

# Волоконно-оптическая измерительная сеть на основе квазираспределенных амплитудных датчиков для регистрации деформационных воздействий\*

Ю.Н.Кульчин, В.А.Колчинский, О.Т.Каменев, Ю.С.Петров

*Предложена новая конструкция чувствительного элемента волоконно-оптического датчика деформаций нажимного действия. На основе разработанных чувствительных элементов создана распределенная волоконно-оптическая измерительная сеть, предназначенная для определения места воздействия и массы воздействующего объекта. Показано, что применение нейросетевых методов обработки информации обеспечивает возможность объединения в единую сеть квазираспределенных амплитудных датчиков различного типа. Представлены результаты экспериментального исследования макета волоконно-оптической измерительной сети, демонстрирующие успешное восстановление траектории движущегося объекта с пространственным разрешением 8 см, а также массы воздействующего объекта в диапазоне 1–10 кг при чувствительности 0,043 кг<sup>-1</sup>.*

**Ключевые слова:** квазираспределенные амплитудные датчики, распределенная волоконно-оптическая измерительная сеть.

## 1. Введение

Наметившийся в последнее десятилетие переход от дискретных волоконно-оптических датчиков (ВОД) физических величин к протяженным распределенным и квазираспределенным ВОД позволил начать разработку распределенных волоконно-оптических измерительных сетей (РВОИС) [1]. Для этой цели успешно применяются томографические методы сбора и обработки информации, обеспечивающие существенное уменьшение требуемого количества измерительных линий в сети [2, 3]. Возникающие при этом проблемы, связанные с обработкой томографических данных, успешно решаются с использованием нейросетевых технологий [1]. Тем не менее необходимостью мониторинга крупномасштабных природных и техногенных объектов требует создания РВОИС большой размерности, содержащих значительное количество протяженных ВОД, а следовательно, дальнейшего упрощения как самой структуры измерительной сети, так и используемых в ней ВОД.

При мониторинге состояния крупномасштабных объектов, таких как здания и сооружения, наибольший интерес представляет регистрация деформационных воздействий [4], для которой наиболее перспективными с точки зрения построения крупномасштабных РВОИС представляются квазираспределенные амплитудные ВОД, основанные либо на непосредственной регистрации потерь мощности излучения, либо на применении импульсно-временной оптической рефлектометрии (OTDR) [5].

\* Доложена на конф. «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, июнь 2012 г.

Ю.Н.Кульчин, В.А.Колчинский, О.Т.Каменев, Ю.С.Петров. Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: vladko.88@mail.ru, okamenev@mail.ru, oskani@mail.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2012 г., после доработки 11 января 2013 г.

Основными недостатками, ограничивающими применение амплитудных ВОД, являются их низкая точность и чувствительность. При создании РВОИС большой размерности эти недостатки усугубляются. Однако применение нейросетевых технологий обеспечивает возможность получения достоверной информации об исследуемом объекте даже при наличии помех и недостаточной точности поступающих от измерительной сети данных [6]. Кроме того, как будет показано ниже, интеллектуализация измерительных систем позволяет объединить в единую сеть амплитудные ВОД различного типа, что обеспечивает дальнейшее уменьшение требуемого количества датчиков.

Цель настоящей работы – создание распределенной волоконно-оптической измерительной сети, предназначенной для выявления места воздействия и массы воздействующего объекта. Эта сеть должна объединить квазираспределенные амплитудные ВОД, основанные на непосредственной регистрации потерь мощности излучения, и квазираспределенный OTDR-датчик.

## 2. Квазираспределенный амплитудный ВОД

Как известно, для повышения чувствительности амплитудных ВОД к деформационным воздействиям используются специальные чувствительные элементы (ЧЭ), размещенные вдоль волоконного световода в заданных точках. Такие ВОД основаны на квазираспределенных измерениях и называются квазираспределенными [5]. В настоящее время для квазираспределенных измерений таких параметров как сила, давление и смещение успешно применяются OTDR-датчики на основе периодических микроизгибов [7]. Однако применение подобных ЧЭ в квазираспределенных амплитудных ВОД, использующих непосредственную регистрацию потерь мощности излучения, представляется нецелесообразным. В нашей работе предложена упрощенная конструкция чувствительного элемента ВОД деформаций нажимного действия. Показано, что данный ЧЭ также может быть успешно применен для создания квазираспределенного OTDR-датчика.

