

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ УЧАСТКОВ ВОЛН С ПОВЫШЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДОВОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

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

PROBLEMS AND METHODS OF LOCALIZATION OF FIBER OPTIC LINK SECTIONS WITH HIGH POLARIZATION MODE DISPERSION

V.A. Andreev, V.A. Burdin, A.V. Bourdine

Одним из основных факторов, ограничивающих возможности передачи в волоконно-оптических линиях со скоростью свыше 10 Гбит/с, является поляризационная модовая дисперсия (ПМД) [1,2]. В отличие от хроматической дисперсии ПМД – величина случайная, что существенно ограничивает возможности ее компенсации. Результаты обследования волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), находящихся в эксплуатации более 2-3 лет, показали, что в 10-20% от всех случаев ПМД оптических волокон (ОВ) не отвечала требованиям высокоскоростной передачи [3]. При этом ПМД всех ОВ кабелей, прошедших обследование, до прокладки соответствовали нормам. Для ВОЛП, построенных до 1996-98 годов, проблема усугубляется еще и тем, что до 1996 года ПМД не нормировалась и оптические кабели соответствующие испытания не проходили. Данные обследований ВОЛП, введенных в эксплуатацию, подтверждают справедливость так называемой шарнирно-секционной модели ПМД, согласно которой результирующее значение ПМД на регенерационном участке (РУ) определяется, в основном,

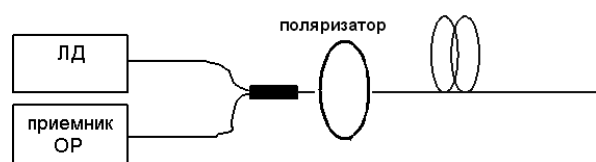


Рис. 1

отдельными участками линии с повышенными значениями ПМД [4-8]. Учитывая это, на первый план выходит задача локализации таких участков. Для этих целей используют поляризационные оптические рефлектометры обратного рассеяния (POTDR)[9].

Принципы работы POTDR известны достаточно давно. В простейшем случае – это обычный оптический рефлектометр с поляризатором на входе [10,11]. Упрощенная схема измерений ПМД методом обратного рассеяния представлена на рис.1, где ЛД – источник оптического излучения (лазерный диод), а ОР – оптический рефлектометр.

Традиционный подход к определению ПМД методом обратного рассеяния [5] базируется на определении изменений плоскости поляризации (State Of Polarization – SOP) оптического излучения вдоль исследуемого ОВ по результатам измерений длины биений и длины корреляции. Расчет ПМД может быть выполнен с применением известной формулы [9,12-13]:

$$PMD^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{cL_B} \right)^2 \cdot L_C^2 \cdot \left[\frac{2L}{L_C} - 1 + \exp \left(-\frac{2L}{L_C} \right) \right], \quad (1)$$

В.А. Андреев, д.т.н.

В.А. Бурдин, д.т.н.

А.В. Бурдин, к.т.н.

г. Самара, Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики

где c – скорость света в вакууме; λ – длина волны; L – длина оптической линии передачи; L_B – длина биений; L_C – длина корреляции.

Длина биений – это расстояние, за которое плоскость поляризации совершает полный оборот. Длина биений L_B – обратно пропорциональна значению двулучепреломления (относительной задержке между компонентами оптического сигнала, разложенного по быстрой и медленной оптическим осям волокна):

$$L_B = \frac{2\pi}{\delta\beta}, \quad (2)$$

где $\delta\beta$ – двулучепреломление.

Длина корреляции – это расстояние, после прохождения которого большая часть энергии одной моды (быстрой или медленной) преобразуется в другую моду. Длина корреляции (L_C) определяется как расстояние, на котором пространственная корреляция двулучепреломления уменьшается в $1/e^2$ раз.

В основе метода лежит кусочно-регулярная модель волоконно-оптической линии [9, 14–15], согласно которой ОВ представляется в виде последовательного соединения элементарных участков, каждый из которых описывается матрицей Джонса J_i . Результирующая характеристика для потока обратного рассеяния, распространяющегося до i -того элементарного участка и возвращающегося обратно на ближний конец, выражается через соответствующие матрицы Джонса элементарных участков:

$$J_{Bi} = (J_1 J_2 \dots J_{i-1} J_i) (J_i J_{i-1} \dots J_2 J_1)^T,$$

где J_i^T – транспонированная матрица J_i .

