий связи стали обычным явлением. Естественно, что с увеличением объема передаваемой информации возросли требования к надежности сетей связи в целом и отдельных ее компонентов, в частности. В том числе, и к надежности волоконно-оптических линий передачи, основными элементами которых являются оптические кабели связи и их соединения. Как известно, по техническим условиям срок службы оптических кабелей составляет, как правило, не менее 25 лет. Срок службы соединений строительных длин оптических кабелей в муфтах должен быть не меньше. Очевидно, что качество и надежность монтажа кабелей определяется как свойствами кабеля и арматуры, так и степенью проработки технологии монтажа, соблюдением технологии при строительстве.

Технология монтажа оптических кабелей базируется на инструкциях, которые для каждого конкретного типа муфты, разрабатываются ее производителем. Например – [1–7]. При этом производители оптических муфт представляют их на рынке как универсальные. Соответственно, в инструкциях по монтажу муфт оптического кабеля не приводятся данные конкретных типов оптических кабелей, для монтажа которых они предназначены. Указывается лишь, что муфты «предназначены для прямого и разветвительного сращивания строительных длин кабелей», «предназначены для монтажа магистральных, зоновых и подвесных ОК связи 2, 3, и 4 типов по допустимому растягивающему усилию с любыми бронепокровками», «тип комплекта муфты зависит от конструкции волоконно-оптического кабеля, который может быть со свободной укладкой волокон в трубке, центральным размещением волокон в трубке, свободной укладкой волокон в фигурном сердечнике или ленточного типа» и т.п.

Как известно, кабели разных производителей, имеющие даже подобную однотипную конструкцию, отличаются конструктивными размерами, применяемыми материалами и т.п. Отсюда следует, что прогнозировать надежность и стойкость к внешним воздействиям соединений оптических кабелей в муфте допустимо лишь в случае монтажа оптического кабеля, для которого разрабатывалась инструкция по монтажу муфты, и с которым проводились испытания смонтированной муфты. Это подтверждают практические примеры из опыта строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий передачи, результаты климатических испытаний соединений оптического кабеля. Так, в [8] приведены данные об увеличении затухания волокон в транзитных модулях в муфте при низких температурах. Из практики известны случаи, когда при понижении температуры до -30 градусов и ниже затухание волокон в муфте увеличивалось на 0,5..5 дБ. С увеличением температуры оно приходило в норму. Возможно этих случаев больше, но поскольку изменения не превышают величины эксплуатационного запаса (6,0 дБ), а профилактические измерения производятся не чаще, чем один раз в год, то они могли быть не зафиксированы. Практически все известные случаи роста затухания волокон в муфтах при низкой температуре относятся к подвесным оптическим кабелям, которые находятся в более жестких условиях эксплуатации и работают в более широком диапазоне температур (в том числе, при более низких отрицательных температурах).

Таким образом, инструкции по монтажу универсальных муфт не учитывают специфики конкретного типа монтируемого оптического кабеля. Вместе с тем, из анализа данных эксплуатации волоконно-оптических линий передачи, результатов испытаний следует, что при низкой температуре окружающей среды это с достаточной долей вероятности может приводить к росту затухания оптических волокон в муфтах. Закономерен вопрос, насколько велика необходимость учета особенностей сращиваемого оптического кабеля при его монтаже в универсальных муфтах.

Ответ на данный вопрос требует выполнения достаточно большого объема исследований. В целях получения предварительных оценок были проведены климатические испытания соединений длин оптического кабеля в муфтах. Всего было отобрано шесть марок оптического кабеля разных производителей и шесть типов универсальных муфт. Испытанию подвергались соединения для всех возможных сочетаний типов кабеля и муфты. При этом при монтаже образца между собой в муфте сращивались длины кабеля одного типа. Монтаж оптического кабеля производился в соответствии с инструкцией по монтажу используемой универсальной муфты. В процессе испытаний выполнялись измерения приращений затухания оптических волокон в муфте. Контроль затухания оптических волокон в муфте осуществлялся до начала испытаний, во время испытаний и после их завершения.

Температурный диапазон выбирался с учетом требований стойкости к температурным воздействиям оптических кабелей и оптических муфт в соответствии с нормативными документами [9–16]. До начала выполнения программы термоциклов образец соединения оптического кабеля в муфте выдерживался в термокамере при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ в течение четырех часов, после чего производились измерения затухания оптических волокон в муфте. По завершении программы термоциклов

образец также выдерживался в термокамере при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ в течение четырех часов, после чего производились измерения затухания оптических волокон в муфте. Всего программа испытаний включала три термоцикла. В течение одного термоцикла проводились следующие операции.

- Температуру в камере доводили до -30°C . В течение шести часов образец выдерживался при данной температуре. После этого выполнялись измерения затухания.
- Температуру в камере доводили до -40°C . В течение шести часов образец выдерживался при данной температуре. После этого выполнялись измерения затухания.
- Температуру в камере доводили до -50°C . В течение шести часов образец выдерживался при данной температуре. После этого выполнялись измерения затухания.
- Температуру в камере доводили до -60°C . В течение шести часов образец выдерживался при данной температуре. После этого выполнялись измерения затухания.
- Температуру в камере повышали до $+70^{\circ}\text{C}$. В течение шести часов образец выдерживался при данной температуре. После этого выполнялись измерения затухания.

Измерения затухания оптических волокон в муфте выполнялись как для кабельной вставки согласно РД.45.190 – 2001[17]. Схема монтажа испытуемых длин оптического кабеля в муфте и измерений затухания сваренных и уложенных в муфте оптических волокон приведена на рисунке 1. Одновременно в термокамере проходили испытания до шести образцов.

Для разделки и монтажа оптического кабеля использовали монтажный инструмент «НИМ – 25», сварочный аппарат «FSU – 975». Измерения затухания производились с помощью оптического рефлектометра «HP E6000A», а также с использованием вспомогательного ступенчатого одномодового оптического волокна SMF28 на катушках длиной не менее 500 м. для климатических испытаний использовалась термокамера тепла и холода типа «RT144L» (производство «Climatic System», Великобритания).

