

# Когерентный рефлектометр с двухволоконным интерферометром рассеянного излучения

В.С.Вдовенко, Б.Г.Горшков, М.В.Зазирный, А.Т.Кулаков, А.С.Курков, В.М.Парамонов

*Предложена и реализована новая схема оптоволоконного фазочувствительного когерентного рефлектометра, позволяющая избежать явления замирания сигналов. Эффект достигается за счет использования двухволоконного интерферометра рассеянного излучения.*

**Ключевые слова:** когерентный оптический рефлектометр, двухволоконный интерферометр, рассеянное излучение, замирание сигналов.

## 1. Введение

Первые предложения по использованию когерентных оптических рефлектометров как основы построения распределенных датчиков разнообразных внешних воздействий относятся к началу 1990-х годов [1, 2], однако лишь в последние годы в связи с развитием техники оптических усилителей на активных волокнах подобные системы достигли характеристик, привлекательных для использования, например, в охранной сигнализации [3, 4]. Наибольший практический интерес представляют системы, применяющие временное разделение каналов (OTDR) и позволяющие технически просто получить пространственное разрешение в несколько метров при длине чувствительного элемента, ограниченной потерями излучения в волокне и составляющей десятки километров. Важная особенность когерентного OTDR-рефлектометра состоит в том, что каждая точка рефлектограммы соответствует ограниченному длительностью импульса участку волокна, а перекрестные помехи между соседними информационными каналами могут не приниматься во внимание. Численное моделирование, однако, показывает, что точечное малое воздействие на чувствительный элемент может приводить к появлению как малоискаженных, так и подверженных значительным нелинейным искажениям выходных сигналов. Это определяется положением рабочей точки виртуального интерферометра на его функции преобразования (модуляционной характеристике). Сама по себе функция преобразования имеет гармонический характер, однако коэффициент преобразования на линейном участке имеет случайное значение, вплоть до нулевого. Таким образом, на чувствительном элементе возникают нечувствительные участки (замирание сигнала), что нежелательно для систем охраны. Ес-

тественным способом борьбы с этим явлением является перестройка частоты лазерного источника, однако это усложняет как аппаратуру, так и алгоритмы выделения воздействия.

В настоящей работе предлагается подключить к когерентному рефлектометру двухволоконный интерферометр рассеянного излучения. При этом измеряемое воздействие на одно из оптических волокон должно вызвать фазовый сдвиг во всех последующих по длине измерительных каналах. Даже если отклик от точки воздействия окажется нулевым, в большей части последующих каналов воздействие будет обнаружено. При этом координата воздействия может быть определена с ошибкой в один элемент разрешения, что несущественно для большинства применений.

## 2. Модель формирования рассеянного сигнала

Для описания сигналов рассеяния когерентного импульсного излучения построена математическая модель, в которой оптическое волокно представлено совокупностью равномерно распределенных по оси  $z$  рассеивающих центров с координатами  $z_n$ . Поляризационные эффекты не рассматривались. Для получения случайных фаз рассеянного света введены малые (соизмеримые с длиной волны) случайные вариации положения этих центров. Поле, рассеянное одним волокном в обратном направлении, описывается комплексной амплитудой

$$E_j = \sum_{n=j}^{j+k} A_n e^{-2i\beta z_n}, \quad (1)$$

где  $A_n$  – амплитуда волны, рассеянной  $n$ -м центром;  $\beta$  – продольная константа распространения;  $j$  – номер точки в рефлектограмме;  $k$  – протяженность зондирующего импульса в пространстве, описываемая числом одновременно рассеивающих точек.

Интенсивность обратно рассеянного излучения

$$I_j = E_j E_j^*. \quad (2)$$

Поле, рассеянное вторым волокном, в отсутствие внешнего воздействия на фазу излучения описывается

В.С.Вдовенко, Б.Г.Горшков, А.С.Курков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kurkov@kapella.gpi.ru

М.В.Зазирный, А.Т.Кулаков. ООО «Петролайт», Россия, 109028 Москва, Подкопаевский пер., 4, стр.1

В.М.Парамонов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

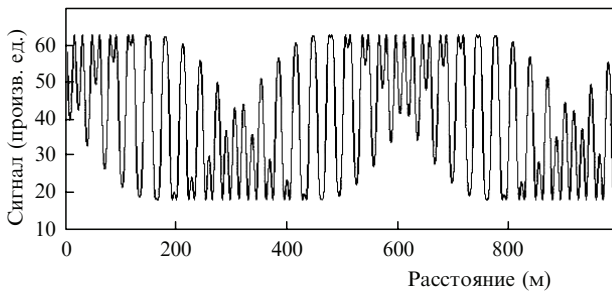


Рис.1. Отклик интерферометра на воздействие, описываемое функцией (6).

