

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

Детектирование слабых акустических полей с помощью волоконно-оптической измерительной системы для задач неразрушающей диагностики

Продемонстрирована возможность применения волоконно-оптической системы на основе многоканального адаптивного голографического интерферометра для задач неразрушающей диагностики. С помощью системы выполнены детектирование и реконструкция слабого акустического поля, сформированного внутри плиты из конструкционного материала, имеющей неоднородную структуру. На основе результатов томографической реконструкции акустического поля показано влияние неоднородности на суперпозицию акустического поля.

Ключевые слова: адаптивный интерферометр, волоконный световод, динамическая голограмма, акустическое поле.

Detecting weak acoustic fields using optical-fiber system for purposes of nondestructive diagnostics. M.N. BEZRUK, R.V. ROMASHKO, Yu.N. KULCHIN (Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok).

In this paper, the possibility of using fiber-optical system based on a multi-channel adaptive holographic interferometer in the problem of non-destructive diagnostics is demonstrated. The detection and reconstruction of a weak acoustic field formed inside the plate from a structural material having a structure defect has been performed. Based on the results of tomographic reconstruction of the acoustic field, the effect of structure defect on the superposition of the acoustic field inside plate is shown.

Key words: adaptive interferometer, calibration, optical fiber, dynamic hologram, acoustic field.

Непрерывно растущие требования технической безопасности, предъявляемые к инженерным сооружениям и техническим конструкциям, обуславливают востребованность систем неразрушающего контроля [2, 8]. Решение таких задач связано с необходимостью измерения большого количества физических параметров и полей (акустическая эмиссия, динамические деформации, вибрации и пр.), которые зачастую довольно слабы и распределены по объекту исследования [6]. Такие измерения обычно выполняются с использованием большого количества дискретных датчиков. Однако количество датчиков значительно увеличивается, если необходимо контролировать пространственно вытянутый объект или одновременно измерять большое количество различных параметров. Это усложняет как саму систему измерений, так и процедуру измерения.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-32-00476 мол_а.

Использование волоконно-оптических датчиков позволяет комплексно решить такие задачи. Оптические волокна, обладая малым весом, невосприимчивостью к электромагнитным помехам и коррозии, высокой способностью к мультиплексированию, по своей природе имеют интегральную чувствительность, что позволяет создавать на их основе измерительные системы томографического типа. Это делает возможным не только обнаружение, но и реконструкцию пространственного распределения физических полей [1, 3, 9]. При этом одним из эффективных инструментов для решения таких задач может быть волоконно-оптическая измерительная система на основе адаптивного голографического интерферометра [11]. В таком интерферометре световые пучки объединяются с помощью динамической голограммы, формируемой в фоторефрактивном кристалле. Голограмма, перезаписываясь, стабилизирует рабочую точку интерферометра, сохраняя его работоспособность в реальных условиях на фоне внешних шумовых факторов.

Как показано в работах [5, 7, 10], динамические голограммы могут эффективно мультиплексироваться в одном кристалле, что позволяет создавать на основе адаптивного интерферометра измерительные системы с большим числом каналов. В работе [4] реализован многоканальный адаптивный интерферометр, который был успешно применен в задаче детектирования слабого вибрационного поля. В настоящей работе исследована возможность применения волоконно-оптической измерительной системы на основе многоканального адаптивного интерферометра для регистрации слабых акустических полей в конструкционном материале, имеющем неоднородность структуры.

На рис. 1 представлена схема волоконно-оптической измерительной системы. Чувствительным элементом измерительной системы является волоконно-оптическая томографическая сеть, состоящая из 30 световодов, которые располагаются на объекте измерения согласно томографическому принципу – в двух перпендикулярных направлениях [4]. Применение томографического подхода позволяет уменьшить количество измерительных элементов по сравнению с точечными датчиками [1, 3]. Воздействие объекта измерения на световоды приводит к модуляции фазы проходящего в них лазерного излучения. Излучение из световодов направляется в 30-канальный адаптивный голографический

