

# Ограничение точности измерения потерь излучения в одномодовых волокнах: «вмороженные» неоднородности коэффициента обратного рэлеевского рассеяния

В.И.Бусурин, Б.Г.Горшков, Г.Б.Горшков, М.Л.Гринштейн, М.А.Таранов

*С помощью рефлектометрии с временным разрешением при использовании деполаризованного излучения, обладающего широким спектром (10 нм), изучены флуктуации коэффициента обратного рассеяния в телекоммуникационных волокнах Fujikura FutureGuide LWP, Corning ClearCurve XB и Corning SMF-28 ULL на длине волны 1560 нм. Установлено, что указанные флуктуации в условиях наших экспериментов имеют «вмороженный» характер, и типичное среднеквадратичное отклонение в шумоподобных рефлектограммах составляет 0.16 дБ при радиусе корреляции не более 1 м. Этот результат воспроизводился на всех образцах волокон. Изученный экспериментально эффект ограничивает точность измерения затухания в оптических волокнах, в особенности на малых длинах (десятки и сотни метров). Кроме того, он должен приниматься во внимание при организации опорного канала и построении распределенных датчиков физических параметров на основе рэлеевского рассеяния света. Обсуждаются возможные причины возникновения указанных неоднородностей.*

**Ключевые слова:** оптическая рефлектометрия, оптические волокна, рэлеевское рассеяние.

## 1. Введение

Оптическая рефлектометрия является важнейшим методом измерения потерь в оптических волокнах, а также широко применяется при создании распределенных датчиков физических величин. При использовании в качестве регистрируемого параметра интенсивности рэлеевского рассеяния света метрологические свойства приборов тем лучше, чем менее зашумленными являются полученные рефлектограммы. В частности, при измерении потерь (дБ/км) шум не позволяет точно их оценить при малых (десятки и сотни метров) длинах волокон.

При создании распределенных датчиков температуры, основанных на регистрации интенсивности комбинационного (рамановского) рассеяния света, целесообразно в качестве опорного канала использовать рэлеевскую рефлектограмму [1]. Однако наблюдавшаяся нами зашумленность рэлеевской рефлектограммы, не устранимая увеличением времени накопления сигнала, вносит в измеряемое температурное распределение шум, соответствующий температуре не менее 0.5–1.0 К. Поэтому выяснение механизмов такого поведения рэлеевских реф-

лектограмм представляется актуальной и практически важной задачей.

Известны два механизма зашумления рэлеевских рефлектограмм. Первый механизм обусловлен поляризационными эффектами [2, 3]. Обычно источник излучения (как правило, лазерный диод) дает линейно поляризованное излучение, которое при распространении по волокну, не сохраняющему поляризацию, произвольно изменяет свое поляризационное состояние. При рассеянии излучения состояние поляризации не изменяется, и обратнорассеянное излучение через формально поляризационно-нечувствительные элементы (ответвитель или циркулятор) поступает на фотоприемник. Тем не менее эти элементы характеризуются поляризационно-зависимыми потерями, которые, как правило, составляют 0.03–0.2 дБ, что и вызывает поляризационный шум.

Использование различных известных методов деполаризации (как в среднем по спектру, так и с усреднением по времени – скремблирование) позволяет практически устранить поляризационный шум.

Второй механизм – шум когерентности. Он возникает вследствие случайной интерференции рассеянных волн при условии достаточного узкого спектра зондирующего излучения. Наличие шумоподобной составляющей в рефлектограмме лежит в основе фазочувствительной рефлектометрии [4, 5], но является проблемой при создании рефлектометров, предназначенных для измерения потерь в оптических волокнах. Борьба с такого рода шумами сводится либо к расширению спектра источника, либо к сканированию (свиппированию) его центральной частоты в процессе измерений. В принципе и эту причину зашумления можно практически устранить. Однако существует и третий механизм, который обнаружен и исследуется в настоящей работе. Этот механизм обусловлен свойствами самого оптического волокна, а именно неоднородностью его физических свойств по длине.