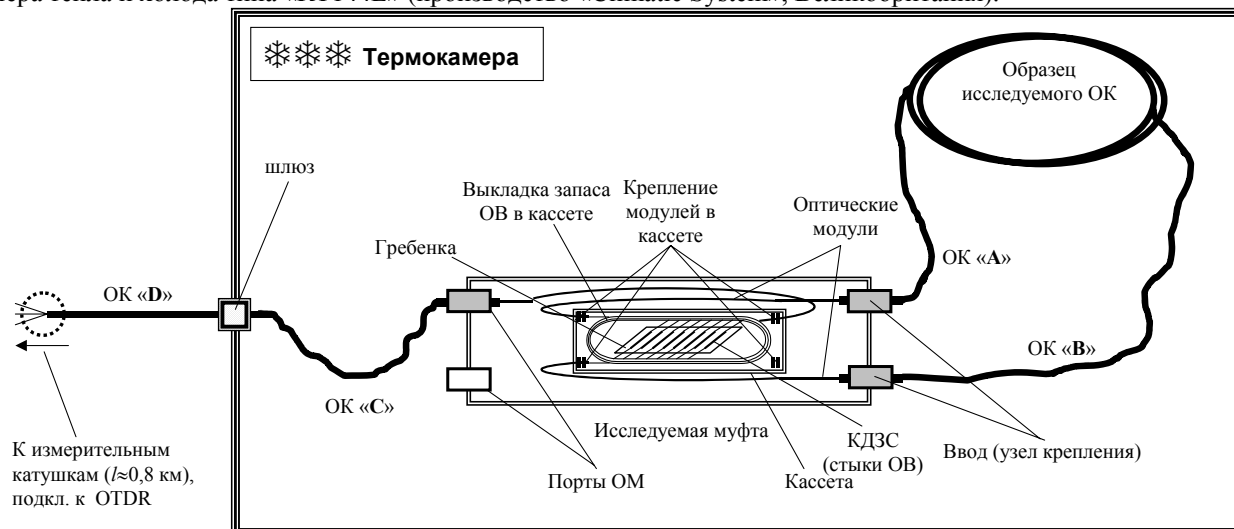


Рис. 1. Схема измерений затухания оптических волокон в муфте в процессе испытаний

На рис.2–3, в качестве примера, представлены результаты измерений приращения потерь оптических волокон в муфте при климатических испытаниях, проведенных по описанной выше методике, для двух образцов смонтированных в муфтах длин оптического кабеля. Оба образца проходили испытания одновременно в одной и той же термокамере. Каждый из образцов отличался как маркой монтируемого кабеля, так и типом используемой муфты. Монтаж кабеля выполнялся в соответствии с инструкциями по монтажу используемых универсальных муфт.

Данные испытаний наглядно демонстрируют, что при понижении температуры до -50°C и ниже в муфтах имеет место рост затухания оптических волокон сращиваемых длин кабеля. В случае существенных значений максимальных приращений потерь в соединениях это проявляется как устойчивая зависимость внешнего затухания от температуры (рис. 2, рис. 3). В случае, когда максимальные значения приращений, соизмеримы с погрешностью средств измерений, эта зависимость, как следовало ожидать, носит случайный характер.

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что на изменения затухания ОВ в соединениях ОК в муфтах при понижении температуры в значительной мере влияет тип кабеля. Так, при использовании муфт разного типа для монтажа кабеля одной марки, разброс оценок максимальных значений относительного приращения затухания волокон в муфтах не превышал 41%. Однако, при использовании муфт одного типа для монтажа кабеля разных марок, разброс оценок максимальных значений относительного приращения затухания волокон в муфте достигал 120% и более.

Очевидно, что полученного объема данных явно недостаточно для достижения приемлемой надежности статистических оценок. Однако он позволяет сделать выводы о некоторых характерных тенденциях. В частности, уже на данном этапе можно говорить о существенной зависимости стойкости соединений оптических кабелей смонтированных с использованием универсальных муфт по инструкции монтажа для универсальной муфты от особенностей сращиваемого кабеля. Отсюда следует вывод о необходимости учета особенностей типа сращиваемого оптического кабеля при разработке технологий монтажа строительных длин оптического кабеля. Другими словами, о необходимости адаптации инструкций по монтажу универсальных к специфике монтируемых оптических кабелей. То есть, необходима разработка на основании инструкций по монтажу универсальных муфт технологических карт монтажа для каждого конкретного типа оптического кабеля.

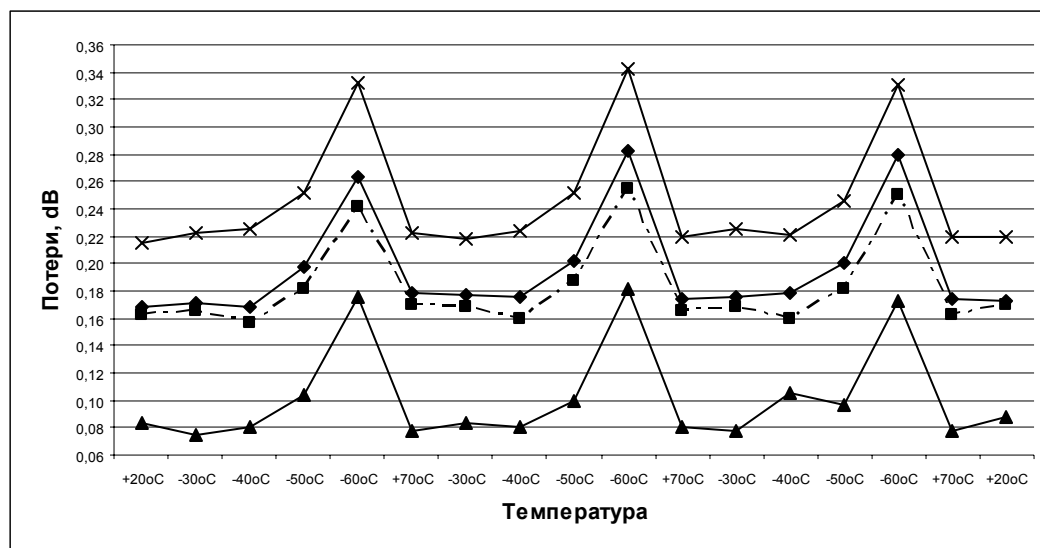


Рис. 2. Диаграммы приращения потерь оптических волокон. Образец кабель/муфта №1.