Матрица Джонса элементарного участка волокна с двулучепреломлением для потока, распространяющегося в прямом направлении, выглядит следующим образом:

$$J = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix},$$

$$a_{12} = a_{21} = j \cdot \sin\left(\frac{\delta\beta \cdot z}{2}\right) \cdot \sin(2\theta),$$

$$a_{11} = \cos\left(\frac{\delta\beta \cdot z}{2}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{\delta\beta \cdot z}{2}\right) \cdot \cos(2\theta),$$

$$a_{22} = \cos\left(\frac{\delta\beta \cdot z}{2}\right) - j \cdot \sin\left(\frac{\delta\beta \cdot z}{2}\right) \cdot \cos(2\theta).$$

Соответственно, матрица Джонса такого элементарного участка ОВ для потока обратного рассеяния на ближнем конце принимает вид:

$$J_B = J^T \cdot J = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$b_{11} = \cos(\delta\beta \cdot z) + \sin(\delta\beta \cdot z) \cdot \cos(2\theta),$$

$$b_{22} = \cos(\delta\beta \cdot z) - \sin(\delta\beta \cdot z) \cdot \cos(2\theta),$$

$$b_{12} = b_{21} = \sin(\delta\beta \cdot z) \cdot \sin(2\theta).$$

Здесь z – координата вдоль волокна; θ – угол поворота осей ОВ, который от сегмента к сегменту изменяется случайным образом.

Характеристика линейного поляризатора с углом ϕ записывается следующим образом:

$$A(\phi) = \begin{bmatrix} \cos^2(\phi) & \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \cdot \cos(\phi) & \sin^2(\phi) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Соответственно, с учетом поляризатора приведенные значения составляющих электрического поля на ближнем конце такого элементарного участка ОВ равны:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = A(\phi) \cdot J_B. \quad (7)$$

Согласно (5)–(7) для произвольных значений θ и ϕ приведенное значение мощности оптического потока обратного рассеяния равно:

$$P_B / P_0 = \cos^2(\delta\beta \cdot z) + Q \cdot \sin^2(\delta\beta \cdot z), \quad (8)$$

где величина Q в зависимости от углов θ и ϕ может принимать значения от 0 до 1.

При выполнении условий $\theta = 45^\circ$ и $\phi = 0$, которые обеспечиваются выбором параметров схемы, эта величина равна:

$$P_B / P_0 = \cos^2(\delta\beta \cdot z) = 1 + \cos(2 \cdot \delta\beta \cdot z). \quad (9)$$

Оценка двулучепреломления $\delta\beta$ для сигнала, распространяющегося в прямом направлении, однозначно связана с оценкой двулучепреломления $\delta\beta_R$ для сигнала обратного рассеяния соотношением $\delta\beta_R = 2 \cdot \delta\beta$.

Из (8)–(9) следует, что на ближнем конце принимаемый сигнал обратного рассеяния модулирован с периодом $L_B / 2$. Таким образом, задача определения длины биений на элементарном участке сводится к выявлению периодической составляющей на фоне помех и нахождению ее периода колебаний и его изменений вдоль линии.

Длина биений и длина корреляции изменяются вдоль исследуемой длины ОВ случайным образом. Это обусловлено особенностями технологического процесса изготовления волокна, локальными механическими напряжениями и т.п. Как следствие, чтобы оценить распределение ПМД вдоль длины ОВ необходимо знать ло-

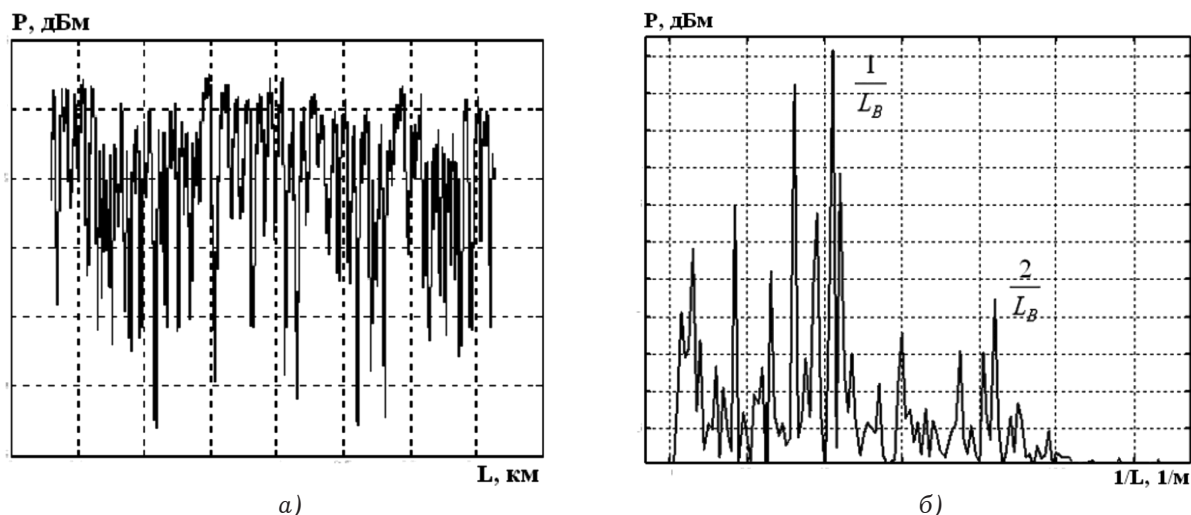


Рис. 2

кальные значения этих случайных параметров. Учитывая случайный характер величины длины биений на некотором элементарном участке определяется в результате усреднения:

$$L_B = 2 \cdot \pi / \langle \delta \beta^2 \rangle^{1/2}. \quad (10)$$

Для определения среднего значения длины биений ОБ на некотором участке в основном применяется два метода. Первый – LCR (Level Crossing Rate), – основан на подсчете числа пересечений нормализованной характеристики обратного рассеяния ОБ с линией заданного уровня [9]. Известно несколько способов его реализации. В частности, в [13] предлагается длину биений определять по формуле:

$$L_B = \frac{1}{0.91} \left(\frac{2L}{N} - 1.65 \right),$$

где L – длина участка ОБ, на котором определяется длина биений, м;

N – количество максимумов нормализованной характеристики обратного рассеяния на этом участке.

В [16] рекомендуется определять длину биений следующим образом:

$$L_B = \begin{cases} \frac{4L}{N_{MAX}}, & \frac{N_{MAX}}{N_{MEAN}} < 1,3, \\ \frac{3.25L}{N_{MEAN}}, & \frac{N_{MAX}}{N_{MEAN}} > 1,3, \end{cases}$$

где N_{MAX} – число пересечений нормализованной характеристики обратного рассеяния линией максимального уровня, а N_{MEAN} – число пересечений нормализованной характеристики обратного рассеяния линией среднего уровня.

В основе второго метода [17] – спектральный

анализ нормализованной характеристики обратного рассеяния. В качестве примера на рис.2 приведен типичный вид характеристики обратного рассеяния, полученной с помощью POTDR (рис.2а) и соответствующая ей спектральная характеристика (рис.2б). Характерной особенностью является наличие двух спектральных составляющих с периодами равными L_B и $L_B/2$.

Для определения длины корреляции используют соотношение [9]:

$$r_R(z) = \frac{16\pi^2}{3L_B^2} \exp\left(-\frac{|z|}{L_C}\right),$$

где $r_R(z)$ – автокорреляционная функция двулучепреломления, рассчитанная по распределению длины биений вдоль ОБ.

Общие проблемы, характерные для всех способов локализации участков с повышенными значениями ПМД, связаны, прежде всего, с тем, что ПМД – величина случайная. Случайный характер изменений ПМД во времени, строго говоря, требует непрерывного контроля этого параметра. А решение задачи локализации зон повышенной ПМД, по крайней мере, – выполнения долгосрочных измерений. Случайный характер изменений ПМД с длиной волны при строгой постановке задачи требует проведения измерений на всех оптических несущих рабочего диапазона длин волн ВОЛП, что связано со значительными затратами.

Еще одна проблема, ограничивающая возможности рефлектометрических методов оценивания распределений ПМД вдоль ОБ – деполяризация зондирующих сигналов на участках с повышенной ПМД. Из-за ограничения динамического диапазона при сильной деполяризации на одном

из участков отношение сигнал/помеха снижается так, что не позволяет выделить полезную составляющую характеристики обратного рассеяния участков линии, следующих за ним. Степень деполяризации возрастает с увеличением полосы длин волн источника оптического излучения. Поэтому в POTDR в отличие от обычных оптических рефлектометров применяются более узкополосные лазеры. Степень деполяризации возрастает и с увеличением длительности зондирующих импульсов, что ограничивает возможности увеличения динамического диапазона рефлектометра.

Необходимо отметить, что важнейшей для оптической рефлектометрии вообще, и для рассматриваемой задачи, в частности, является проблема противоречий обеспечения необходимой разрешающей способности и требуемого динамического диапазона. В [18] на основе традиционного для оптических рефлектометров подхода к определению разрешающей способности декларируется, что измерения длины биений можно обеспечить только при длительности зондирующих импульсов менее половины времени распространения импульса на расстоянии равном длине биений. Это, как показано в [11], требует измерений с длительностью зондирующих импульсов менее 10 нс для стандартных ОВ и существенно меньшей для измерений на участках с повышенной ПМД. При таких длительностях исключается возможность обеспечения динамического диапазона, необходимого для измерений на участках линий длиной до 100 км и более [18]. По этой причине в настоящее время практическое применение нашел метод обратного рассеяния, основанный на измерениях распределения степени деполяризации (Degree of Polarization) [11, 19]. Здесь исключена необходимость измерений длины биений, что позволяет работать с зондирующими импульсами относительно большой длительности и выполнять измерения на РУ протяженностью 100 км и более. Однако, из-за отсутствия данных о длине биений данный метод позволяет получать только качественные оценки ПМД на участках – «хорошо» или «плохо».