**В.И.Бусурин.** Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия, 125993 Москва, Волоколамское ш., 4

**Б.Г.Горшков.** Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

**Г.Б.Горшков, М.А.Таранов.** ООО «ПетроФайбер», Россия, Тульская обл., 301664 Новомосковск, Клинский пр., 7; e-mail: gorgb@petrofibre.ru

**М.Л.Гринштейн.** ЗАО «Институт информационных технологий», Белоруссия, 220030 Минск, ул. Октябрьская, 19, к. 5

Поступила в редакцию 24 августа 2016 г., после доработки – 19 октября 2016 г.

## 2. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на установке, показанной на рис.1.

В качестве задающего источника излучения использовался суперлюминесцентный диод SLD 761 (Superlum). Его излучение усиливалось двухступенчатым эрбиевым волоконным усилителем. Длительность импульса, форма которого была близка к гауссовой, составляла 5 нс, ширина спектра после усилителя была равна примерно 10 нм. Центральная длина волны зондирующего излучения составляла 1.56 мкм, пиковая мощность не превышала 1 Вт, частота следования импульсов достигала 200 кГц. После источника излучения в схему был включен волоконный деполаризатор Лио (Phoenix Photonics, модель DPOL-BB-15-SS). Таким образом, были приняты все меры для получения широкополосного деполаризованного излучения. Через циркулятор с паспортным значением поляризационно-зависимых потерь 0.09 дБ излучение после буферной катушки длиной 105 м вводилось в последовательно сваренные оптические волокна Fujikura Future Guide LWP, Corning ClearCurve XB и Corning SMF-28 ULL длиной 100, 90 и 25 м соответственно. Все они имели затухание на длине волны 1.55 мкм в диапазоне 0.17–0.19 дБ/км. Обратнорассеянное излучение через циркулятор и тонкопленочные фильтры, отделяющие рэлеевский сигнал от стоксовой и антистоксовой компонент комбинационного (рамановского) рассеяния (спектры, полученные с помощью анализатора ANDO AQ6319, представлены на рис.2), поступало на лавинные фотодиоды с трансимпедансными усилителями, имеющими полосу 50 МГц. Далее сигнал оцифровывался аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с частотой дискретизации 100 МГц; цифровые данные накапливались в компьютере в течение 10 мин, при этом отношение сигнал/шум достигало для рэлеевского канала  $10^5$ . Пространственное разрешение рефлектометра, определяемое длительностью оптического импульса и полосой пропускания усилителя, составляло примерно 1 м.

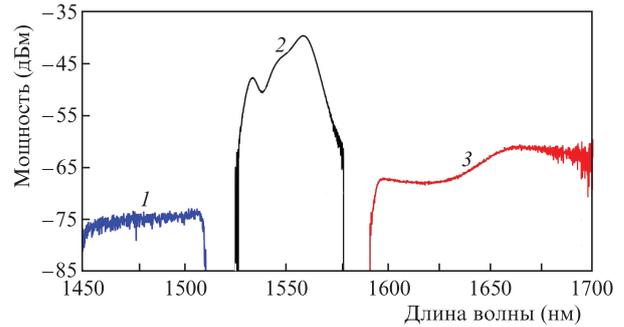


Рис.2. Спектры оптической мощности в полосе 1 нм рамановского антистоксова (1), рэлеевского (2) и рамановского стоксова (3) каналов, полученные по схеме рис.1.

