

Распределенный датчик внешнего воздействия на основе фазочувствительного волоконного рефлектометра

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

Разработан макет датчика внешнего воздействия на волоконно-оптический кабель, используемого в охранных системах протяженного периметра с локализацией места воздействия. Принцип обнаружения базируется на использовании фазочувствительной рефлектометрии с применением узкополосного импульсного источника излучения. Макет датчика обладает высокой чувствительностью, присущей интерференционным датчикам. Максимальная дальность обнаружения составляет 35 км, пространственное разрешение – 5 м.

Ключевые слова: волоконно-оптический кабель, охранные системы, фазочувствительная рефлектометрия.

1. Введение

Импульсные волоконные рефлектометры, или OTDR-устройства, являются одним из самых распространенных типов приборов для измерения параметров волоконного световода. Принцип их действия достаточно прост. В волоконный световод через ответвитель вводится световой импульс, при распространении которого часть излучения вследствие рэлеевского рассеяния рассеивается в обратном направлении. Измеряя через ответвитель временную зависимость доли мощности излучения, распространяющегося назад, можно легко определить закон изменения мощности по длине световода. Это позволяет измерять распределение потерь по длине световода, в том числе локализовать возможные дефекты. Выделяя из спектра рассеянного излучения отдельные спектральные компоненты, например спонтанное комбинационное рассеяние, можно придать рефлектометру новое качество – использовать его как распределенный датчик температуры [1].

Обычно источником излучения в рефлектометрии служат полупроводниковые лазеры, излучающие на многих продольных модах. При этом ширина спектра излучения может составлять несколько нанометров, или несколько сот гигагерц. В силу этого длина когерентности излучения лазера составляет ~ 1 мм, что практически исключает появление интерференционных эффектов при распространении излучения по световоду. Увеличение длины когерентности приводит к появлению характерных шумов рефлектограммы, ухудшающих метрологические характеристики приборов. В то же время современные технологии позволяют получать одночастотный режим генерации лазера, и при этом ширина линии излучения составляет $10^5 - 10^6$ Гц, что соответствует длине коге-

рентности в десятки и сотни метров. В этом случае следует ожидать проявления хаотической интерференции излучения, рассеянного разными участками световода, что открывает новые возможности для применения рефлектометра. Так, в работах [2, 3] предлагается использовать такие рефлектометры в качестве датчика внешних механических воздействий. К несомненным достоинствам устройства относится высокая чувствительность, обусловленная интерференционным механизмом отклика, а также возможность пространственной локализации воздействия за счет рефлектометрического принципа измерения, что позволяет надеяться на его широкое применение в системах охранной сигнализации. Однако в работах [2, 3] не удалось получить ни удовлетворительного контраста интерференционного сигнала, ни достаточно хорошего пространственного разрешения.

Целью настоящей работы было создание импульсного источника когерентного излучения, по своим спектральным, временным и энергетическим характеристикам удовлетворяющего требованиям к источнику, применяемому в распределенном волоконно-оптическом датчике механических возмущений, а также демонстрация возможностей такого датчика на примере разработанного макета.

2. Импульсный узкополосный источник

Одним из ключевых элементов фазочувствительного рефлектометра является импульсный источник с высокой степенью когерентности. В упомянутых выше работах в качестве такого источника использовался одночастотный волоконный эрбиевый лазер с внешним модулятором. Подобный лазер позволяет получать генерацию с шириной линии порядка 10 кГц, однако интегральный электрооптический модулятор, использованный в [2, 3] для получения импульсного сигнала, характеризовался невысоким контрастом (20 дБ). Это привело к появлению значительной фоновой засветки, накапливающейся в промежутке между импульсами, в результате чего видимость интерференционной картины в рефлектометре оказалась невысокой.