комплексной амплитудой

$$E'_j = \sum_{n=j}^{j+k} A_n e^{-2i\beta z'_n}, \quad (3)$$

где  $z'_n$  – координаты рассеивающих центров во втором волокне. Соответственно интенсивность интерференционной картины при сложении волн от двух волокон

$$I_j = (E_j + E'_j)(E_j + E'_j)^*. \quad (4)$$

Полученное выражение достаточно наглядно описывает изрезанную рефлектограмму, характерную для когерентного импульсного рефлектометра [3, 4].

Для моделирования точечного фазового воздействия на второе волокно начиная с точки воздействия  $n > n_0$  все координаты рассеивающих центров в (3) и (4) сдвигаются по оси  $z$  на  $\Delta z$ :

$$E'_j = \sum_{n=j}^{j+k} A_n e^{-2i\beta(z'_n + \Delta z)}. \quad (5)$$

На рис.1 показан отклик интерферометра рассеянного света  $I_m$  в канале дальности с точкой  $j > n_0$  на сумму воздействий, одно из которых линейное, медленно изменяющееся (имитирует температурный уход интерферометра), а второе – гармоническое с амплитудой, равной четверти длины волны в волокне  $\lambda$ :

$$\Delta z_m = km + \frac{\lambda}{4} \cos \Omega m. \quad (6)$$

Здесь  $m$  – номер реализации (рефлектограммы), имеющий при постоянной частоте зондирующих импульсов смысл времени;  $k$  и  $\Omega$  – коэффициенты, описывающие скорость изменения фазового набег от рефлектограммы к рефлектограмме.

Аналогичные сигналы получают во всех каналах дальности, последующих за точкой воздействия. Тем самым исключается ситуация, когда воздействие попадает на «нечувствительный» канал и не будет зарегистрировано.

### 3. Эксперимент

Схема экспериментальной установки показана на рис.2. Когерентный рефлектометр [4] включает в себя импульсный полупроводниковый лазер 1, волоконный усилитель 2, волоконный циркулятор 3 и p-i-n-фотодиод на InGaAs 4. Длина волны излучения лазера 1550 нм, длительность импульса по полувывсоте 100 нс, частота следования 1 кГц, мощность импульса 1 Вт. Излучение после рефлектометра делится разветвителем 5 на равные части и поступает в катушки одномодового волокна SMF-28 длиной 4.5 км (6) и 19 км (8). Рассеянное в обратном направлении излучение интерферирует на разветвителе 5 и через циркулятор 3 поступает на фотоприемник рефлектометра 4. В одно из плеч образованного интерферометра вставлен пьезокерамический фазовый модулятор 7, подключенный к звуковому генератору. Сигнал с фотоприемника оцифровывался с помощью платы аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 20 МГц. Для анализа сигналов была разработана соответствующая графическая оболочка, позволяющая в режиме осциллографа наблюдать и записывать как сами сигналы, так и их временные срезы в заданных точках по длине рефлектограммы (в разных каналах дальности).

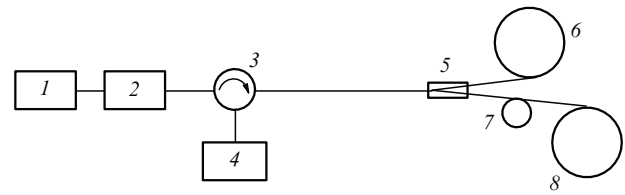


Рис.2. Схема экспериментальной установки.

Характерный принимаемый фотодиодом исходный сигнал показан на рис.3 (одна рефлектограмма). Качественного различия сигналов, полученных с расстояния до 4.5 км, когда интерферируют рассеянные волны из двух плеч, и после отметки 4.5 км, не наблюдается (кроме естественного падения амплитуды сигналов). Включение фазовой модуляции на частоте 50 Гц никак не сказывается на регистрируемых после отметки 4.5 км сигналах в соответствии с результатами [4].

И наоборот, на отрезке от фазового модулятора до точки 4.5 км во всех каналах дальности наблюдаются изменения сигнала, происхождение которых связано с пятидесятигерцевой модуляцией. Если рассматривать временной срез в одном канале дальности от реализации к реализации, то такой выходной сигнал имеет различную амплитуду и форму и наложен на медленно изменяющийся сигнал, обусловленный температурным дрейфом двухплечевого интерферометра в условиях пространственного разнесения катушек в лаборатории. Временной срез сигнала для координаты 420 м от циркулятора показан на рис.4; сигнал соответствует фазовой модуляции с глубиной  $\pm 90^\circ$ , причем из-за дрейфа рабочая точка плавно перемещается с линейного участка характеристики, когда гармонический сигнал воспроизводится на основной частоте 50 Гц, на нелинейный участок, когда

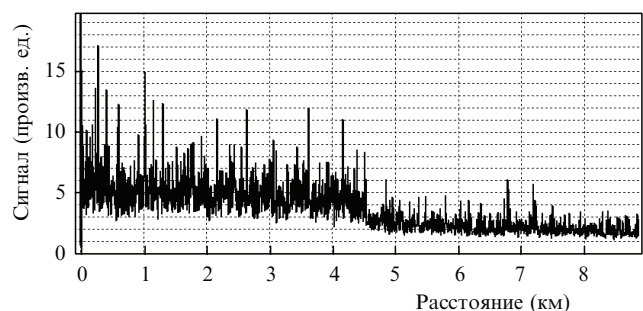


Рис.3. Сигнал обратного рассеяния.