Типичный участок рэлеевских рефлектограмм для отрезка волокна Fujikura Future Guide LWP показан на рис.3. Данные 1 и 2 получены с временным промежутком 12 ч при изменении температуры в помещении на 3 °С. Видно, что шумовая дорожка занимает 1.5% (0.066 дБ), причем эти рефлектограммы по характеру практически совпадают. Рассчитанное по цифровым данным среднеквадратичное отклонение (СКО) для приведенного на

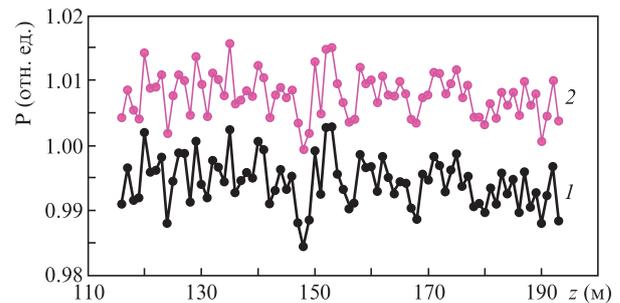


Рис.3. Участок рефлектограмм ( $P$  – мощность рассеянного назад излучения):

1 – исходное измерение; 2 – измерение через 12 ч.

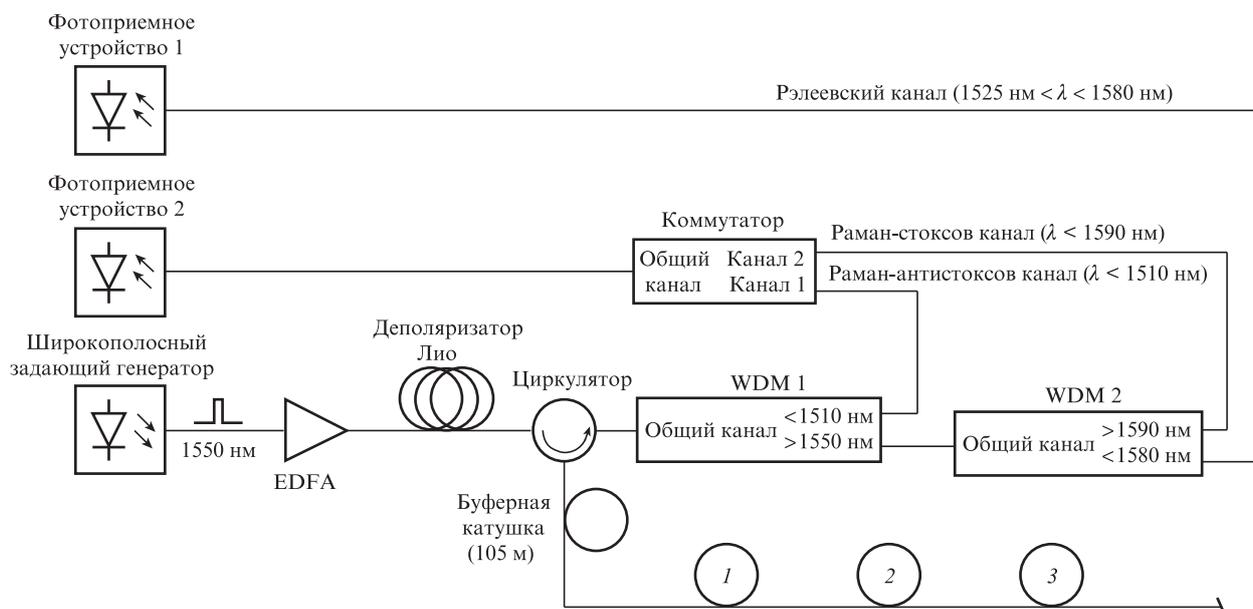


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

EDFA – эрбиевый усилитель; WDM – спектральные мультиплексоры; 1 – катушка с волокном Fujikura FutureGuide-LWP (100 м); 2 – катушка с волокном Corning ClearCurve XB (90 м); 3 – катушка с волокном Corning SMF-28 ULL (25 м).

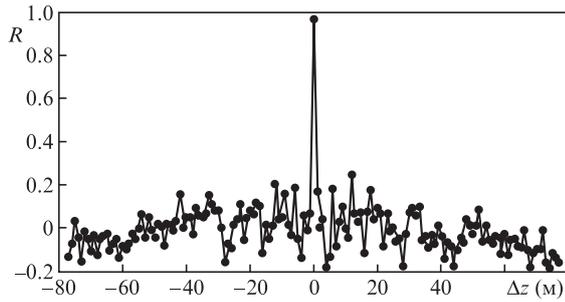


Рис.4. Нормированная взаимно-корреляционная функция  $R$  для рефлектограмм, представленных на рис.3.