В [15] рассмотрена простая модель, описывающая напряженность поля потока обратного рассеяния на ближнем конце элементарного участка цилиндрического ОВ с двулучепреломлением для зондирующего оптического импульса прямоугольной формы длительностью T_0 :

$$E_S(x, y, z) = e_M(x, y) \cdot \exp[-\alpha \cdot v_g \cdot t] \times \int_{v_g(t-T_0/2)}^{v_g(t+T_0/2)} A(z_S) \cdot \cos(\omega t - 2\beta \cdot z_S - \psi_S) dz_S. \quad (11)$$

Полагается, что потери для всех составляющих зондирующего импульса одинаковы. Выражения, описывающие мощность поляризационных составляющих потока обратного рассеяния на ближнем конце после поляризатора, имеют вид:

$$\begin{aligned} P_p &= \exp(-2\alpha z) \times \\ &\times \{P_x G_N^2(z) \cos^2 \theta + P_y G_P^2(z) \sin^2(\theta) + \\ &+ 2\sqrt{P_x P_y} G_P(z) G_N(z) \sin(2\theta) \cos(2\delta\beta z)\}, \\ P_N &= \exp(-2\alpha z) \times \\ &\times \{P_x G_N^2(z) \cos^2 \theta + P_y G_P^2(z) \sin^2(\theta) - \\ &- 2\sqrt{P_x P_y} G_P(z) G_N(z) \sin(2\theta) \cos(2\delta\beta z)\}, \\ G_{(N,P)} &= \frac{\omega/c}{n(\pi \cdot r_0^2)} \cdot \frac{\sin(2\beta_{(N,P)} \cdot L_0)}{\beta_{(N,P)}} \times \\ &\times \iint \Delta\chi(x, y, z) \cdot \exp\left[-2 \frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right] dx dy. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь:

$$L_0 = v_g \cdot T_0 / 2,$$

$$P_x = \frac{1}{2Z_0} \cdot \frac{\pi \cdot r_0^2}{2} (E_0 \cos \theta)^2,$$

$$P_y = \frac{1}{2Z_0} \cdot \frac{\pi \cdot r_0^2}{2} (E_0 \sin \theta)^2.$$

Индексами N, P обозначены составляющие перпендикулярные и параллельные, соответственно, главной оси ОВ – O_x .

θ – угол оси поляризатора относительно главной оси ОВ – O_x ;

r_0 – радиус пятна моды;

α – коэффициент затухания ОВ;

β – постоянная распространения ОВ;

v_g – групповая скорость распространения оптического излучения в ОВ;

E_0 – максимальное значение напряженности электрического поля;

$\Delta\chi(x, y, z)$ – функция, характеризующая обратное рассеяние в ОВ в точке с координатами x, y, z .

Согласно (11)–(12) сигнал обратного рассеяния содержит переменную составляющую, размах которой уменьшается с увеличением длительности импульса. Очевидно, что если для заданного динамического диапазона рефлектометра обеспечивается требуемое для измерений этой

