

УДК 535.41

Р.В. РОМАШКО, М.Н. БЕЗРУК, Ю.Н. КУЛЬЧИН

## Детектирование и реконструкция пространственного распределения слабых поперечных колебаний поверхности с помощью многоканального адаптивного волоконно-оптического интерферометра

*Разработан 32-канальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр, в основу которого положено мультиплексирование динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле CdTe. В качестве чувствительных элементов используются многомодовые волоконные световоды (диаметр сердцевины 62,5 мкм). Показана эффективность применения предлагаемого интерферометра для регистрации и реконструкции пространственного распределения слабых поперечных колебаний упругой мембраны размером 20 × 20 см. Детектировано и восстановлено распределение амплитуды основной моды поперечных колебаний мембраны, при этом максимальная амплитуда колебаний мембраны составила 110 мкм.*

*Ключевые слова:* адаптивный интерферометр, фоторефрактивный кристалл, мультиплексирование динамических голограмм, волоконно-оптические сенсоры.

**Detecting and reconstruction spatial distribution of ultra small vibrations by multichannel adaptive fiber-optic interferometer.** R.V. ROMASHKO (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Far Eastern Federal University, Vladivostok), M.N. BEZRUK (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok), Yu.N. KULCHIN (Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Far Eastern Federal University, Vladivostok).

*We developed 32-channel adaptive fiber-optic interferometer based on multiplexing of signals from fiber-optic sensors in photorefractive crystal CdTe. We used multimode fibers (core diameter 62.5 μm). We showed the effectiveness of application the offered interferometer for registration and reconstruction spatial distribution of weak transverse oscillations of elastic membrane of 20 x 20 cm in size. Main mode of transverse oscillations of elastic membrane has been detected and reconstructed with maximum amplitude of membrane at 110 μm.*

*Key words:* adaptive interferometer, photorefractive crystal, multiplexing of dynamic hologram, fiber-optic sensors.

На протяжении последних десятилетий ведутся активные исследования, направленные на создание систем мониторинга состояния технических конструкций, их элементов, а также инженерных сооружений. К таким объектам относятся гидротехнические

---

РОМАШКО Роман Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, КУЛЬЧИН Юрий Николаевич – академик, профессор, директор (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), \*БЕЗРУК Михаил Николаевич – младший научный сотрудник (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). \*E-mail: bezmisha@list.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-90455) и Министерства образования и науки Российской Федерации (постановление П218, договор № 02.G25.31.0116 от 14.08.2014 г. между Открытым акционерным обществом «Центр судоремонта «Дальзавод» и Министерством образования и науки Российской Федерации).

сооружения, шахты, мосты, сваи, туннели, дамбы, плотины, взлетно-посадочные полосы, нефтепроводы и т.д. [2, 10]. Для контроля состояния подобных объектов необходимо обеспечить измерение большого количества параметров, как правило, слабых физических полей, распределенных на значительных площадях [4, 7, 8]. Применение в таких задачах волоконно-оптических систем представляется перспективным, поскольку волоконные датчики в сравнении с их электрическими аналогами обладают рядом преимуществ: малым удельным весом, невосприимчивостью к электромагнитным помехам и коррозии, широким динамическим диапазоном. Кроме того, оптическое волокно, имеющее распределенную чувствительность, может стать основой систем мониторинга крупномасштабных процессов, протекающих в природных и техногенных объектах [4]. В то же время в волоконно-оптических измерительных системах могут быть применены принципы томографии, широко используемые в медицине, что позволит не только регистрировать слабые сигналы на больших пространствах, но и восстанавливать пространственное распределение параметров физических полей при гораздо меньшем количестве необходимых для этого сенсоров [1, 4].

Поскольку в рамках мониторинга состояния технических конструкций и сооружений необходимо детектировать слабые физические поля, в основу волоконно-оптических измерительных систем могут быть положены интерферометрические принципы детектирования оптических сигналов, что позволит существенно повысить их чувствительность. Однако интерферометрические системы вследствие их высокой чувствительности подвержены влиянию неконтролируемых воздействий окружающей среды (температуры, промышленных шумов, вибрации). Один из подходов к решению данной проблемы заключается в применении динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивном кристалле (ФРК). Это делает интерферометр адаптивным к внешнему воздействию и обеспечивает его стабильную работу [9].

В настоящей работе представлен многоканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр, который применен в задаче детектирования и томографической реконструкции пространственного распределения слабых поперечных колебаний упругой мембраны.

На рис. 1 (см. вклейку) показана схема разработанной авторами экспериментальной установки многоканального адаптивного интерферометра. Измерительная часть интерферометра представляет собой сеть из 32 многомодовых волоконно-оптических сенсоров (диаметр сердцевины 62,5 мкм), помещаемых на исследуемую область. Непрерывное излучение Nd:YAG лазера ( $\lambda = 1064$  нм) подводится к сенсорной сети посредством волоконно-оптического разветвителя ( $1 \times 32$ ). Внешнее воздействие на волоконные световоды со стороны исследуемой области приводит к фазовой модуляции лазерного излучения в световодах. Затем сигнальные световые пучки, полученные на выходе волоконных световодов, попадают в фоторефрактивный кристалл CdTe, где за счет взаимодействия с опорным пучком формируют динамические голограммы. С помощью динамических голограмм осуществляется линейное преобразование модуляции фазы в модуляцию интенсивности. Благодаря адаптивным свойствам динамических голограмм обеспечивается стабильная работа интерферометра в условиях неконтролируемых воздействий окружающей среды. Интенсивность сигнальных световых пучков, прошедших через ФРК, регистрируется фотодетекторами, каждый пучок – отдельным фотодетектором. Сигналы фотодетекторов обрабатываются на компьютере посредством многоканального АЦП.