рис.3 участка рефлектограмм составило в каждом случае 0.37% (0.016 дБ).

На рис.4 показана нормированная взаимно-корреляционная функция  $R$ , построенная по данным рис.3 и определяемая следующим образом:

$$R(\Delta z) = \frac{\sum_z [P_1(z) - \bar{P}_1(\Delta z)][P_2(z - \Delta z) - \bar{P}_2]}{\sqrt{\sum_z [P_1(z) - \bar{P}_1(\Delta z)]^2 \sum_z [P_2(z - \Delta z) - \bar{P}_2]^2}}, \quad (1)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – исходные сигналы в пределах интересующих нас интервалов по оси  $z$ ;  $\bar{P}_1(\Delta z)$  – среднее значение сигнала  $P_1$  на интервале перекрытия с сигналом  $P_2$ , смещенным вдоль оси  $z$  на  $\Delta z$  относительно  $P_1$ ;  $\bar{P}_2$  – среднее значение сигнала  $P_2$  на всем собственном интервале. Шаг между соседними точками составлял 1 м. Близость нормированного коэффициента корреляции к единице в максимуме говорит о высокой степени совпадения результатов, а отличие от единицы косвенно характеризует уровень помех, обусловленных шумом фотоприемника и шумами когерентности (последние должны проявиться при изменении температурных условий, поскольку когерентный рефлектометр [2, 3] обладает крайне высокой чувствительностью, в том числе по отношению к температурным изменениям). Из рис.4 можно также сделать вывод о радиусе корреляции приведенных реализаций: он не превышает 1 м.

Для того чтобы убедиться, что шум на рис.3 не связан с остаточной поляризацией, один, два или три витка волокна радиусом 30 мм поворачивались на  $90^\circ$  и фиксировались между последовательными замерами подобно тому, как это происходит в волоконном контроллере поляризации с ручным управлением. При этом состояние поляризации излучения в волокне заведомо изменялось, однако никаких обнаружимых изменений в рефлектограммах не возникало. Полученные результаты качественно повторяются и для других типов исследованных волокон.

На основании этих данных можно утверждать, что в современных телекоммуникационных оптических волокнах существуют неоднородности, которые обуславливают вариацию коэффициента обратного рэлеевского рассеяния. Для проверки утверждения, что мы имеем дело с «вмороженными» в волокно неоднородностями, а не с электрическими наводками или иными возможными артефактами, между циркулятором и тестовым волокном добавлен (с помощью сварки) отрезок аналогичного волокна длиной 5.1 м, что соответствует пяти шагам оцифровки. При новом измерении все неоднородности сместились по шкале расстояния на пять отсчетов, т.е. приблизительно на 5 м.

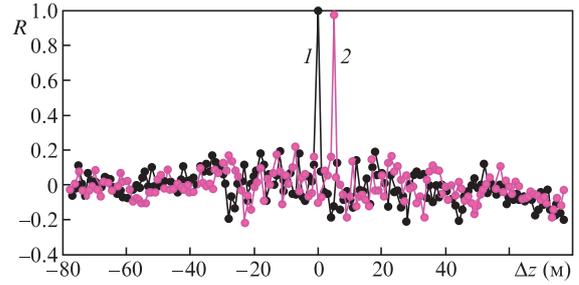


Рис.5. Нормированная автокорреляционная функция до удлинения оптического волокна (1) и взаимно-корреляционная функция после его удлинения на 5.1 м (2).