В настоящей работе в качестве узкополосного источника использовался излучатель на основе полупроводни-

Б.Г.Горшков. Военно-воздушная инженерная академия им. профессора Н.Е.Жуковского, Россия, 125167 Москва, ул. Планетная, 3

В.М.Парамонов, А.С.Курков. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kurkov@fo.gpi.ru

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

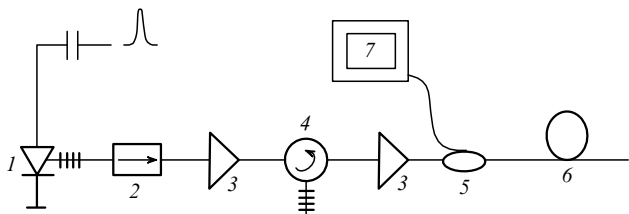


Рис.1. Упрощенная схема макета датчика:
 1 – полупроводниковый лазер с внешней брэгговской решеткой; 2 – оптический изолятор; 3 – волоконный эрбиевый усилитель; 4 – волоконный циркулятор с брэгговской решеткой; 5 – ответвитель; 6 – волоконно-оптическая линия; 7 – блок регистрации обработки рассеянного излучения.

кового лазера с селекцией продольных мод, которая достигалась при помощи фотоиндуцированной волоконной брэгговской решетки [4]. Упрощенная схема источника представлена на рис.1. Спектр его излучения в непрерывном режиме исследовался с помощью волоконного сканирующего интерферометра с областью свободной дисперсии 40 МГц. Ширина спектра излучения в непрерывном режиме по оценкам составила 1.6 МГц. Для получения импульсного режима генерации лазера была разработана и изготовлена схема, основанная на пропускании через лазер импульса тока при наличии малого постоянного смещения. Схема включала в себя термостат с возможностью регулировки температуры для подстройки спектра пропускания резонатора Фабри–Перо полупроводникового кристалла, обеспечивающей совмещение моды резонатора с максимумом спектра отражения брэгговской решетки. Кроме того, были предусмотрена регулировка постоянного смещения и амплитуды импульсного тока. Особое внимание обращалось на форму импульса тока. Для предотвращения искажения спектра генерации подбирались режимы накачки, обеспечивающие гладкую форму импульса, что позволило получить гладкий колоколообразный импульс общей длительностью ~ 50 нс. Период следования импульсов мог варьироваться с изменением частоты управляющего сигнала, поданного на полупроводниковый лазер, и обычно составлял 1 мс.

Выходная импульсная мощность полупроводникового источника была равна около 1 мВт, что недостаточно для рефлектометрии. Поэтому в схему устройства был включен двухкаскадный эрбиевый волоконный усилитель, позволяющий эффективно усиливать оптический сигнал в области 1.53–1.6 мкм. Для развязки гибридно-

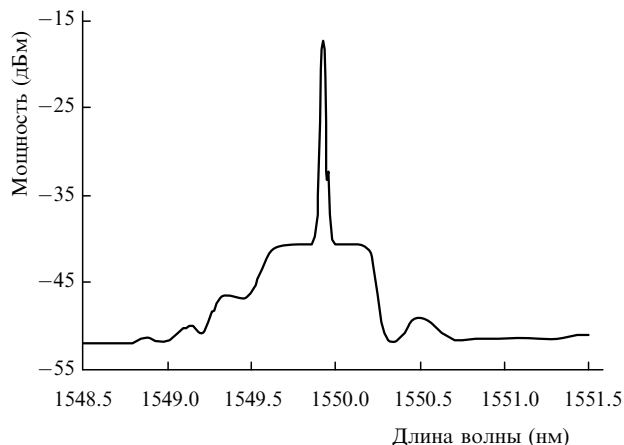


Рис.2. Спектр усиленного излучения импульсного гибридного источника.

го источника и усилителя использовался двухступенчатый оптический изолятор. Суммарный коэффициент усиления двух каскадов составил около 30 дБ. Для фильтрации усиленной спонтанной люминесценции между усилительными каскадами устанавливался волоконный циркулятор с брэгговской решеткой, резонанс которой совпадал с длиной волны отражения стабилизирующей решетки гибридного источника. На рис.2 представлен выходной спектр усиленного импульсного сигнала, измеренный с разрешением 0.01 нм. Ширина спектра излучения по уровню –3 дБ не превышает разрешения использованного спектроанализатора, выходная импульсная мощность равна около 1 Вт.