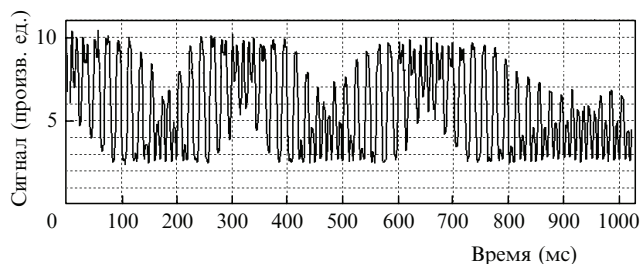


Рис.4. Временной срез сигнала в канале дальности 420 м при фазовой модуляции на частоте 50 Гц.

возникает вторая гармоника. Очевидно, что экспериментально полученный сигнал принципиально не отличается от модельного, приведенного на рис.1. Наблюдая подобные сигналы, можно прийти к выводу, что параметры воздействия (частота, фаза, амплитуда, место воздействия) с помощью соответствующих алгоритмов, которые в настоящей работе не обсуждаются, могут быть с достаточной достоверностью установлены. Более того, если число воздействий невелико, то путем совместной обработки информации от множества последующих каналов дальности можно получить более точную информацию о воздействии, чем при использовании одноволоконного когерентного рефлектометра [4]. Кроме того, при большом числе каналов дальности хотя бы в одном из них можно наблюдать малоискаженные сигналы сложной формы, в том числе от ударного воздействия. Можно предложить различные критерии выбора неискаженного сигнала, основанные, к примеру, на оценке присутствия высших гармоник.

Недостатком обсуждаемого когерентного двухплечового интерферометра (как основы для создания системы охранной сигнализации) является упомянутый выше температурный дрейф, который ограничивает длину охраняемого участка. Для иллюстрации сказанного на рис.5 приведен экспериментально полученный сигнал с канала дальности, соответствующего отметке 4200 м при выключенном фазовом модуляторе, обусловленный только температурным дрейфом. На его фоне было бы крайне сложно выделить полезный сигнал, если бы он присутствовал.

Здесь невозможно указать практические цифры максимальной длины волоконно-оптического чувствитель-

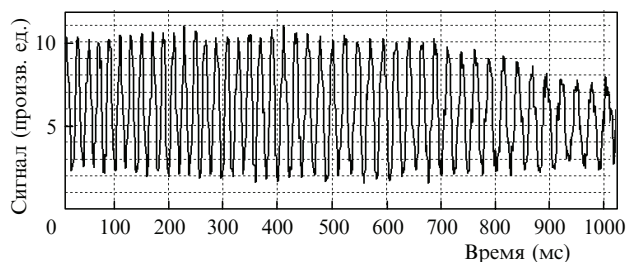


Рис.5. Временной срез сигнала в канале дальности 4200 м в отсутствие фазовой модуляции.

ного элемента, поскольку они в значительной степени зависят от условий размещения оптического кабеля. Так, мы считаем, что размещение двух волокон в одном кабеле, заглубленном в грунт на 0.5–1 м, позволит работать с многокилометровыми длинами. Добавим к сказанному, что при ограничении длины защищаемого участка единицами километров частоту зондирующих импульсов можно увеличить до десятков килогерц и детектировать воздействия в более высокочастотном диапазоне, чем это сделано в настоящей работе. В этом случае температурный дрейф не окажет столь серьезного ограничивающего влияния на допустимую длину чувствительного элемента.

Таким образом, предложена новая схема фазочувствительного когерентного рефлектометра с двумя чувствительными волокнами, позволяющая избежать явления замирания сигналов и построить распределенную интерференционную сенсорную систему, максимально соответствующую требованиям, предъявляемым к средствам охраны периметров.

Авторы благодарны Г.Б.Горшкову и А.И.Качурину за помощь в выполнении экспериментов и численного моделирования.

1. Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V., Juskaitis R. *Opt.Lett.*, **17**, 1623 (1992).
2. Taylor H.F., Lee C.E. *Apparatus and methods for fiber optic intrusion sensing*. US Patent, No 5194847, 1993.
3. Горшков Б.Г., Парамонов В.М., Курков А.С., Кулаков А.Т. *Lightwave Rus. Edit.*, № 4, 47 (2005).
4. Горшков Б.Г., Парамонов В.М., Курков А.С., Кулаков А.Т., Зафирный М.В. *Квантовая электроника*, **36**, 963 (2006).