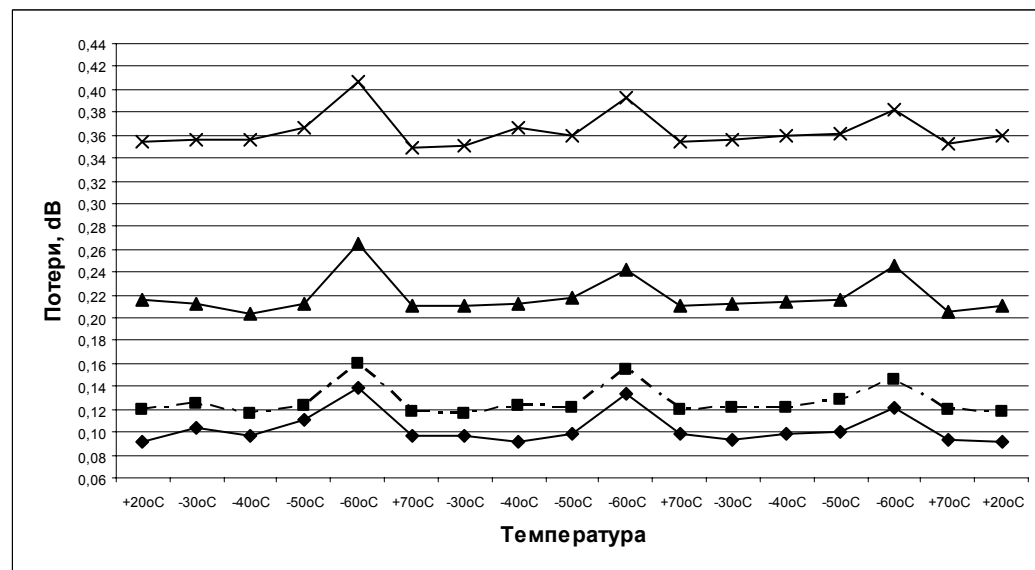


Рис. 3. Диаграммы приращения потерь оптических волокон. Образец кабель/муфта №2.

Литература

1. Installation Instructions, Universal Closure UCSO 4 -6 for optical waveguide cables, July 1993, Issue 4.
2. Руководство по эксплуатации муфты МТОК 96Т-01-IV на оптических кабелях связи ГК-У153.00.000 РЭ. - ЗАО «Связьстройдеталь», 2001.
3. Руководство по эксплуатации муфты МОГТ-М-01- IV на оптических кабелях местных сетей связи ГК-У177.00.000 РЭ. - ЗАО «Связьстройдеталь», 2001.
4. Instruction manual splice closure kit for optical fiber cable FSCO-CB. - Fujikura Ltd.
5. Instructions de montage. Manchon universel UCAO 4-9. – RXS, 1998.
6. Инструкция по монтажу FOSC-400A4. Муфта для волоконно-оптического кабеля со встроенной системой организации волокон. – Rauchem.
7. Муфта волоконно-оптического кабеля 2178-S. – 3М.
8. Быков Е.В., Гусев А.А., Матвеев Е.А., Сосулин Г.В., Ульяничев В.Н. К вопросу о возможности использования транзитной разделки волоконно-оптических кабелей в муфтах в условиях холодного климата - ФОТОН-ЭКСПРЕСС, №2 (34), 2004. – с. 12 -13.
9. ГОСТ 16962-71 «Изделия электронной техники и электротехники. Методы испытаний».
10. IEC 60794-1-2(2003). Optical fibre cables - Part 1-2: Generic specification - Basic optical cable test procedures.
11. ГОСТ 26814-86. Кабели оптические. Методы измерения параметров.

12. ГОСТ Р МЭК 794-1-93. Кабели оптические. Общие технические требования.
13. Типовая программа и методики испытаний волоконно-оптических кабелей для применения на ВСС РФ. Утверждена МФ РФ 01.08.94.
14. Типовая программа и методики испытаний арматуры кабелей связи для применения на ВСС РФ. Утверждена МФ РФ 01.07.94.
15. Дополнения к типовой программе и методике испытаний арматуры кабелей связи для применения на ВСС РФ. Утверждена Госкомсвязи РФ 30.07.98.
16. Типовая программа и методика сертификационных испытаний соединительных муфт для электрических и оптических кабелей связи. Этап лабораторных испытаний» (утверждена МС РФ 10.02.94).
17. РД.45.180 – 2001 «Руководство по проведению планово-профилактических и аварийно-восстановительных работ на линейно-кабельных сооружениях связи волоконно-оптической линии передачи».

ABOUT ADAPTATION OF OPTICAL CLOSURE INSTALLATION TECHNOLOGY TO OPTICAL CABLE CONSTRUCTION PECULIARITIES

Results of low temperature tests, been done for splices of optical cable lengths jointed in closures, are presented. Significant dependence between stability of splice, installed in universal closures according to their installation and operating instructions, and peculiarities of jointed optical cable were noted. As a result, there is a necessity of the universal optical closure installation and operating instruction adaptation to particular optical cable peculiarities.



К ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СЛАБОНАПРАВЛЯЮЩИХ КРУГЛЫХ СВЕТОВОДОВ НА МОДЕЛЬНЫХ ПРОФИЛЯХ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Андреев Р.В., Прапорщиков Д.Е.

Поволжская Государственная Академия Телекоммуникаций и Информатики

В задачах оптимизации спектральных характеристик хроматической дисперсии одномодовых оптических волокон линий передачи, поиска оптимального профиля показателя преломления компенсирующих дисперсию одномодовых оптических волокон целесообразно использовать приближенные решения, позволяющие рассчитывать хроматическую дисперсию с высоким быстродействием. Хроматическая дисперсия определяется первой и второй производными постоянной распространения волновода по длине волны [1-3]:

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

где D – приведенное значение хроматической дисперсии, пс/(нм·км); β – коэффициент фазы (мнимая часть постоянной распространения), рад/км; c – скорость света, км/с; λ – длина волны, нм.

Постоянная распространения определяется известной формулой [2, 4]:

$$\beta^2 = \frac{1}{a^2} \left(\frac{V^2}{2\Delta} - U^2 \right) \quad (2)$$

где U – параметр моды; V – нормированная частота; Δ – высота профиля; a – радиус сердцевины. Следовательно,

$$\frac{\partial \beta^2}{\partial \lambda} = \frac{1}{a^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial (V^2 / \Delta)}{\partial \lambda} - \frac{\partial U^2}{\partial \lambda} \right]; \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \beta^2}{\partial \lambda^2} = \frac{1}{a^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 (V^2 / \Delta)}{\partial \lambda^2} - \frac{\partial^2 U^2}{\partial \lambda^2} \right]. \quad (4)$$

Формулы для производных постоянной распространения первого, второго порядка получаем, дифференцируя β по длине волны λ . Они имеют вид

$$\frac{\partial \beta}{\partial \lambda} = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \frac{\partial \beta^2}{\partial \lambda}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \beta}{\partial \lambda^2} = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[\frac{\partial^2 \beta^2}{\partial \lambda^2} - 2 \cdot \left(\frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Таким образом, фактически задача сводится к нахождению производных квадрата параметра моды U .