3. Измерение когерентного рассеяния

В качестве тестируемой волоконно-оптической линии использовался отрезок стандартного одномодового волоконного световода SMF-28 длиной 50 км. Регистрация сигнала рассеяния проводилась с использованием 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя с частотой оцифровки 20 МГц. На рис.3 показана единичная рефлектограмма с первых трех километров длины световода. Наличие практически 100 %-ной шумоподобной модуляции свидетельствует о том, что ширина спектра лазерного источника определяется длительностью импульса, т.е. источник является одночастотным. Сигнал медленно затухает по длине световода, что согласуется с пас-

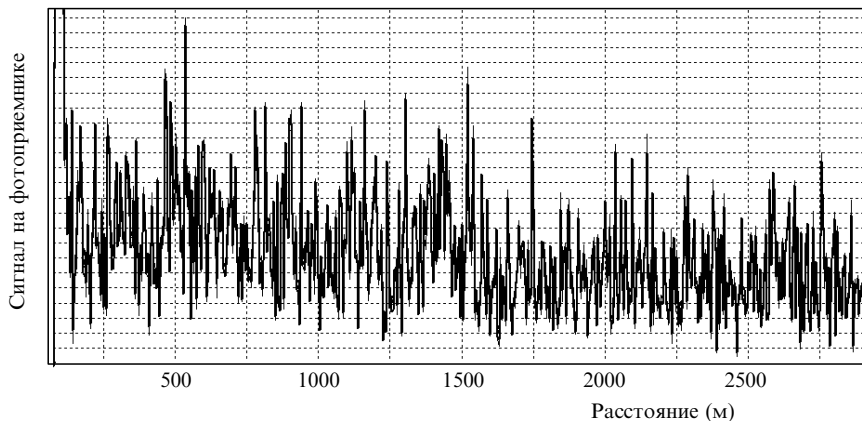


Рис.3. Рефлектограмма сигнала рассеяния с первых трех километров световода длиной 50 км.

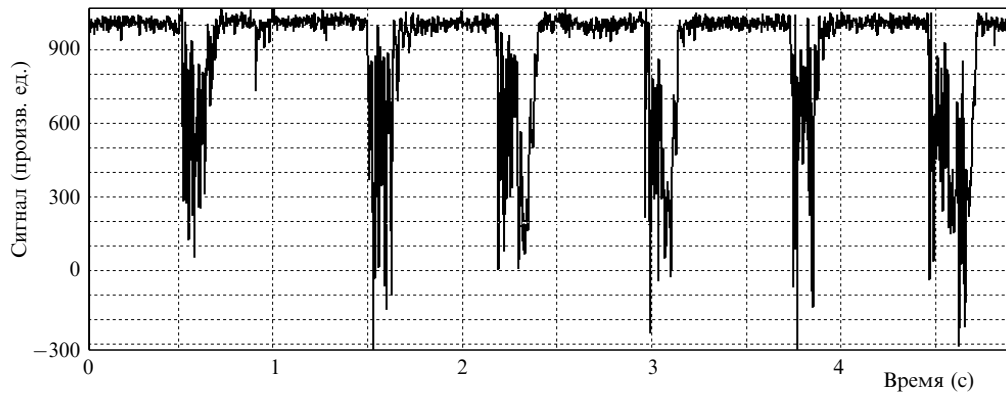


Рис.4. Сигнал (развертка по времени) механических возмущений, вызванных земляными работами, проводимыми на расстоянии 2 м от оптического кабеля.

портным затуханием 0.19 дБ/км. Следует отметить, что наблюдаемая картина не является стабильной во времени. За время порядка секунд происходит чередование «темных» и «светлых» полос, обусловленное влиянием медленного изменения температуры световода и дрейфа частоты источника. В то же время локальные акустические, механические, тепловые и прочие воздействия приводят к существенно более быстрой модуляции интенсивности излучения, рассеянного данным отрезком световода. Это позволяет, зная задержку между началом зондирующего импульса и моментом возникновения быстрой модуляции, определять координаты области воздействия.