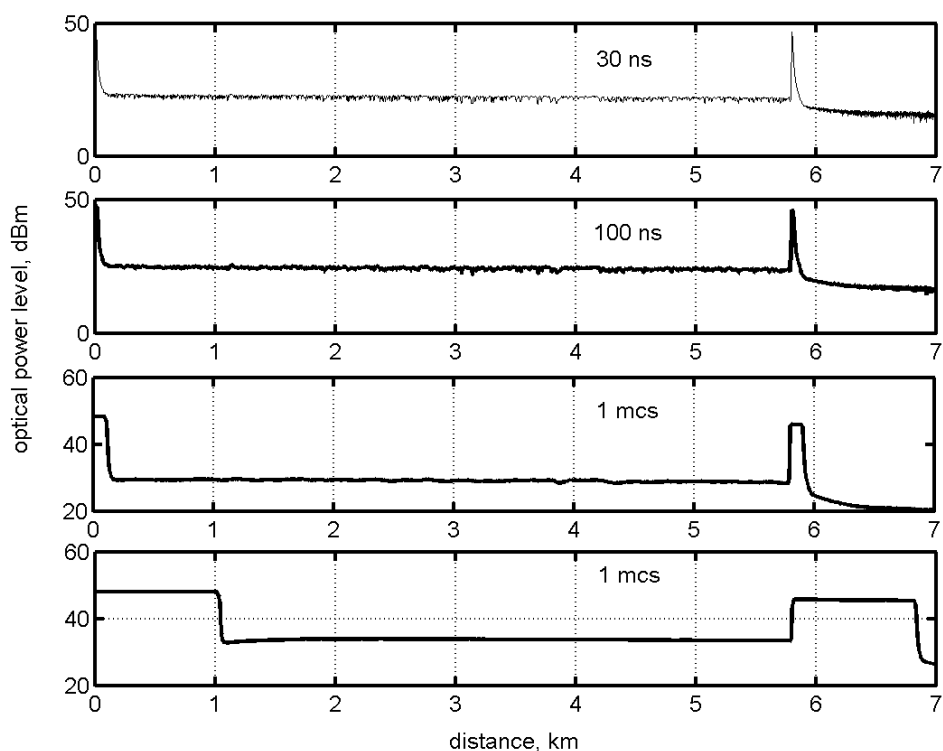


Рис. 3

разности уровней отношение сигнал/помеха, то длина биений может быть измерена и в случае, когда длительность зондирующего импульса значительно превышает длину биений. Разрешающая способность в этих условиях определяется шагом дискретизации. Возможность измерений длины биений при использовании зондирующих импульсов увеличенной длительности продемонстрирована в работах [19, 20], которые легли в основу способа измерений [21]. Поскольку суммарная энергия потока обратного рассеяния оптического излучения на ближнем конце растёт пропорционально длительности зондирующего импульса и имеет место взаимодействие мод поляризации вдоль линии, то можно предположить, что средняя мощность мод поляризации, при этом также будет расти. Очевидно, что данная гипотеза требует подтверждения.

Таким образом, чтобы оценить возможности использования зондирующих импульсов увеличенной длительности для измерений длины биений на протяженных линиях необходимо, во-первых, проверить гипотезу об увеличении динамического диапазона POTDR при увеличении длительности импульсов. А, во-вторых, определить требуемое отношение сигнал/помеха и запас по затуханию оптического рефлектометра в зависимости от длительности зондирующих

импульсов. Здесь, запас по затуханию – это разность между значением динамического диапазона и требуемым отношением сигнал/помеха для заданной длительности зондирующего импульса.

В целях проверки выдвинутых предположений и получения искомых оценок были выполнены экспериментальные исследования. В качестве физической модели POTDR использовался оптический рефлектометр HP E600A с модулем E416A, на выходе которого был установлен оптический поляризатор. Измерения были выполнены на линии, составленной из трех длин одномодового ступенчатого ОВ – 3,4 км, 0,580 км и 1,7 км, соединенных последовательно методом сварки. Измерения выполнялись при длительностях зондирующих импульсов 10 нс, 30 нс, 100 нс, 300 нс, 1 мкс, 3 мкс и 10 мкс, – в двух направлениях. Результаты измерений характеристик обратного рассеяния записывались в формате ASCII и затем обрабатывались с использованием, разработанного программного обеспечения, работающего в среде MatLab. В качестве примера, вид характеристики обратного рассеяния всей линии и ее отдельного участка для некоторых значений длительности зондирующего импульса приведен на рис.3 и рис.4.