В общем случае для слабонаправляющего оптического волокна с произвольным профилем показателя преломления эта величина может быть рассчитана на основе метода приближения Гаусса [2, 4]

$$U^2 = \frac{1}{R_0^2} + V^2 \cdot S_0; \quad (7)$$

$$S_0 = \sum_{p=1}^m h_p \cdot \left\{ \exp \left(-\frac{p^2 \cdot \Delta R^2}{R^2} \right) - \exp \left[-\frac{(p+1)^2 \cdot \Delta R^2}{R^2} \right] \right\} \quad (8)$$

Эквивалентный приведенный радиус находится по формуле

$$R_0^2 = \frac{1}{2 \cdot \ln V} \quad (9)$$

Дифференцируя (7), имеем

$$\frac{\partial U^2}{\partial \lambda} = S_0 \cdot \frac{\partial V^2}{\partial \lambda}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 U^2}{\partial \lambda^2} = S_0 \cdot \frac{\partial^2 V^2}{\partial \lambda^2} + S_1 \cdot \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial R_0^{-2}}{\partial \lambda}. \quad (11)$$

Выражение для производной $dR_0^{-2} / d\lambda$ имеет вид

$$\frac{\partial R_0^{-2}}{\partial \lambda} = \frac{S_1}{S_0 \cdot V^2} \cdot \frac{\partial V^2}{\partial \lambda}. \quad (12)$$

$$\text{где } S_1 = \sum_{p=1}^m h_p \cdot \left\{ (p \cdot \Delta R)^2 \cdot \exp \left(-\frac{p^2 \cdot \Delta R^2}{R^2} \right) - [(p+1) \cdot \Delta R]^2 \cdot \exp \left[-\frac{(p+1)^2 \cdot \Delta R^2}{R^2} \right] \right\}. \quad (13)$$

Однако, как известно, метод Гаусса не рекомендуется использовать для значений нормированной частоты меньше единицы ($V < 1$). Для малых значений нормированной частоты хорошие результаты дает приближение, основанное на соотношениях для профилей равного объема [2]:

$$W^2 = 1.261 \cdot \exp \left(-\frac{4 \cdot \pi}{\Omega \cdot V^2} \right), \quad (14)$$

где $W^2 = U^2 - V^2$, Ω - параметр объема профиля, определяется как

$$\Omega = \int_{A_\infty} (1 - f) dA, \quad (15)$$

где A - площадь поперечного сечения, A_∞ - площадь неограниченного поперечного сечения, f - функция профиля показателя преломления.

Тогда, выражая U^2 через (14) и дифференцируя по λ , получаем следующие выражения:

$$\frac{\partial U^2}{\partial \lambda} = \frac{\partial V^2}{\partial \lambda} \cdot \left[1 - \frac{5.044 \cdot \pi}{\Omega \cdot (V^2)^2} \cdot \exp \left(-\frac{4 \cdot \pi}{\Omega \cdot V^2} \right) \right]; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U^2}{\partial \lambda^2} = & \frac{\partial^2 V^2}{\partial \lambda^2} \cdot \left[1 - \frac{5.044 \cdot \pi}{\Omega \cdot (V^2)^2} \cdot \exp \left(-\frac{4 \cdot \pi}{\Omega \cdot V^2} \right) \right] + \\ & + \left(\frac{\partial V^2}{\partial \lambda} \right)^2 \cdot \frac{5.044 \cdot \pi}{\Omega \cdot V^6} \cdot \left[2 - \left(\frac{4 \cdot \pi}{\Omega \cdot V} \right)^2 \right] \cdot \exp \left(-\frac{4 \cdot \pi}{\Omega \cdot V^2} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Для оценки погрешностей воспользуемся модельными профилями показателя преломления слабонаправляющих одномодовых оптических волокон, для которых есть строгое решение, описываемое характеристическим уравнением [4]

$$U \cdot \frac{I_1(U)}{I_0(U)} = W \cdot \frac{K_1(W)}{K_0(W)} \quad (18)$$

Зная соотношения $U^2 + W^2 = V^2$ и (13), можно решить систему из двух уравнений и найти U^2 . Система решается численно. Далее выведем аналитические выражения для производных.

Перепишем (18) в виде

$$U \cdot I_1(U) \cdot K_0(W) = W \cdot K_1(W) \cdot I_0(U). \quad (19)$$

После дифференцирования левой и правой частей (14), получаем

$$\frac{dU}{d\lambda} \cdot (I_1 \cdot K_0 + U \cdot I_1' \cdot K_0 - W \cdot K_1 \cdot I_0') = \frac{dW}{d\lambda} \cdot (K_1 \cdot I_0 + W \cdot K_1' \cdot I_0 - U \cdot I_1 \cdot K_0'). \quad (20)$$

Обозначим

$$A_U = I_1 \cdot K_0 + U \cdot I_1' \cdot K_0 - W \cdot K_1 \cdot I_0'; \quad (21)$$

$$A_W = K_1 \cdot I_0 + W \cdot K_1' \cdot I_0 - U \cdot I_1 \cdot K_0'. \quad (22)$$

Тогда

$$A_U \cdot \frac{dU}{d\lambda} = A_W \cdot \frac{dW}{d\lambda}. \quad (23)$$

Как известно

$$\frac{dU^2}{d\lambda} = 2 \cdot U \cdot \frac{dU}{d\lambda}; \quad (24)$$

$$\frac{dW^2}{d\lambda} = 2 \cdot W \cdot \frac{dW}{d\lambda}. \quad (25)$$

Отсюда следует

$$A_U \cdot \frac{dU^2}{d\lambda} \cdot \frac{1}{2U} = A_W \cdot \frac{dW^2}{d\lambda} \cdot \frac{1}{2W}. \quad (26)$$

Дифференцируя $U^2 + W^2 = V^2$, получаем

$$\frac{dW^2}{d\lambda} = \frac{dV^2}{d\lambda} - \frac{dU^2}{d\lambda}. \quad (27)$$

Подставляя (26) в (27) и решая относительно производной квадрата параметра U , получаем

$$\frac{dU^2}{d\lambda} = \frac{U \cdot A_W}{W \cdot A_U + U \cdot A_W} \cdot \frac{dV^2}{d\lambda}. \quad (28)$$