На рис.5 показаны автокорреляционная (рассчитанная по формуле (1) при  $P_2 \equiv P_1$ ) и взаимно-корреляционная функции между двумя отрезками рефлектограмм, полученных до и после введения указанного дополнительного волокна. Судя по уровню корреляционного пика, имеется практически полное совпадение реализаций со сдвигом на пять отсчетов АЦП, что устраняет все сомнения в роли наводок в зашумлении рефлектограмм. Из автокорреляционной функции (рис.5) также следует, что радиус корреляции неоднородностей не превышает 1 м, т.е. соседние измерения, сделанные с шагом 1 м, статистически независимы.

Дополнительно был проведен эксперимент с присоединением противоположного конца тестируемого волокна к рефлектометру. Ясно, что при наличии «вмороженных» неоднородностей должна наблюдаться корреляция между рефлектограммами при условии обращения координаты по длине волокна. И действительно, такая явная корреляция наблюдается (рис.6). Для ее достижения пришлось подбирать длину соединительного волокна с точностью 10 см.

Для объяснения наблюдающегося эффекта выдвинуты две гипотезы. Первая состоит в том, что в процессе вытяжки волокна его геометрические размеры, прежде всего диаметр сердцевинки, изменяются. В этом случае описанные выше особенности рефлектограмм должны наблюдаться и при регистрации комбинационного (рамановского) рассеяния света. Для проверки этой гипотезы на вход фотоприемника последовательно подавались антистоксова и стоксова компоненты. Результаты для отрезка длиной 16 м показаны на рис.7.

В обоих случаях шумоподобная составляющая обнаруживалась, однако ее амплитуда была значительно меньше (0.02%), чем в случае рэлеевского рассеяния.

Очевидно, что первая гипотеза не нашла подтверждения. В то же время из рис.7 ясно, что по рэлеевской реф-

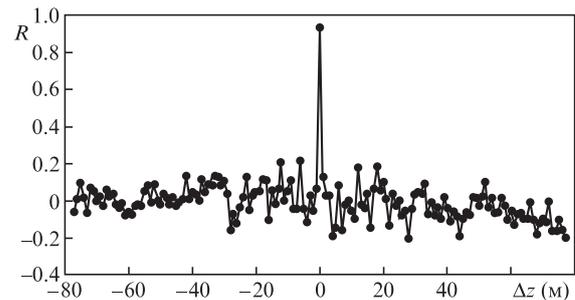


Рис.6. Взаимно-корреляционная функция для двух реализаций, различающихся направлением распространения излучения.

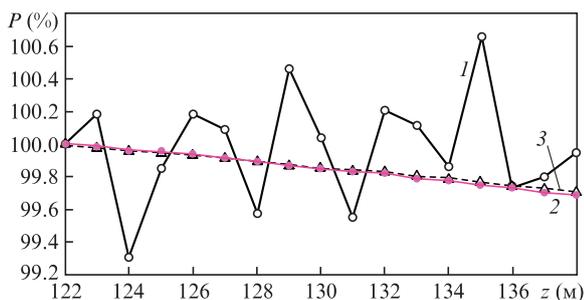


Рис.7. Рефлектограммы для рэлеевского (1), рамановского антистоксова (2) и стоксова (3) каналов на отрезке волокна Fujikura Future Guide LWP длиной 16 м.

лектограмме столь малой длины погонное затухание определить невозможно, тогда как по рамановским рефлектограммам это несложно. Правда, по полученным нами результатам судить об оптических потерях некорректно, поскольку имеющийся у нас усилитель фототока не воспроизводит низкие частоты, что приводит к завышению измеряемых потерь, однако это обстоятельство не влияет на основные выводы работы.

Вторая гипотеза состоит в том, что, поскольку шумоподобное поведение наблюдается только в случае рэлеевского рассеяния, следует искать причину именно в его особенностях. Как известно, интенсивность рэлеевского рассеяния определяется коэффициентом рассеяния [6]

$$\alpha = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta T_f, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения;  $n$  – показатель преломления среды;  $p$  – фотоупругая константа;  $\beta$  – изотермическая сжимаемость среды;  $T_f$  – фиктивная температура, при которой «вмораживаются» термодинамические флуктуации плотности [7]. Наиболее вероятно, что при вытяжке волокна флуктуирует температура заготовки в области формирования волокна (для объяснения полученных результатов достаточно вариации на 2–3 К при средней температуре  $\sim 2200$  К) либо имеются флуктуации показателя преломления плавленого кварца, составляющие  $\sim 0.02\%$ . Разделить вклады этих факторов или оценить воздействие иных эффектов по имеющимся данным не представляется возможным.

