

УДК 535.41

Р.В. Ромашко, М.Н. Безрук, Ю.Н. Кульчин

Реконструкция параметров слабых вибрационных полей с помощью многоканального адаптивного волоконно-оптического интерферометра

Разработана 26-канальная адаптивная томографическая интерферометрическая система, в основе которой лежит мультиплексирование сигналов с волоконно-оптических сенсоров в одном фоторефрактивном кристалле. Система апробирована в задаче реконструкции пространственного распределения слабых поперечных колебаний упругой мембраны с амплитудой от 2 до 110 мкм.

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

Измерительные системы томографического типа широко используются для решения различных фундаментальных и прикладных задач в геофизике, микроэлектронике, авиационно-космической технике и др. При этом зачастую возникает необходимость регистрации слабых полей, например колебаний, амплитуда которых не превышает десятков микрометров [1]. В этом случае применение интерферометрических принципов детектирования физических параметров может быть положено в основу высокочувствительных измерительных систем, в том числе с использованием многомодовых волоконно-оптических сенсоров в качестве чувствительных элементов.

Однако вследствие своей высокой чувствительности интерферометрические системы подвержены влиянию неконтролируемых воздействий окружающей среды (дрейф температуры, промышленные шумы, вибрация). Таким образом, использование интерферометрических систем вне лаборатории весьма затруднительно. В свою очередь применение динамических голограмм, записываемых в фоторефрактивном кристалле, делает интерферометрические системы адаптивными к медленным изменениям окружающей среды, обеспечивая их стабильную работу [2].

В этой работе представлена адаптивная интерферометрическая томографическая измерительная система, в которой в качестве чувствительных элементов используются многомодовые волоконные световоды. Ключевым элементом системы являются динамические голограммы, мультиплексируемые в одном фоторефрактивном кристалле, использование которых позволяет компенсировать влияние внешних факторов. Адаптивный интерферометр апробирован в задаче томографической реконструкции пространственного распределения слабых поперечных колебаний упругой мембраны.

Экспериментальная установка. Измерительная часть системы представляет собой сенсорную сеть из 26 многомодовых волоконно-оптических линий (рис. 1, а). Каждая измерительная линия прикреплена к упругой мембране, при этом поперечные колебания мембраны приводят к фазовой модуляции излучения, распространяющегося в волоконных световодах. Фазовая демодуляция сигнала осуществляется при помощи динамических голограмм, записываемых в фоторефрактивном кристалле CdTe [3]. Одновременная обработка сигналов всех каналов обеспечивается динамическими голограммами, мультиплексируемыми в кристалле. Двадцать шесть сигнальных волн из 26 чувствительных волоконных световодов взаимодействуют с одной общей опорной волной, как показано на рис. 1, а, вследствие чего в кристалле записываются 26 динамических голограмм. Благодаря адаптивным свойствам динамических голограмм обеспечивается стабильная работа измерительной системы в условиях неконтролируемых воздействий окружающей среды [2, 4]. В данной работе использована ортогональная геометрия векторного взаимодействия опорной и сигнальных волн, в которой сигнальные волны распространяются в фоторефрактивном кристалле перпендикулярно опорной волне. Это позволило упростить оптическую схему мультиплексирования каналов за счет устранения линз и поляризаторов из трактов световых пучков, идущих из волоконных световодов. В результате выходные концы волоконных световодов были размещены на очень малом расстоянии (0,5–1,0 мм) от входной грани кристалла, таким образом, размер световых пучков на входе в кристалл не превысил 250 мкм (рис. 1, б). Кроме того, такая геометрия векторного взаимодействия волн исключает перекрестные шумы между голограммами.