Обозначим

$$\bar{A} = \frac{U \cdot A_W}{W \cdot A_U + U \cdot A_W}. \quad (29)$$

Тогда

$$\frac{dU^2}{d\lambda} = \bar{A} \cdot \frac{dV^2}{d\lambda}. \quad (30)$$

Из (30) следует

$$(U^2)'' = \bar{A} \cdot (V^2)'' + \bar{A}' \cdot (V^2)'. \quad (31)$$

Обозначим

$$C_A = \frac{U \cdot A_W}{W \cdot A_U}. \quad (32)$$

Тогда можно записать

$$\bar{A} = \frac{C_A}{1 + C_A}. \quad (33)$$

И, соответственно

$$\bar{A}' = \frac{C_A'}{(1 + C_A)^2}; \quad (34)$$

$$C_A' = \frac{(U \cdot A_W)' \cdot (W \cdot A_U) - (U \cdot A_W) \cdot (W \cdot A_U)'}{(W \cdot A_U)^2}. \quad (35)$$

Вычисления производятся как на основе строгого подхода, так и на основе приближенных решений. Несмотря на то, что решение на основе строгого подхода имеет свою погрешность вычисления, мы будем считать его в нашем случае идеальным. В результате получены зависимости погрешностей приближенных решений в зависимости от нормированной частоты. Так как дисперсия зависит все же в первую очередь от постоянной распространения, а вернее от ее производных, то целесообразно рассмотреть погрешности для них. Надо отметить, что с ростом нормированной частоты роль U^2 снижается. Это приводит к тому, что даже при огромных погрешностях для U^2 и ее производных погрешности приближения для β^2 и ее производных становятся приемлемыми.

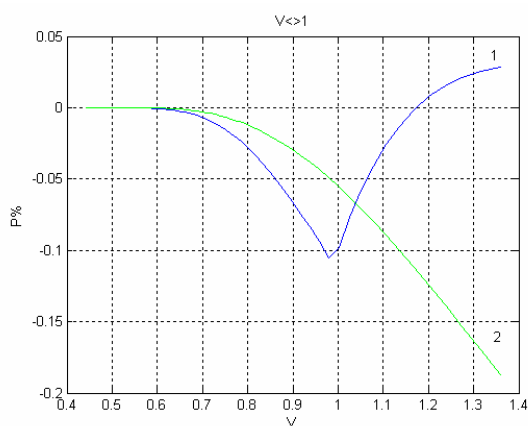


Рис. 1. Погрешность приближения для первой производной β^2 : 1-метод Гаусса; 2-приближение для малых V .

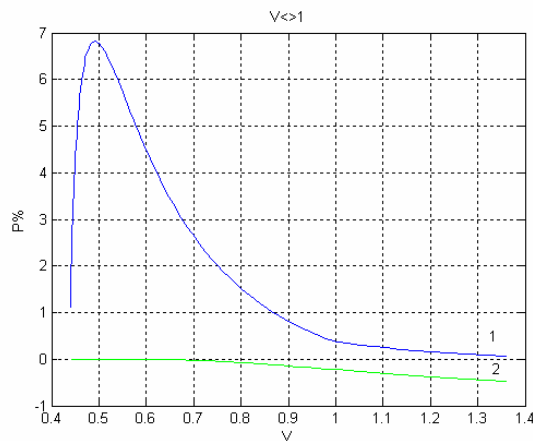


Рис. 2 Погрешность приближения для второй производной β^2 ; 1-метод Гаусса; 2-приближение для малых V .

Полученные зависимости погрешностей приближенных решений позволяют при заданной точности вычислений выбирать наиболее приемлемый метод решения, тем самым увеличивая быстродействие расчетов, что немаловажно. Подобный алгоритм “заданная погрешность-метод решения” представляет интерес в процессе оптимизации дисперсионных характеристик.

Литература

9. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. - М.: Мир, 1984. - 512 с.
10. Снайдер А., Лав Дж. Теория диэлектрических волноводов. - М.: Радио и связь, 1987. - 656 с.
11. Okamoto K. Fundamentals of Optical Waveguides. - San Diego: Academic Press, 2000. - 428 p.
12. Бурдин В. А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи. - М.: Радио и Связь, 2002. - 312 с.

ABOUT ESTIMATION OF ERRORS OF APPROXIMATED SOLUTIONS FOR WEAKLY GUIDING CIRCLE WAVEGUIDES ON MODEL REFRACTIVE INDEX PROFILES

In the given work results of the theoretical analysis of errors of the approximated calculation methods for transfer parameters of weakly guiding single-mode optical fibers are submitted, namely a Gaussian approximation method and approach for small values of the normalized frequency. Errors were defined by testing for a modeling step refractive index profile of weakly guiding optical fiber for which a strict decision is exist. Calculations were made both on the basis of the strict approach, and on the basis of the approximated solutions. In result dependences

of errors of the approximated solutions are received depending on the normalized frequency, allowable scopes for considered approximation are determined.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С КАБЕЛЬНЫМИ ВСТАВКАМИ

Трошин А.В.

Поволжская Государственная Академия Телекоммуникаций и Информатики

При эксплуатации протяженных волоконно-оптической линии передачи может возникнуть необходимость в проведении монтажа временных и постоянных оптических кабельных вставок в линию, при проведении аварийно - и ремонтно-восстановительных работ. В зависимости от характера повреждения кабельные вставки могут быть постоянными (ПОКВ), которые предназначены для организации постоянной схемы восстановления ВОЛП, и временные (ВОКВ), для организации временной схемы восстановления ВОЛП. Временные вставки в зависимости от числа отрезков оптического кабеля составляющего вставку, могут быть одноэлементными (ВОКВО) и многоэлементными (ВОКВМ). Монтаж ПОКВ в ВОЛП осуществляется методом сварки оптических волокон (ОВ). Монтаж ВОКВ может осуществляться с применением механический соединителей ОВ (сплайсов) и оптических разъемных соединителей (СОР). Из-за наличия дополнительных соединений ОВ после монтажа вставок, а также, поскольку сплайсы и СОР могут иметь высокий уровень отражаемой мощности, в ВОЛП будет наблюдаться увеличение попутного и обратного потоков отраженной мощности оптического излучения. Существующие в настоящее время руководящие документы [1-4] не дают детальной информации о допустимых параметрах кабельных вставок для систем передачи синхронной цифровой иерархии (SDH).

Согласно рекомендации ITU-T G.657 и G.691 для оптического линейного тракта нормируются следующие параметры отражения [1, 2]: коэффициент дискретного отражения, определяется как отношение отраженной оптической мощности к падающей мощности:

$$R = -10 \log(P_r / P_i) \quad (1)$$

где P_i - падающая мощность, дБ; P_r - отраженная мощность, дБ.

Оптические возвратные потери (ORL - Optical return loss) определяются как отношение части мощности, распространяющейся в обратном направлении, к полной вводимой мощности:

$$ORL = -10 \log(P_r / P_i) \quad (2)$$

где P_i - вводимая во входной конец ОВ оптическая мощность, Вт; P_r - отраженная оптическая мощность на входном конце ОВ, Вт.