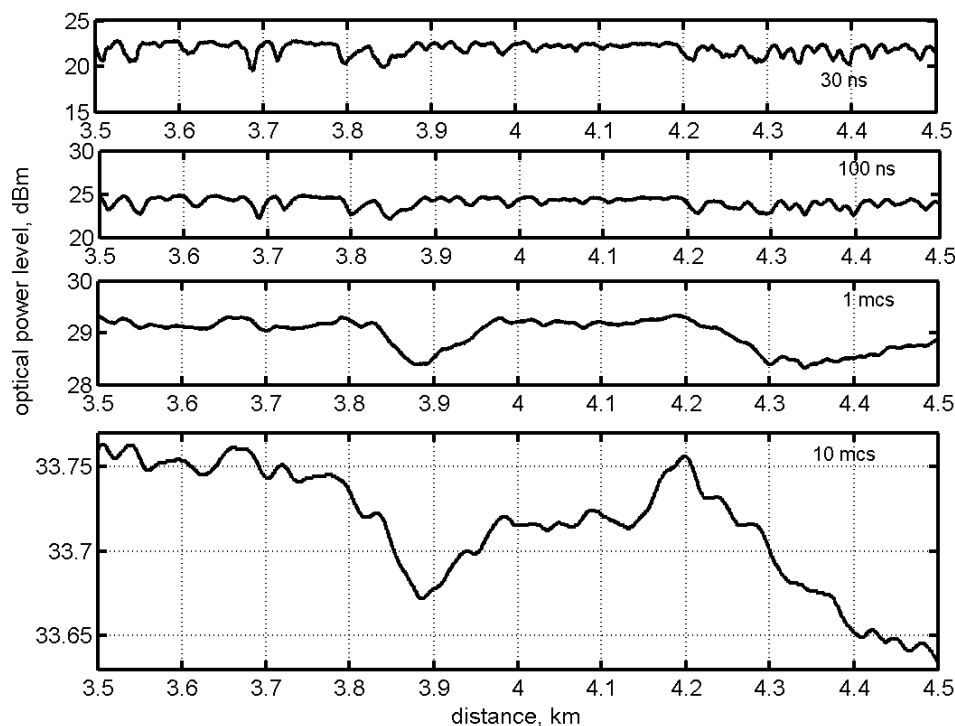


Рис. 4

Предварительно на основе известных методик [18, 22], была выполнена проверка динамического диапазона оптического рефлектометра с установленным на выходе поляризатором при длительностях зондирующих импульсов 30 нс, 100 нс, 1 мкс и 10 мкс. Результаты проверки показали, что полученные оценки динамического диапазона исследуемой схемы оптического рефлектометра с поляризатором не хуже паспортных значений оптического модуля E416A [21], которые приведены в таблице 1. Там же приведены средние значения размаха принимаемого фотодетектором периодической составляющей сигнала обратного рассеяния, прошедшего через поляризатор. Согласно [18] требуемое для измерений таких изменений уровня мощности отношение сигнал/помеха определялось по известной формуле:

$$\Delta = 5 \lg \left[\frac{1 + SNR}{1 - SNR} \right], \quad (13)$$

где Δ – изменение уровня оптической мощности, которое необходимо измерить, дБм;

SNR – необходимое для этого значение отношения сигнал/помеха в точке измерений.

Полученные в результате расчетов оценки отношения сигнал/помеха и запаса по затуханию, который определяет рабочий диапазон рефлектометра, сведены в таблицу 1. Для сравнения

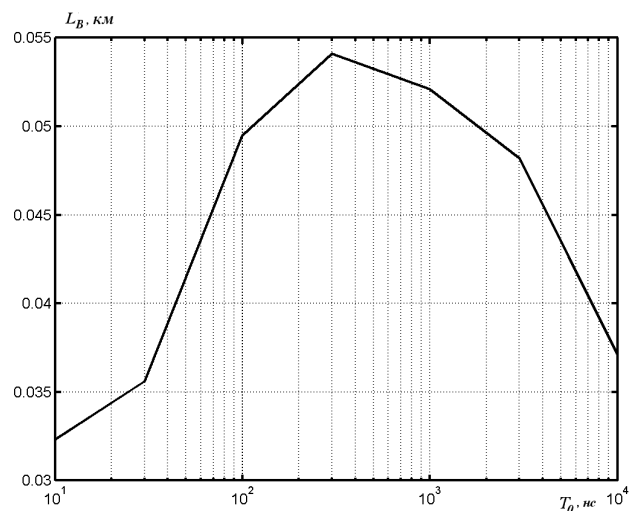


Рис. 5

приведены и приближенные оценки расстояний, в пределах которых могут быть осуществлены измерения длины биений стандартного оптического ступенчатого ОВ со средним значением километрического затухания – 0,22 дБ/км. Как видим рабочий диапазон и, соответственно, протяженность участков линии, в пределах которых допустимы измерения длины биений, увеличиваются при увеличении длительности зондирующего импульса.

В целях сравнения по измеренным данным характеристик обратного рассеяния были по-