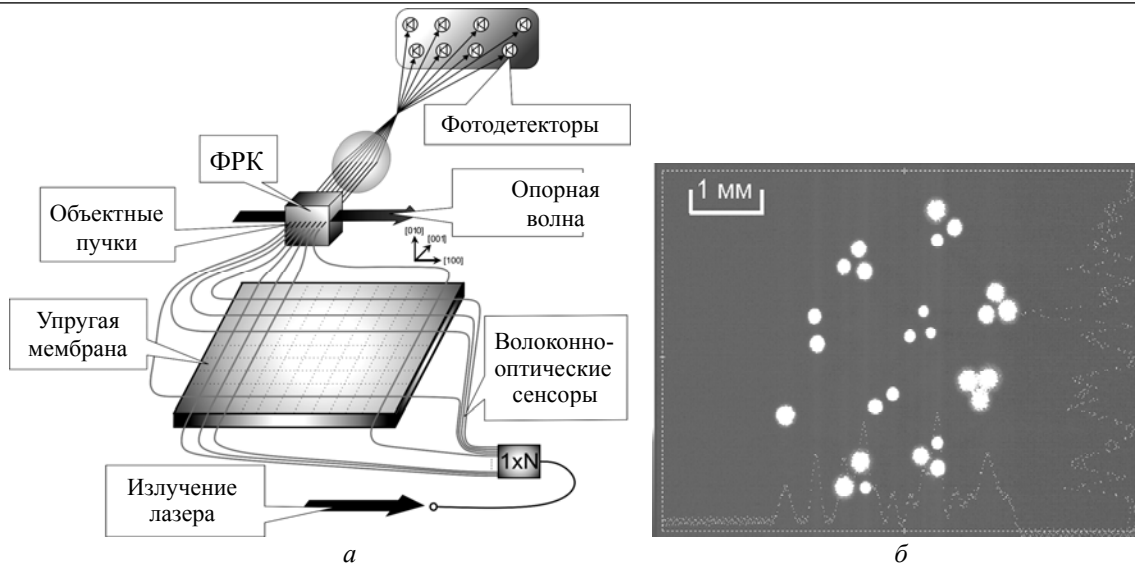


Рис. 1. Схема экспериментальной установки – *а*; изображение 26 сигнальных световых пучков в плоскости входной грани фоторефрактивного кристалла – *б*

Разработанная измерительная система использована для реконструкции двумерного распределения поперечных колебаний упругой мембраны ($20 \times 20 \text{ см}^2$) прямоугольной формы. Мембрана натянута на металлический каркас с равномерным натяжением. Воздействием на центр мембраны при помощи электромеханического устройства возбуждались ее собственные колебания на частотах 54, 107 и 163 Гц с максимальной амплитудой 110 мкм (рис. 2, *а*).

Двадцать шесть волоконно-оптических измерительных линий с равномерным натяжением размещались на мембране согласно томографическому принципу – в двух ортогональных направлениях – сначала в одном, затем в другом – 26 линий в каждом, тем самым выполняя процедуру томографического сканирования (рис. 2, *б*). Полученные измерительной системой данные обрабатывались с помощью программного обеспечения с применением преобразования Радона [1].

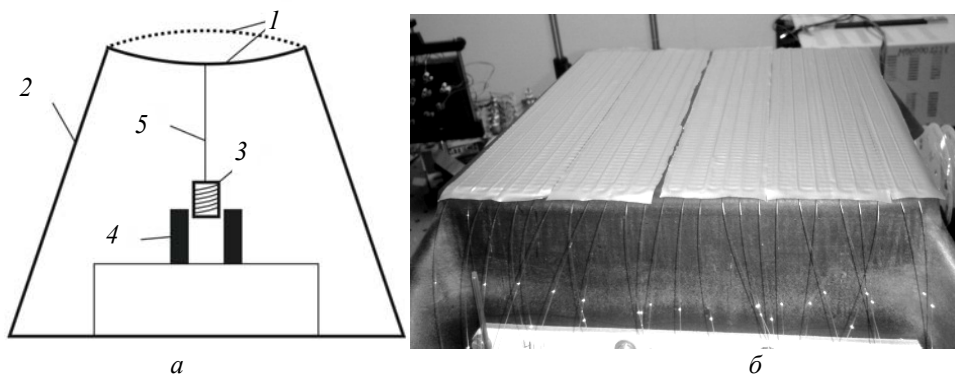


Рис. 2. Схема экспериментального стенда – *а*: 1 – упругая мембрана; 2 – металлический каркас; 3–4 – электромеханическое устройство; 5 – тонкая нить, соединяющая динамик и мембрану; *б* – мембрана и 26 волокон, уложенных на ней в одном из двух направлений