Нормируемые параметры отражения для систем передачи SDH для протяженных элементарных кабельных участков, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Система SDH	Минимальный уровень ORL в точке S тракта, дБ	Максимальный коэффициент дискретного отражения между точками S и R тракта, дБ
STM-1	Не нормирован	Не нормирован
STM-4	24	-27
STM-16	24	-27
STM-64	24	
STM-256	В стадии исследования	

Важным ненормируемым параметром отражения для протяженных линий передачи является коэффициент многолучевой интерференции (MPI) в каждой точке ВОЛП, который определяется как отношение отраженной мощности, распространяющейся в направлении передачи сигнала к мощности полезного сигнала в данной точке L линии [4]:

$$MPI = 10 \log(P_{fs}(L) / P_s(L)) \quad (3)$$

Для неоднородной линии передачи, имеющей $s+1$ стыковых неоднородностей, где каждая i - неоднородность характеризуется коэффициентами прохождения (C_i) и отражения (S_i), общие коэффициенты отражения (R_{s+1}), и прохождения (T_{s+1}) сигнала по линии в частотной области могут быть рассчитаны по рекуррентным формулам [3]:

$$R_{s+1} = R_s + \frac{T_s^2 S_{s+1} \exp(-2\gamma_{s,s+1} L_{s,s+1})}{1 - R_s S_{s+1} \exp(-2\gamma_{s,s+1} L_{s,s+1})} \quad (4)$$

$$T_{s+1} = \frac{T_s C_{s+1} \exp(-\gamma_{s,s+1} L_{s,s+1})}{1 - R_s S_{s+1} \exp(-2\gamma_{s,s+1} L_{s,s+1})} \quad (5)$$

где $\gamma_{s,s+1}$ и $L_{s,s+1}$ - коэффициент распространения и длина однородного участка ОВ между s и $s+1$ стыками, M^{-1} .

В связи с тем, что в ВОЛП длительность оптических импульсов значительно меньше времени задержки прохождения импульсом линии, наиболее целесообразно производить преобразования в системе отсчета, движущейся со скоростью распространения импульса. В этом случае выражение для коэффициента распространения будет иметь вид [3]

$$\gamma_{n,n+1}(\varpi) = \alpha_{n,n+1} + i0.5\varpi^2 \beta_2(\varpi_0) \quad (6)$$

где $\alpha_{n,n+1}$ - коэффициент затухания на $n,n+1$ однородном участке ОВ, Нэп/м; ϖ_0 - частота излучения центральной длины волны, передаваемого сигнала; $\beta_2(\varpi_0)$ - вторая производная постоянной распространения.

Коэффициенты прохождения и отражения для n -го стыка ОВ в ВОЛП рассчитываются по формулам:

$$C_n = 10^{-a_n/10} \quad (7)$$

$$S_n = 10^{-r_n/10} \quad (8)$$

где a_n и r_n - номинальные коэффициенты затухания и отражения n -го стыка ОВ, дБ.

Используя соотношения (4) и (5) можно численно моделировать распространение импульсного сигнала вдоль оптической линии с многократным дискретным отражением. Оптические возвратные потери в точке S линейного тракта рассчитываются по формулам:

$$ORL = -10 \log(P_r(t) / P_{in}(t)) \quad (9)$$

$$P_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{in}(\varpi) R_{1,s+1}(\varpi) \exp(-i(\varpi_0 - \varpi)t) d\varpi \quad (10)$$

Коэффициент многолучевой интерференции в ВОЛП определяется из выражений:

$$MPI = 10 \log \left(\frac{P_{fr,s+1}(t) - P_{out}(t)}{P_{out}(t)} \right) \quad (11)$$

где P_{out} и $P_{fr,s+1}$ - мощности сигнала в линии без учета отражений и мощность на выходе линии, определяемые по формулам:

$$P_{fr,s+1}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{in}(\varpi) T_{1,s+1}(\varpi) \exp(-i(\varpi_0 - \varpi)t) d\varpi \quad (12)$$

$$P_{out}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{in}(\varpi) T_{out}(\varpi) \exp(-i(\varpi_0 - \varpi)t) d\varpi \quad (13)$$

Коэффициент передачи линии без отражений определяется из выражения:

$$T_{out} = \prod_{s=1}^N (C_s \exp(-\gamma_{s,s+1} L_{s,s+1})) \times C_{N+1} \quad (14)$$

На рис. 1-2 в качестве примера приведены результаты моделирования ORL и MPI в ВОЛП SDH STM-64 со стандартным одномодовым ОВ SMF-28 длиной 60 км с одноэлементной кабельной вставкой длиной 100 м, при разном уровне отражения соединителей и размещением в линии.

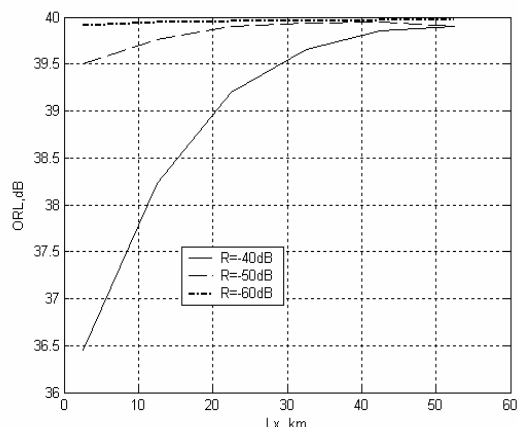


Рис.1 Зависимость ORL от уровня отражения на стыках ОВ R и местом размещения на линии L_X

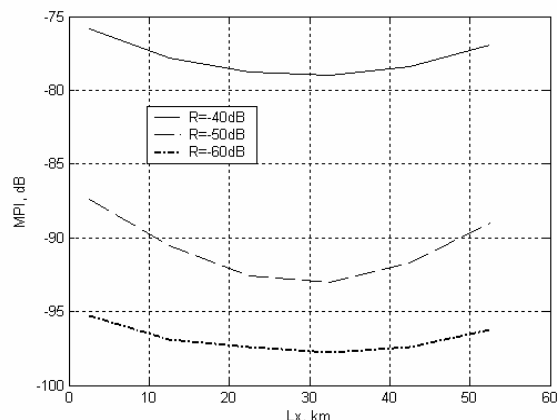


Рис.2 Зависимость MPI от уровня отражения на стыках ОВ R и местом размещения на линии L_X

По результатам проведенных расчетов в таблице 2 приведены полученные допустимые значения параметров отражений соединений при монтаже кабельной вставки в произвольном месте линии

Таблица 2

Тип вставки	Число секций	Число Стыков	Допустимый уровень отражения от стыка, дБ
ПОКВ/ВОКВО	1	2	-27
ВОКВМ	2	3	-30
	3	4	-31
	4	5	-32
	5	6	-32,5
	6	7	-33
	7	8	-33,5
	8	9	-34

Таким образом, представленный метод моделирования ВОЛП с кабельными вставками позволяет определить допустимый уровень отражений на соединениях ОВ при монтаже кабельных вставок в оптическом линейном тракте.