В адаптивном интерферометре использована схема мультиплексирования ортогональных динамических голограмм на основе векторного взаимодействия волн [6]. В рамках этой схемы сигнальные световые пучки, полученные на выходе волоконных световодов, и единственный опорный пучок пересекаются под прямым углом друг к другу в ФРК вдоль его основных кристаллографических осей и формируют динамические голограммы, с помощью которых осуществляется фазовая демодуляция сигнала. Применение такой схемы мультиплексирования обеспечивает простой и удобный ввод лазерного излучения из

волоконных световодов в ФРК, а также исключает наличие перекрестных шумов в измерительных каналах адаптивного интерферометра.

Разработанный многоканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр применен для решения задачи томографической реконструкции пространственного распределения амплитуды поперечных колебаний поверхности. В качестве исследуемой поверхности использована резиновая упругая мембрана размером  $20 \times 20$  см, закрепленная по краям на металлическом каркасе. С помощью электромеханического устройства, воздействующего на центр мембраны в поперечном направлении, в ней возбуждались поперечные колебания на частоте, близкой к собственной (54 Гц). Волоконные световоды в виде прямых линий, расположенных параллельно друг другу, закреплены на мембране согласно томографическому принципу – в двух ортогональных направлениях, по 16 линий в каждом [1, 5]. Воздействие мембраны на измерительные линии приводит к возникновению в них фазовой модуляции лазерного излучения. Поскольку волоконный световод имеет распределенную чувствительность, на выходе каждой измерительной линии, уложенной на мембране, наблюдается сигнал, представляющий собой результат интегрирования внешних воздействий со стороны мембраны вдоль контура укладки линии. С помощью таких сигналов можно однозначно восстановить исходное распределение параметра исследуемого физического поля (в данном случае распределение амплитуды поперечных колебаний мембраны), применив процедуру обратного преобразования Радона [5].

Томографическая реконструкция полученных с помощью адаптивного интерферометра сигналов осуществлялась итерационным методом с помощью программного пакета, реализующего обратное преобразование Радона [3].

На рис. 2 (см. вклейку) представлен результат томографической реконструкции пространственного распределения амплитуды поперечных колебаний мембраны на частоте собственных колебаний. Наблюдается хорошее соответствие между экспериментальными данными, полученными на частотах 54 Гц (рис. 2а), и рассчитанной основной модой (рис. 2б). Для количественной оценки экспериментальных данных определены коэффициенты корреляции между томографически реконструированным распределением амплитуды и рассчитанной собственной модой поперечных колебаний мембраны. Коэффициент корреляции составил 0,87.

Разработанный многоканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр позволяет также восстанавливать распределение амплитуды колебания мембраны в различные моменты времени. В качестве примера на рис. 3 (см. вклейку) показаны несколько распределений амплитуды колебаний мембраны.

Предлагаемый интерферометр может использоваться для мониторинга исследуемого объекта в режиме реального времени. Результаты, представленные на рис. 3, для момента времени  $t = T/4$ , когда мембрана находится в положении равновесия, позволили найти уровень шумов в системе, который в свою очередь определяет порог детектирования амплитуды колебаний мембраны. Он составляет 2,2 мкм. Максимальная амплитуда колебаний мембраны, при которой удлинение волоконного световода, прикрепленного к мембране, приводит к модуляции фазы излучения в нем в пределах линейного режима, равна 110 мкм.

Таким образом, разработан многоканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр, в основу которого положено мультиплексирование динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле CdTe. В качестве чувствительных элементов используются многомодовые волоконные световоды. Количество измерительных каналов 32. Разработанный интерферометр применен для регистрации и реконструкции пространственного распределения слабых поперечных колебаний упругой мембраны размером  $20 \times 20$  см. В результате было детектировано и восстановлено распределение амплитуды основной моды поперечных колебаний мембраны, при этом максимальная амплитуда колебаний мембраны составила 110 мкм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гиневский С.П. и др. Применение методов реконструктивной вычислительной томографии в волоконно-оптических датчиках // Квант. электроника. 1995. Т. 22, № 10. С. 1013–1018.
2. Калашников В.И., Нефедов С.В., Путилин А.Б., Раннев Г.Г. Информационно-измерительная техника и технологии. М.: Высш. школа, 2002. 454 с.
3. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Каменев О.Т., Кириченко О.В., Петров Ю.С. Восстановление векторных физических полей оптическим томографическим методом // Квант. электроника. 1995. Т. 22, № 10. С. 1009–1012.
4. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2001. 272 с.
5. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990. 279 с.
6. Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Камшилин А.А., Кульчин Ю.Н. Шестиканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр // Квант. электроника. 2012. Т. 42, № 6. С. 551–556.
7. Fiber optic smart structures / ed. E. Udd. N.Y.: Wiley-Interscience, 1995.
8. Huston D. Structural sensing, health monitoring and performance evaluation. L.: CRC Press, 2010. 662 p.
9. Stepanov S.I. Adaptive interferometry: a new area of applications of photorefractive crystals // International trends in optics. Boston, 1991. С. 125–140.
10. Structural health monitoring / eds D. Balageas, C.-P. Fritzen, A. Güemes. L.: ISTE, 2006. 496 p.