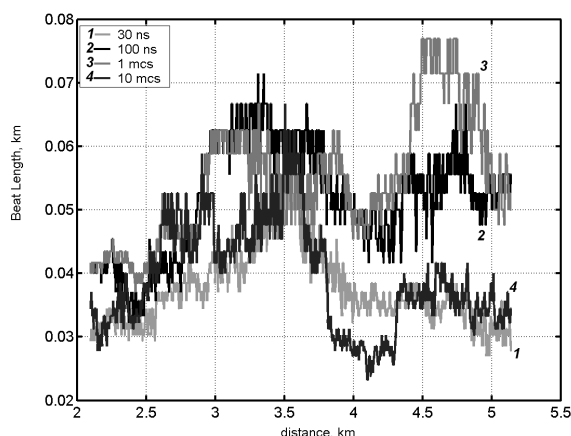


Рис. 6

лучены оценки длины биений исследуемых ОВ. Оценки среднего значения длины биений по нормализованной характеристике были получены описанным выше методом LCR. При обработке характеристик обратного рассеяния, полученных при длительности зондирующего импульса, которой соответствует длина во много раз превышающая длину биений, возникает проблема нормализации характеристики, связанная с необходимостью исключения искажений, обусловленных формой импульса, которая в общем случае неизвестна. В частности, в этом случае неприменимы хорошо зарекомендовавшие себя для условий коротких импульсов методы, основанные на применении медианного фильтра [23]. Для нормализации характеристик был разработан алгоритм, базирующийся на аппроксимации сплайнами [24]. Для сравнения по характеристике, измеренной при длительности зондирующего импульса 10 нс, были получены оценки среднего значения длины биений исследуемого отрезка ОВ при использовании известного и предложенного алгоритмов приведения характеристики. В первом случае средняя длина биений составила - 36,9 м, а во втором - 32,3 м. Расхождение - порядка 12,5%, что, учитывая характер исследуемой величины, вполне удовлетворительно.

На рис.5 представлены оценки среднего значения длины биений исследуемого участка ОВ, полученные при различных значениях длительности зондирующего импульса. При увеличении длительности зондирующего импульса результаты измерений длины биений сначала увеличиваются, возрастают почти вдвое, а затем снижаются, достигая при $L_0 \gg L_B$ практически исходного значения. Особенности зависимости

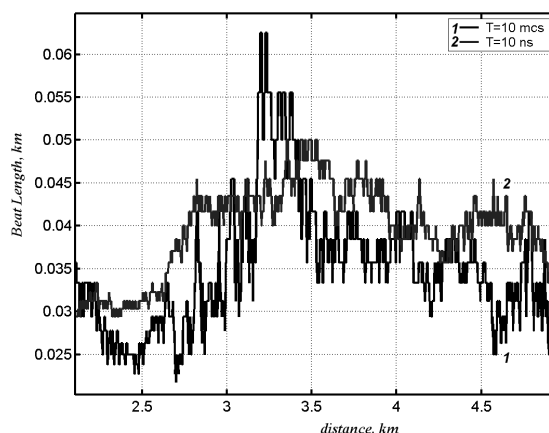


Рис. 7

полученных оценок длины биений от длительности зондирующего импульса иллюстрируют рис.6 и рис.7. На рис.6 приведены распределения длины биений вдоль исследуемого ОВ, полученные в результате обработки характеристик обратного рассеяния, измеренных при длительностях зондирующих импульсов 30 нс, 100 нс, 1 мкс и 10 мкс. А на рис.7 представлены распределения длины биений, полученные для длительностей зондирующих импульсов 10 нс и 10 мкс. Увеличение значений оценок длины биений и, соответственно, их погрешностей в области $L_0 \geq L_B$ можно объяснить взаимодействием волн, рассеянных с разных участков длины, перекрываемой длительностью импульса. С увеличением длительности импульса при $L_0 \gg L_B$ взаимодействие нарушается и погрешности снижаются до допустимых значений. Это наглядно иллюстрирует рис.7. Как следует из графиков, результаты, полученные при длительности зондирующего импульса 10 нс и 10 мкс, достаточно хорошо согласуются. При длительности зондирующего импульса 10 нс среднее значение длины биений исследуемого участка ОВ около 32,3 м, а при длительности 10 мкс - 37,1 м. Расхождение между этими оценками менее 15%, что для исследуемой величины вполне допустимо.

Таким образом в результате эксперимента продемонстрирована возможность измерений длины биений при длительности зондирующего импульса, удовлетворяющей условию $L_0 \gg L_B$. Показано, что увеличение длительности зондирующего импульса до 10 мкс позволяет увеличить рабочий диапазон и, соответственно, длину участка в пределах которого могут быть выполнены измерения длины биений. Для стан-

дартного одномодового ступенчатого ОВ получены оценки требуемого для измерений длины биений отношения сигнал/помеха в зависимости от длительности зондирующего импульса. Эксперимент показал возможность измерений длины биений рассматриваемым способом даже в случае простейшей схемы РОТР при использовании лазера с типичной для обычных оптических рефлектометров шириной полосы длин волн. Полученные результаты позволяют говорить о возможности реализации предлагаемого способа для локализации участков с повышенными значениями ПМД на протяженных линиях. Но для этого необходима разработка эффективных алгоритмов нормализации характеристики обратного рассеяния и других методов, обеспечивающих подавление ее искажений за счет формы зондирующего импульса.