Литература

1. ITU-T Recommendation G.957, Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy, 1999
2. ITU-T Recommendation G.691, Optical interfaces for single channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical amplifiers, 2000
3. Бурдин В. А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи. – М.: Радио и Связь, 2002. – 312 с.
4. C. Fludger and R. Mears, Electrical Measurements of Multipath Interference in Distributed Raman Amplifiers, in Journal of Lightwave Technology, vol 19, no 4, April 2001

SIMULATION MULTIPATH INTERFERENCE IN OPTICAL LINK WITH CABLE INSERTIONS

Use in optical links of cable insertions in emergency reconstruction induces multipath interference at transmission of signal which induces because multiple reflectance from splices and connectors. The effect of multipath interference can influence general reflection parameters of optical fiber line and reduce receiving signal. In this paper simulation of multipath interference in optical line with multiple reflectances and its influence on the general reflection parameters is considered.

РАСЧЕТЫ ОСВЕЩЕННОСТИ РАБОЧИХ МЕСТ СВЕТОДИОДАМИ

Антонова Т.Ю.¹, Гутцайт Э.М.¹, Коган Л.М.², Краснопольский А.Е.³, Милютин Д.В.¹

¹Московский энергетический институт (технический университет),

²НПЦ оптико-электронных приборов «ОПТЭЛ»,

³Московский институт стали и сплавов (технический университет)

Доклад посвящен рассмотрению возможностей использования современных светодиодов (СД) для местного освещения.

Исследованы три способа размещения светодиодных модулей (СДМ) над освещаемой площадкой:

1. Непрерывное распределение большого количества СД над площадкой (в виде кластера с постоянными или изменяющимися интервалами в двух направлениях).
2. Размещение СДМ над площадкой небольшими группами (в виде островков) по углам (или узлам).
3. Размещение СДМ над площадкой в средней части (с поворотами СД под различными углами относительно неперпендикулярных центральных).

В качестве объектов исследований были опробованы высокоэффективные и мощные СД белого свечения (с большими и малыми кристаллами синего цвета, возбуждающими желтые люминофоры), разработанные и изготовленные в НПЦ «ОПТЭЛ» [1,2]. СД имели различные диаграммы направленности и существенно отличающиеся значения максимальных сил света. Параметры тех СД, которые использованы в приведенных ниже примерах, представлены в табл. 1.

Табл. 1.

Тип СД	I, мА	P _{эл} , Вт	Φ, лм	I ₀ , кд	2θ _{0,5} , град
У-164 Бл	30	0,11	2...3	30...40	8±2
У-172 Бл	30	0,11	2,5...3,5	3...4	45±10
У-342 Бл	350	3,5	70...90	40...60	50±10
У-345 Бл-1	350	1,25	25...27	80...150	20±5

Освещенность E в любой точке площадки от каждого СД с силой света I рассчитывалась по формуле

$$E(x, y, i, j) = \frac{I(x, y, i, j) \cos(\theta(x, y, i, j))}{(x - i\Delta x)^2 + (y - j\Delta y)^2 + l^2},$$

где i – количество СД по оси x с расстояниями Δx между ними, j – количество СД по оси y с шагом Δy и l – расстояние от СДМ до освещаемой площадки;

$$\theta(x, y, i, j) = a \tan \left(\frac{\sqrt{(x - i\Delta x)^2 + (y - j\Delta y)^2}}{l} \right).$$

Освещенность от всех СД в любой точке площадки определялась суммой

$$S(x, y) = \sum_i \sum_j E(x, y, i, j).$$

Зависимость силы света I от угла θ , называемая кривой силы света (КСС) или диаграммой направленности, в большинстве случаев определялась экспериментально, но иногда рассчитывалась по программе TrasePro, использующей более 100 тысяч лучей [3].

Расчеты освещенностей выполнялись в Маткаде и Матлабе. Последний использовался для ускорения счета при количестве СД более тысячи, а также при оптимизации поворотов СД для обеспечения наиболее равномерного распределения освещенности. Время счета в Матлабе уменьшалось на порядок, однако, на составление программы в матлабе затрачивалось значительно больше времени, чем в Маткаде.

Расчеты проводились для СД с концентрированными и широкими КСС, которые аппроксимировались либо многочленами n -й степени, либо приближенными формулами:

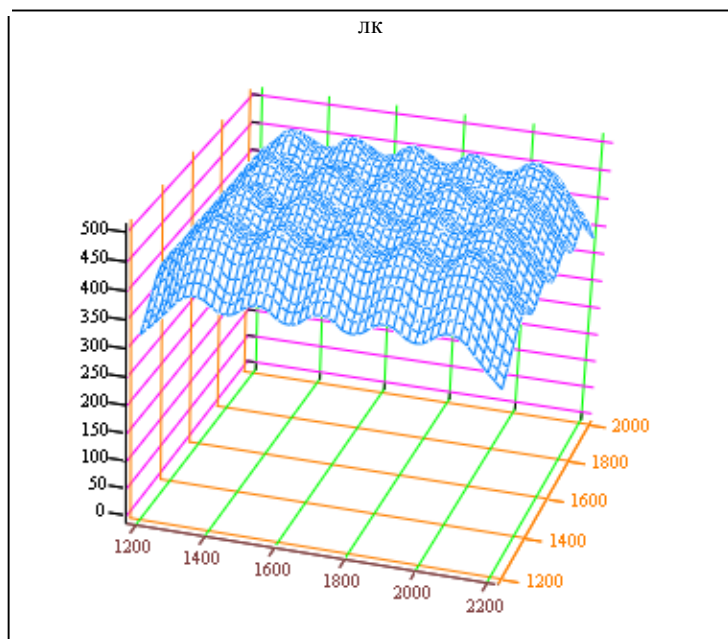
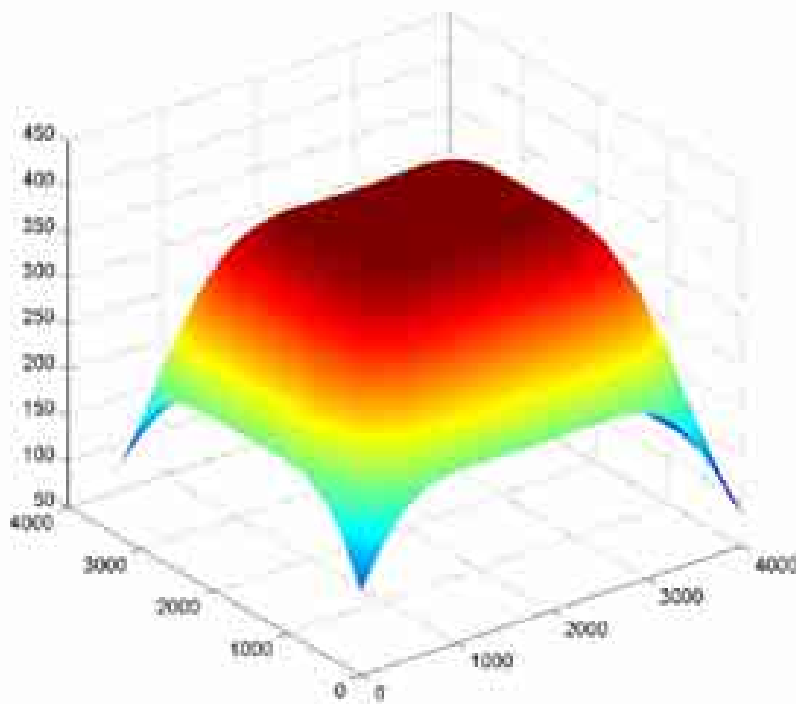
$$I(\theta) = I_0 \cos^n(m\theta) \text{ для концентрированных КСС и } I(\theta) = I_0 \left(\frac{\cos \theta}{\cos(\alpha \sin^n(m\theta))} \right) \text{ для широких КСС}$$