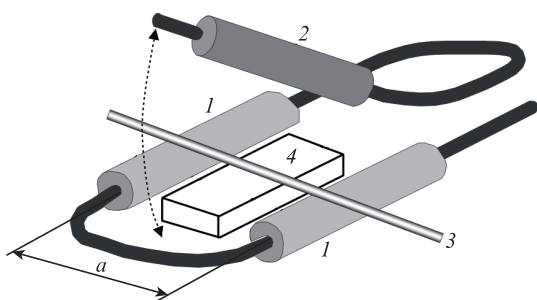


Рис.1. Чувствительный элемент квазираспределенного амплитудного ВОД:

1 – опорные стержни; 2 – давящий стержень; 3 – волоконный световод; 4 – упругая площадка.

В качестве ЧЭ квазираспределенного ВОД предлагается использовать специальное зажимное приспособление, показанное на рис. 1. При внешнем воздействии давящий стержень изгибает волоконный световод, размещенный на опорных стержнях, в результате чего изменяется мощность распространяющегося в световоде оптического излучения.

В рассматриваемой измерительной сети применяются квазираспределенные ВОД двух типов. В датчике первого типа изменение мощности распространяющегося по многомодовому световоду излучения регистрируется фотоприемником непосредственно на выходе. Датчик второго типа основан на применении импульсно-временной оптической рефлектометрии (OTDR-датчик) [8], в нем потери мощности распространяющегося в одномодовом световоде отраженного оптического излучения регистрируются оптическим рефлектометром.

Как показали результаты экспериментальных исследований чувствительного элемента, для квазираспределенного ВОД первого типа чувствительность возрастает при уменьшении расстояния  $a$  между опорными стержнями, однако при некотором критическом значении  $a$  происходят необратимые изменения структуры световода. Оптимальные параметры конструкции при использовании стандартного многомодового световода таковы: диаметр стержней 2 мм, расстояние между опорными стержнями 8 мм.

Для квазираспределенного OTDR-датчика оптимальное расстояние между опорными стержнями составляет 15 мм. На рис.2 представлены рефлектограммы, соответствующие одинаковому воздействию на ЧЭ при разных расстояниях  $a$  между опорными стержнями. Видно, что с уменьшением  $a$  внешнее воздействие вызывает большие потери мощности излучения, препятствующие регистрации сигналов от последующих ЧЭ измерительной линии (рис.2,*a*), а при его увеличении падает чувствительность (рис.2,*б*).

### 3. Волоконно-оптическая измерительная сеть на основе квазираспределенных амплитудных датчиков

Описываемая волоконно-оптическая измерительная сеть состоит из набора квазираспределенных амплитудных ВОД, непосредственно регистрирующих потери мощности излучения, и одного квазираспределенного OTDR-датчика. Датчики первого типа применяются для изме-

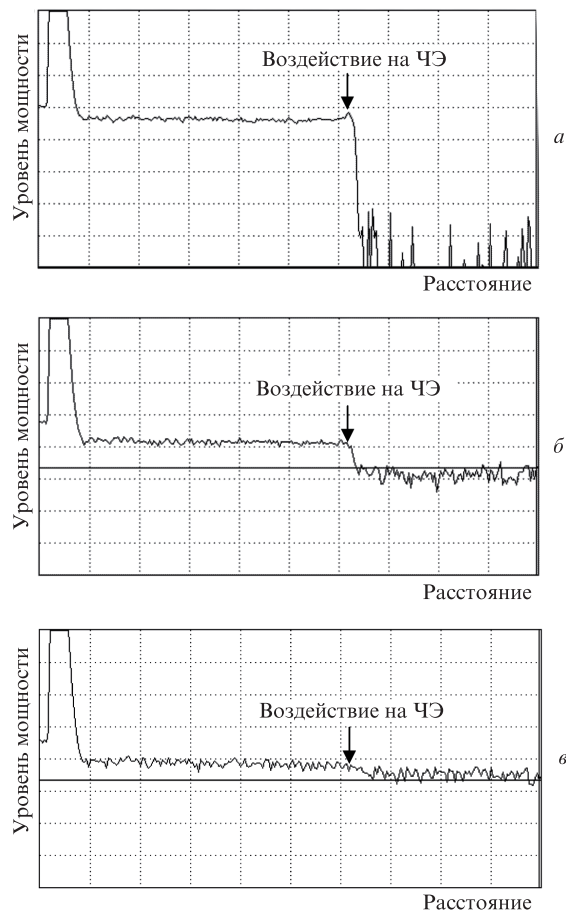


Рис.2. Рефлектограммы, отображающие результат внешнего деформационного воздействия на чувствительный элемент квазираспределенного ВОД при  $a = 10$  (*a*), 15 (*б*) и 20 мм (*в*). Масштаб 12.6 м/дел.