Результаты реконструкции. На рис. 3, *а* представлен результат реконструкции двумерного распределения поперечных колебаний мембраны. Как видно, наблюдается хорошее соответствие между экспериментально полученными данными на частотах 54, 107, 163 Гц и теоретически рассчитанным двумерным распределением собственных мод (1:1), (2:2) и (3:3) (рис. 3, *б*) соответственно. Для количественной оценки экспериментальных данных рассчитаны корреляционные коэффициенты между реконструированными и теоретически рассчитанными распределениями колебаний мембраны, которые составили 0,87; 0,75 и 0,79 для первой, второй и третьей собственной моды соответственно. Принимая во внимание размеры мембраны $20 \times 20 \text{ см}^2$ и количество измерительных линий (26×26), пространственное разрешение реконструкции колебаний составило 0,8 см. Для того чтобы увеличить пространственное разрешение, измерительные линии должны быть размещены на

меньшем расстоянии друг от друга либо необходимо увеличение их количества. Недавние исследования [5] показали, что количество измерительных линий может быть увеличено до ста и больше без ухудшения характеристик измерительной системы (чувствительность и перекрестные шумы). Это открывает возможности для реализации такого режима измерения с высоким пространственным разрешением, который позволит с помощью одного измерения получить всю необходимую информацию об исследуемом объекте.

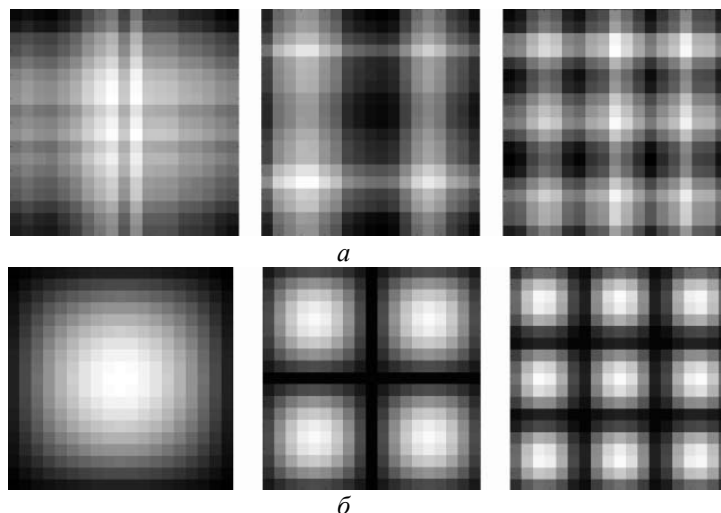


Рис. 3. Результат томографического восстановления трех мод колебаний упругой мембраны с частотами 54, 107 и 163 Гц – *а*; результат теоретического расчета двумерного распределения собственных мод (1:1), (2:2) и (3:3) – *б*

Разработанная многоканальная адаптивная интерферометрическая измерительная система также позволяет восстанавливать распределение амплитуды колебания мембраны в различные моменты времени. В качестве примера на рис. 4 показаны несколько распределений амплитуды колебаний мембраны.

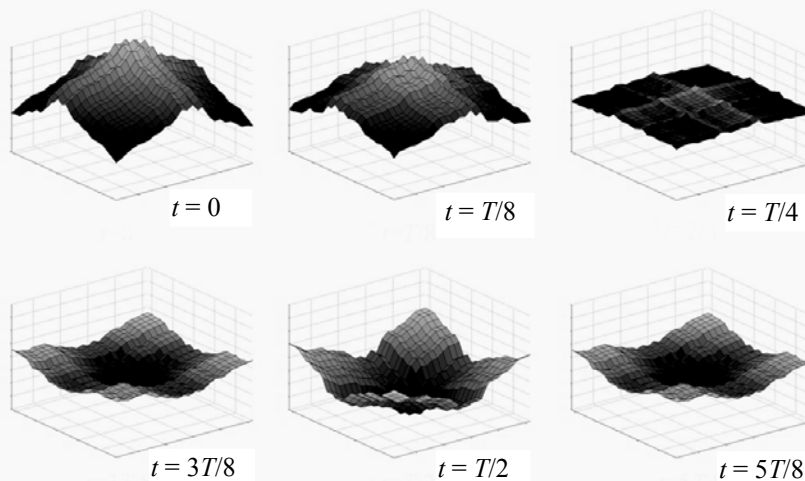


Рис. 4. Результат реконструкции колебания мембраны на частоте 54 Гц в различные моменты времени периода колебания T