Может быть выдвинута и гипотеза о существовании в волокне включений или иных точечных неоднородностей нанометрового размера, которые не оказывают существенного влияния на основные характеристики волокна как среды передачи информации, поскольку их вклад в рост потерь на рассеяние не превышает 1%–2%. Такие неоднородности, в частности, определяют пороги лазерного разрушения большинства оптических материалов [8].

Поскольку отклонений от закона нормального распределения отсчетов нами не обнаружено и они статистически независимы, в реальной рефлектометрии, где используются, как правило, более длинные зондирующие импульсы, следует ожидать уменьшения СКО шумов об-

ратно пропорционально квадратному корню из пространственного разрешения (пропорционального длительности импульсов).

Полученные результаты позволяют сделать следующие практические выводы.

1. Поскольку «вмороженные» флуктуации в волокне существуют, вполне обнаружимы и идентифицируемы, можно говорить о распознавании отдельных волокон по неповторимому (как отпечаток пальца) образу распределения сигнала рэлеевского рассеяния, что может оказаться полезным в некоторых применениях.

2. Для корректного измерения уровня потерь в волокнах малой длины (десятки метров) прием обратнорассеянного излучения целесообразно вести не на длине волны зондирующего излучения, а на смещенной длине волны, соответствующей стоксовой компоненте рамановского (комбинационного) рассеяния. При этом следует иметь в виду, что интенсивность рамановского рассеяния зависит от температуры, и без учета этого обстоятельства можно вести речь об измерении потерь только в условиях одинаковой температуры по всей длине контролируемого волокна.

3. Обнаруженные вариации коэффициента обратного рэлеевского рассеяния, обусловленные наличием неоднородностей структуры, должны учитываться при организации опорного канала и построении распределенных датчиков физических параметров на основе рэлеевского рассеяния света.

### 3. Заключение

Рефлектометрическим способом обнаружены существенные «вмороженные» флуктуации коэффициента рассеяния Рэля в телекоммуникационных одномодовых оптических волокнах. Измерения проводились на длине волны 1560 нм (С-диапазон). При пространственном разрешении рефлектометра 1 м ширина шумовой дорожки для волокна Fujikura FutureGuide LWP составляет 0,066 дБ, среднеквадратичное отклонение равно 0.016 дБ, радиус корреляции функции распределения неоднородностей по длине волокна не превышает 1 м. Указанные значения определяют достижимую точность измерения коэффициента затухания волокон оптическими рефлектометрами и должны учитываться при организации опорного канала и построении распределенных датчиков физических параметров на основе рэлеевского рассеяния света. Обсуждаются возможные причины возникновения указанных неоднородностей.

1. Горшков Б.Г. и др. Патент РФ № 2552222 (2011).
2. Brinkmeyer E., Streckert J. *J. Lightwave Technol.*, **4**, 513 (1986).
3. Авдеев Б.В., Моргунов Д.Ю., Трещиков В.Н. *Фотон-экспресс*, № 2, 25 (2004).
4. Горшков Б.Г., Парамонов В.М., Курков А.С., Кулаков А.Т. *Lightwave Russian Edition*, № 4, 47 (2005).
5. Горшков Б.Г., Парамонов В.М., Курков А.С., Кулаков А.Т., Зазирный М.В. *Квантовая электроника*, **36**, 963 (2006).
6. Pinnow D.A. et. al. *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 527 (1973).
7. Sakaguchi S. et. al. *J. Non-Cryst. Sol.*, **220**, 178 (1997).
8. Маненков А.А., Прохоров А.М. *УФН*, **148**, 179 (1986).