рения массы воздействующего на сеть объекта, а датчик второго типа – для определения места воздействия. Описанные выше чувствительные элементы размещены на световодах датчиков обоих типов. Расстояние между ЧЭ в датчике первого типа определяется площадью сегментов, на которые разбита контролируемая поверхность, а в OTDR-датчике – разрешением рефлектометра. Как показали результаты экспериментов, при пространственном разрешении рефлектометра 3 м сигналы от двух соседних ЧЭ хорошо различимы при расстоянии между ними 8 м. Соответствующая рефлектограмма представлена на рис.3,*a* (маркеры 1 и 2). Однако с учетом особенностей формирования оптического сигнала при воздействии на соседние ЧЭ в качестве оптимального было выбрано расстояние 19 м. Соответствующая рефлектограмма представлена на рис.3,*б* (маркеры 2 и 3). Для того чтобы расстояние между ЧЭ в измерительной сети было меньше, участки ВС между ними наматывались на катушки, находящиеся на нижнем уровне измерительной сети.

На рис.4 представлена схема макета описываемой волоконно-оптической измерительной сети на основе квазираспределенных амплитудных датчиков для регистрации деформационных воздействий. Макет представляет собой площадку размером  $0.64 \times 0.80$  м, условно разбитую на 20 сегментов. Квазираспределенные амплитудные ВОД первого типа (10 штук) уложены параллельно, так, что через каждый сегмент проходят световоды двух датчиков. При этом на каждом сегменте располагается по два ЧЭ одного датчика, т.е. четыре ЧЭ на сегмент. OTDR-

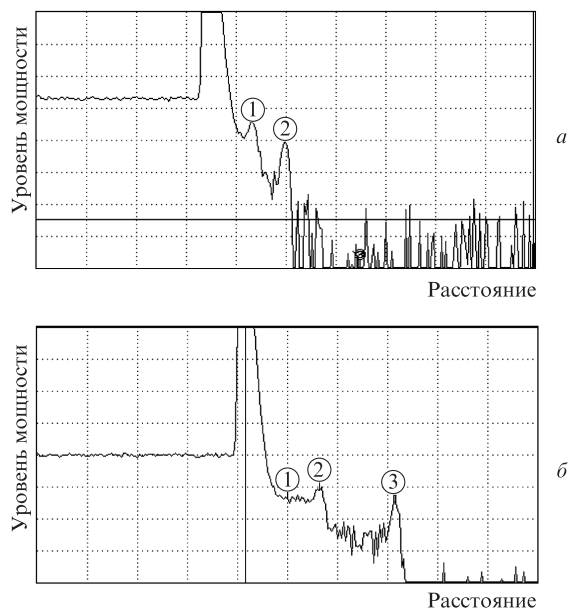


Рис.3. Рефлектограммы OTDR-датчика при нахождении ЧЭ на расстоянии 8 (а) и 19 м (б).

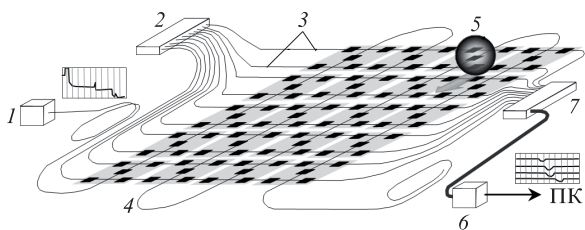


Рис.4. Волоконно-оптическая измерительная сеть на основе квазираспределенных амплитудных датчиков: 1 – рефлектометр; 2 – блок излучателей; 3 – квазираспределенный ВОД первого типа; 4 – квазираспределенный OTDR-датчик; 5 – объект; 6 – АЦП; 7 – блок фотоприемников; ПК – персональный компьютер.

датчик объединяет в одну измерительную линию ЧЭ, находящиеся в центре каждого сегмента.

Таким образом, на каждом сегменте расположено по пять ЧЭ (рис.5). Чувствительные элементы размещаются на мягкой амортизирующей подложке, под которой находится твердая основа. Сверху каждый сегмент имеет покрытие из жесткого материала.