Для определения координаты внешнего воздействия (механического или термического) весь волоконный тракт разбивался на независимые каналы (до 7000 каналов), в каждом из которых проводился отсчет амплитуды сигнала с заданной дискретизацией в миллисекундном диапазоне и осуществлялась цифровая обработка полученной информации. Критерием наличия внешнего воздействия являлось существенное изменение амплитуды сигнала в пространственном канале за временной интервал 1 – 50 мс.

Пространственное разрешение датчика определяется длительностью светового импульса и составляет около 5 м. Дальность обнаружения воздействия ограничивается затуханием оптического сигнала. Следует отметить, что повышение мощности источника не приводит к увеличению дальности из-за возникновения нелинейных эффектов. Так, параметрические эффекты вызывают перекачку сигнального излучения в другие спектральные компоненты, что эквивалентно появлению нелинейных оптических потерь на заданной длине волны. Оцененная экспериментально максимальная дальность обнаружения воздействия на световод составила 35 км.

4. Исследование макета датчика

Для испытания работоспособности разработанного макета датчика в качестве чувствительного элемента использовался оптический кабель ОКЛ-0,22. Кабель бронирован металлической лентой и имеет внешний диаметр 14 мм. Отрезок кабеля длиной 3 км закапывался в грунт на глубину 0.5 м. На рис. 4 показан сигнал от измерительного отрезка, находящегося на расстоянии 2800 м. На расстоянии 2 м от закопанного кабеля почва раскапывалась вручную штыковой лопатой. Сигнал с соседних участков (2795 и 2805 м) признаков механического

воздействия на грунт практически не содержал. Отсюда можно сделать вывод о том, что пространственное разрешение датчика равно 5 м. Наблюдаемый уровень шумов позволяет оценить интерференционную чувствительность датчика в 0.1 рад. Реализованы простейшие алгоритмы, позволяющие автоматически определять место воздействия, превышающего заданный порог чувствительности. Система позволяет детектировать шаги человека по поверхности земли над кабелем.

Интересный результат был получен при помещении кабеля на опору линии электропередачи. Обнаружено, что легко определяется не только попытка человека влезть на опору, но и собственные ее колебания. Это позволяет предположить возможность использования рефлектометра не только в охранных системах, но и для определения колебаний зданий и сооружений.

5. Заключение

Реализован одночастотный импульсный источник излучения с длительностью импульса 50 нс и выходной импульсной мощностью 1 Вт. Использование данного источника в схеме рефлектометра позволило наблюдать интерференционный сигнал с высоким контрастом в рассеянном назад излучении. На основе рефлектометра разработан макет системы обнаружения внешнего воздействия на оптоволоконный кабель для охранных систем протяженного периметра. Макет имеет следующие параметры:

- пространственное разрешение 5 м;
- дальность обнаружения воздействия без применения усилителя 35 км;
- число независимых пространственных каналов измерения до 7000;
- временное разрешение в каждом канале 1 мс;
- чувствительность интерференционная, ~ 0.1 рад.

Авторы выражают благодарность В.С.Вдовенко за разработку компьютерных программ регистрации и обработки данных. Работа проводилась в рамках контракта с компанией «Петролайт» (Россия).

1. Горшков Б.Г., Горбатов И.Е., Данилейко Ю.К., Сидорин А.В. *Квантовая электроника*, **17**, 345 (1990).
2. Choi K.N., Juarez J.C., Taylor H.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5090**, 134 (2003).
3. Juarez J.C., Taylor H.F. *Proc. Optical Fiber Commun. Conf. OFC'2005* (New York: OSA, 2005, p. OThX 5).
4. Archambault J.-L., Grubb S.G. *J. Lightwave Technol.*, **15** (8), 1378 (1997).