[4]. Здесь I_0 – осевая сила света (при $\theta = 0$), m , n и α – постоянные величины.

Результаты расчетов показали, что наиболее равномерное освещение обеспечивается при использовании кластерного варианта с большим количеством маломощных СД. Необходимое значение освещенности (око-

ло 400 лк) достигается выбором расстояний между СД в обоих направлениях. Например, на рис.1 (в Матлабе) показано распределение освещенности от СДМ, расположенного на высоте 1 м, содержащего 40 x 35 СД типа У-172Бл с расстояниями между ними по 9.5 см. СДМ обеспечивает освещенность более 400 лк с равномерностью, близкой к идеальной, на площадке 1.5 x 1.2 м².

Недостатками первого варианта являются необходимость использования большого количества СД и то, что СДМ занимает площадь, превышающую по размерам площадку с равномерной освещенностью. В данном случае она составляет 3.8 x 3.3 м². При использовании более мощных СД с более концентрированными КСС можно существенно уменьшить количество СД и соотношение между указанными площадями, но тогда ухудшится равномерность освещенности (рис.2, где представлены результаты моделирования в программе LightTools), где представлены результаты моделирования в программе LightTools, где обеспечивается на площадке 1 x 1 м² освещенность более 400 лк с равномерностью, близкой к идеальной, на площадке 1.5 x 1.2 м².



S

Рис. 1.
Рис. 2

В [5] проводится сравнение кластерных вариантов СДМ с широкими и концентрированными КСС и отмечается, что использование СД с широкими КСС не всегда целесообразно.

Для второго варианта, где СД расположены группами, желательно использовать мощные СД с не очень концентрированными КСС. Например, использование четырех групп по шести СД типа У-342 Бл обеспечивает освещенность более 400 лк на площадке $1.1 \times 0.8 \text{ м}^2$ с неравномерностью освещенности 7.5 %. При этом расстояние между центрами групп взято равным 0.8 и 0.9 м в различных направлениях, а расстояние между СД в группах – по 7.5 см.

Третий вариант, где используется кластер с повернутыми СД, удобен тем, что занимает сравнительно небольшую площадь и действует как рассеивающее стекло в светильнике, но без потерь светового потока. Например, в светильнике ЭЛКОМС, описанном в [6] и содержащем 19 СД типа У-164 Бл, рассеивающее стекло поглощает более 35% светового потока.

Как уже отмечалось, расчеты кластеров с повернутыми СД выполнялись в матлабе по программе, обеспечивающей поиск оптимального варианта. Расчеты проводились для СДМ из 8 x 8 СД типа У-342Бл и У-345Бл-1. Размеры СДМ составляли $30 \times 30 \text{ см}^2$. Результаты расчетов показали, что повороты СД У-345 с более концентрированными КСС эффективнее поворотов СД У-342. Так, линейные размеры участков, где неравномерность освещенности не превышает 15 %, при поворотах СД У-345 увеличиваются в пять раз, а для СД У-342 в два раза.

В заключение отметим, что использование большого количества СД позволяет не только улучшить равномерность освещения, но и повысить качество цветопередачи, если в СДМ среди белых СД размещать и цветные или применять только разноцветные СД без люминофоров.

Литература

1. Афанасьев В.Б., Гальчина Н.А., Коган Л.М., Рассохин И.Т. Светодиодные осветительные и светосигнальные приборы с увеличенным световым потоком // Светотехника, 2004. № 6. С.52 - 56.
2. Коган Л.М., Гальчина Н.А., Рассохин И.Т., Социн Н.П., Варешкин М.Г., Юнович А.Э. Спектры излучения осветителей белого свечения // Светотехника, 2005. № 1. С.12 - 16.
3. Алямовский А.А. Проектирование осветительных приборов с помощью программы TracePro. ЗАО «СИКОР», 2004, www.sikor.ru. 9 с.
4. Айзенберг Ю.Б. Основы конструирования световых приборов М.: Энергоатомиздат, 1996. 704 с.
5. Милютин Д.В., Сидоров А.М. (рук. Гутцайт Э.М.) Сравнение одномерных и двумерных вариантов при расчетах освещенностей от множества светодиодов // Тез. докладов на НТС «Молодые светотехники России». М. Интерсвет-2004. С. 49-55.
6. Антонова Т.Ю., Милютин Д.В., (рук-ли Гутцайт Э.М., Клыков М.Е.) Светодиодные устройства для местного освещения // Тез. докладов на НТС «Молодые светотехники России». М. Интерсвет-2004. С. 56-60.

The various methods of accommodation LEDs of modules above an illuminated site are investigated. The accounts of curve light intensity were executed under the program TracePro, the accounts of distribution Illuminances were executed under Mathcad and Matlab. The outcomes of accounts ensuring a various degree of nonuniformity distribution of light depending on parameters LEDs, their amount and method of accommodation are discussed.