Принцип работы измерительной сети заключается в следующем. При воздействии на сегмент происходит де-

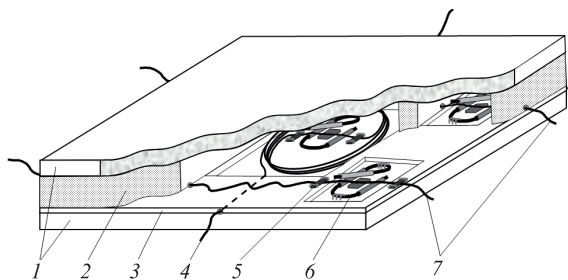


Рис.5. Сегмент волоконно-оптической измерительной сети на основе квазираспределенных амплитудных датчиков: 1 – защитная пластина сегмента из твердого материала; 2 – упругая среда; 3 – упругая защитная прокладка; 4 – одномодовый световод OTDR-датчика; 5 – устройство закрепления световода; 6 – чувствительный элемент; 7 – многомодовый световод датчика первого типа.

формация волоконных световодов, проходящих через ЧЭ. Соответствующие изменения мощности распространяющегося по волоконным световодам излучения регистрируются фотоприемниками в датчиках первого типа и рефлектометром – в OTDR-датчике. Информация поступает на ПК, в котором специальная программа, основанная на нейросетевых принципах обработки информации [6, 9], осуществляет обработку формируемых измерительной сетью данных. После обучения нейросети объем данных, формируемых представленной волоконно-оптической измерительной сетью, становится достаточным для определения траектории движения и силы оказываемого воздействия. Эти данные могут быть использованы для классификации объекта, оказавшего воздействие на измерительную сеть.

На рис.6 представлена зависимость мощности оптического излучения от массы объекта, воздействующего на ЧЭ датчика первого типа. Как видно из рисунка, чувствительность ЧЭ  $\Delta P/\Delta m = 0.043 \text{ кг}^{-1}$ .

На рис.7 показаны результаты определения массы груза, воздействующего на различные сегменты волоконно-оптической измерительной сети. Использованы результаты 15 измерений с воздействующими массами 1.5 и 7 кг. Видно, что погрешность определения массы не превышает

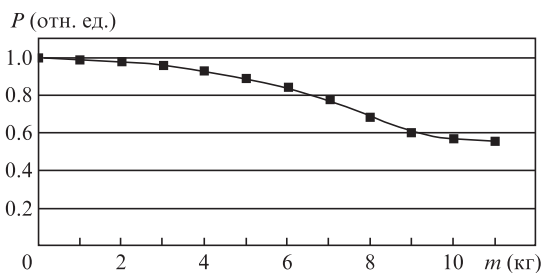


Рис.6. Зависимость мощности оптического излучения от массы объекта, воздействующего на ЧЭ квазираспределенного ВОД первого типа.

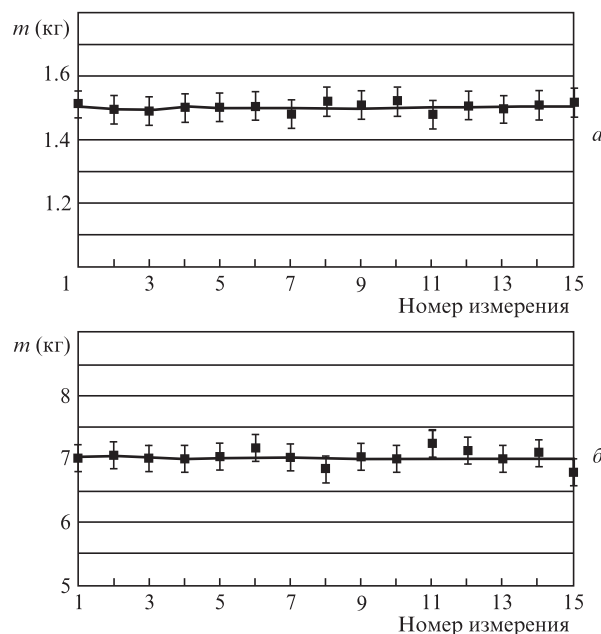


Рис.7. Измеряемая масса объекта, воздействующего на волоконно-оптическую измерительную сеть, при  $m = 1.5$  (а) и 7 кг (б).