Таким образом, разработанная адаптивная измерительная система может использоваться для мониторинга исследуемого объекта в режиме реального времени. При этом возможность такого режима работы системы будет определяться соотношением частоты, с которой изменяются параметры исследуемого объекта, и быстродействием системы. При этом быстродействие ограничено полосой пропускания фотодетектора, частотой дискретизации АЦП, скоростью обработки оцифрованных данных на компьютере. В настоящей работе частота дискретизации АЦП составляет 10 кГц на канал (используется фотодетектор с полосой пропускания 10 МГц и высокоскоростное программное обеспечение). Вследствие этого разработанная измерительная система может быть использована для мониторинга объектов, частота вибраций которых не превышает 1 кГц. Напомним, что максимальная частота в эксперименте, описанном выше, составляла 163 Гц. Для увеличения быстродействия измерительной системы необходимо увеличивать частоту дискретизации АЦП либо уменьшать число каналов. В то же время уменьшение количества каналов приведет к уменьшению пространствен-

ного разрешения системы. Таким образом, в каждой конкретной задаче необходимо нахождение оптимального соотношения между пространственным и временным разрешением.

Результаты, представленные на рис. 4, 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, который составил 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, составила 110 мкм.

Заключение. Таким образом, разработана многоканальная адаптивная томографическая измерительная система, основанная на мультиплексировании динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле. В качестве чувствительных элементов используются многомодовые волоконные световоды. Разработанная система была апробирована в задаче реконструкции пространственного распределения слабых поперечных колебаний упругой мембраны площадью $20 \times 20 \text{ см}^2$ с пространственным разрешением 0,8 см. В результате было детектировано и восстановлено распределение амплитуды трех собственных мод колебаний мембраны, при этом диапазон колебаний составил от 2,2 до 110 мкм.

Литература

1. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. – М.: Мир, 1990. – 279 с.
2. Stepanov S.I. Adaptive interferometry: a new area of applications of photorefractive crystals // International Trends in Optics, ed. J.W. Goodman. – New York; London: Academic Press, Inc., 1991. – Ch. 9. – P. 125–140.
3. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in CdTe:V / S. Di Girolamo, A.A. Kamshilin, R.V. Romashko et al. // Optics Express. – 2007. – Vol. 15. – P. 545–555.
4. Kamshilin A.A. Adaptive interferometry with photorefractive crystals / A.A. Kamshilin, R.V. Romashko, Y.N. Kulchin // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 105. – P. 031101.
5. Шестиканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр / Р.В. Ромашко, М.Н. Безрук, А.А. Камшилин, Ю.Н. Кульчин // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 6. – С. 551–556.

Ромашко Роман Владимирович

Вед. науч. сотрудник Института автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН), г. Владивосток
Тел.: (423) 255-51-74
Эл. почта: romashko@iacp.dvo.ru

Безрук Михаил Николаевич

Мл. науч. сотрудник ИАПУ ДВО РАН
Тел.: 8-950-297-74-65
Эл. почта: bezmisha@list.ru

Кульчин Юрий Николаевич

Академик РАН, директор ИАПУ ДВО РАН
Эл. почта: director@iacp.dvo.ru

Romashko R.V., Bezruk M.N., Kulchin Yu.N.

Reconstruction of parameters of weak vibration fields by means of fast adaptive fiber-optic interferometer

We developed a 26-channel adaptive tomographic interferometer system, based on multiplexing of signals from fiber-optic sensors in one photorefractive crystals. The system is tested on the reconstruction of space distribution of lateral vibrations in elastic membrane with a range from 2 to 110 μm .

Keywords: adaptive interferometer, photorefractive crystal, multiplexing of dynamic hologram, fiber-optic sensors.