Литература

- Optical fiber telecommunication. IVA. Components// Edited by I. P. Kaminow, T. Li// Academic press, Elsevier science, 2002. – 876 p.
- Optical fiber telecommunication. IVB. Systems and impairments// Edited by I. P. Kaminow, T. Li// Academic press, Elsevier science, 2002. – 1022 p.
- Barcelos S. PMD field audit reveals investment losses.- *Lightwave*, №2, 2005.-
- Бродский М., Бородинский М., Магилл П., Фриго Н. Дж., Тур М. Шарнирно-секционная модель ПМД. – *Lightwave Russian Edition*, №1, 2005. – с. 24 – 28.
- Brodsky M., Magill P. D., Frigo N. J. Polarization Mode Dispersion of Installed Recent Vintage Fiber as a Parametric Function of Temperature.- *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2004. – vol. 16 (1). – p.p. 209 – 211.
- Magill P.D., Brodsky M. PMD of Installed Fiber – an Overview. – *Proc. LEOS PMD Summer Topical Meeting*, 2003, pp. 7-8, Paper MB2.2.
- Allen Ch., Kondamuri P. K., Richards D. L., Hague D. C. Measured temporal and spectral PMD characteristics and their implications for network-level mitigation approaches. – *J. Lightwave Technol.*, vol. 21 (1), 2003. – pp. 79-86.
- Kondamuri P., Allen Ch. PMD Characterization of Installed Fiber: Final Report. – *Technical Report*, ITTC-FY2004-TR-33750-01, June 2004, – 21p.
- Galtarossa A., Menyuk C. R. Polarization mode dispersiyn.- *Springer*, 2005.- 296 c.
- Galtarossa A., Palmieri L., Schiano M., Tambosso T. Single-end polarization mode dispersiyn measurement using backreflected spectra through a linear polarizer.- *J. of Lightwave Technol.*, vol. 17,no.10, 1999. – pp. 1835-1842
- Huttner B., Gisin B., Gisin N. Distributed PMD measurement with a polarization-OTDR in optical fibers. – *J. of Lightwave Technol.*, vol.17, 1999. – pp. 1843-1848.
- Wuilpart M., Van Malderen J. Method for characterizing an optical fibre link.- Патент WO 2005/041449, 2004.
- Wuilpart M., Ravet G., Megret P., Blondel M. Polarization mode dispersion mapping in optical fibers with a polarization-OTDR. – *IEEE Photonics technology letters*, vol.14, No12, 2002. – p.p. 1716 – 1718.
- Wuilpart M., Rogers A. J., Defosse Y., Mùgret P., Blondel M. Measurement of the spatial distribution of birefringence in optical fibers. – *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.13, No18, 2000. – p.p. 836-838.
- Jasenek J. The use of Polarization Optical Time-Domain Reflectometry for the birefringence distribution measurement along the SM optical fiber.- 12th International Scientific Conference “Radioelectronics 2002” : Bratislava, Slovak Republic, 14.-16.5., 2002.- p.p. 234-238.
- Corsi F., Galtarossa A. Polarization Mode Dispersion Characterization of Single-Mode Optical Fiber Using Backscattering Technique.- *Journal of Lightwave Technology*, v.16, N10, 1998.-
- Wegmuller M., Legre M., Gisin N. Distributed beatlength measurement in single-mode fibers with Optical Frequency-Domain Reflectometry.- *J. Lightwave Tech.*, v.20, 2002.- p.p. 828-835.
- Anderson D. R., Johnson L., Bell F. G. Troubleshooting optical-fiber networks. Understanding and using your optical time-domain reflectometer. – Elsevier Academic press, 2004. – 437 p.
- Бурдин А. В., Бурдин В. А. Рефлектометрический способ измерений параметров ПМД оптических волокон с использованием зондирующих импульсов увеличенной длительности.- *Фотон-Экспресс*, 6 (54), 2006.- с.72-77.
- Bourdine A.V., Burdin V.A. Novel Method of Optical Fibre Beat Length Estimation by POTDR Having Extended Length of Test Pulse.- *Technical Digest AP062248, ODF'06*, Nara, Dec. 6-8, 2006.- 2p.
- Бурдин В.А., Бурдин А.В. Способ определения длины биений оптического волокна на участке линии передачи.- Патент RU 2325037 C2, БИ № 14, 2008.
- Описание оптического рефлектометра HP600A. Руководство пользователя.
- Хуанг Т.С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Дж., Зохар Ш., Ютсун Б.И., Тянь Ш.-Г. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений.- М.: Радио и связь, 1984.- 224 с.
- Каханер Д., Муллер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение.- М.: Мир, 2001.- 575 с.

Таблица 1

№№	Длительность зондирующего импульса, нс	Средний размах периодической составляющей, дБм	Отношение сигнал/помеха, дБм	Динамический диапазон, дБм	Запас по затуханию, дБм	Максимальная длина линии, км
2	30	2.4	1.47	15	13.53	61
3	100	1.9	1.91	19	17.09	77
5	1000	0.47	4.85	27	22.15	100
7	10000	0.08	8.78	34	25.22	114