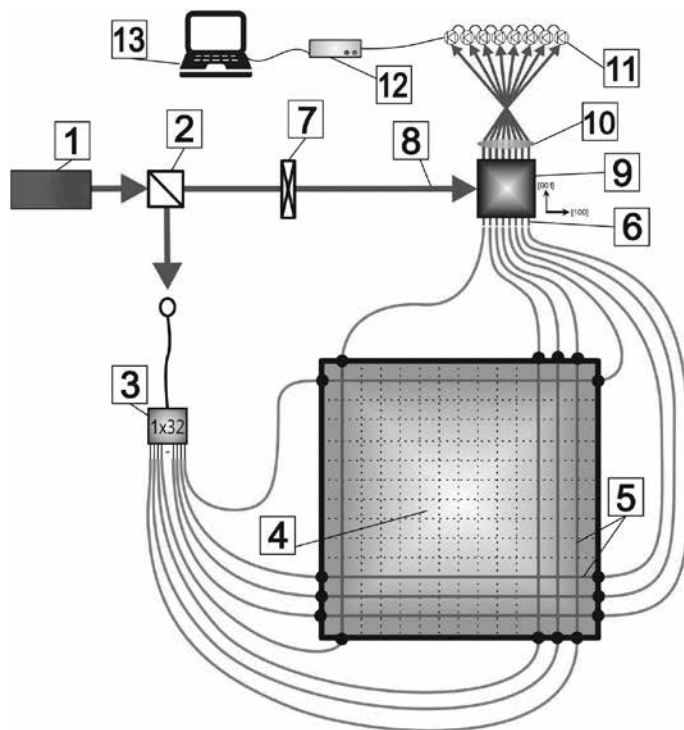


Рис. 1. Схема волоконно-оптической измерительной системы. 1 – Nd:YAG лазер; 2 – светоделительный куб; 3 – многомодовый волоконно-оптический разветвитель; 4 – плата; 5 – волоконно-оптические сенсоры, уложенные в двух ортогональных направлениях; 6 – объектные световые пучки; 7 – четвертьволновая фазовая пластинка; 8 – опорный пучок; 9 – фоторефрактивный кристалл CdTe; 10 – фокусирующая линза; 11 – фотодетекторы; 12 – АЦП; 13 – компьютер

интерферометр на основе фоторефрактивного кристалла, формируя 30 измерительных каналов. Фазовая демодуляция осуществляется за счет дифракции волн на динамических голограммах. Модуляция интенсивности каждого канала регистрируется фотоприемником. Полученные сигналы каждого канала записываются на компьютер посредством АЦП. Томографическая реконструкция полученных экспериментальных данных осуществляется с применением обратного преобразования Радона [1, 3].

С помощью волоконно-оптической измерительной системы выполнены регистрация и реконструкция слабого акустического поля, сформированного в конструкционном объекте. В качестве такого объекта использована плита из экструдированного пенополистирола XPS размером $390 \times 390 \times 50$ мм (рис. 2).



Рис. 2. Схема расположения на плите излучателя и отверстия

Для создания акустического поля в плите использован акустический излучатель, расположенный в центре плиты на верхней стороне. Излучатель возбуждает распространяющуюся внутри плиты акустическую волну, которая, отражаясь от стенок, интерферирует и тем самым образует суперпозицию звукового поля внутри плиты. На излучатель подавалось синусоидальное напряжение с амплитудой 1 В на частоте 1,4 кГц, при этом величина акустического давления вблизи излучателя составляла 5 мПа. Томографическое сканирование акустического поля осуществлялось с использованием волоконно-оптической сети, уложенной на плите в двух ортогональных направлениях. Следует отметить, что на частоте акустических колебаний 1,4 кГц с учетом скорости звука в данном материале (620 м/с) длина акустической волны составляет 44 см. При этом расстояние между пучностями составит 22 см. В этом случае, принимая во внимание площадь плиты (390×390 мм), для более детального сканирования акустического поля на такой частоте было решено увеличить пространственное разрешение сенсорной сети. Все 30 волоконных световодов задействованы для томографического сканирования в одном направлении, при этом пространственное разрешение сенсорной волоконно-оптической сети составило $1,3 \text{ см}^{-1}$. В результате процедура томографического сканирования акустического поля состояла из двух последовательных сканирований: сначала в продольном направлении, после чего все волоконные световоды укладывались на плите поперек, затем выполнялся второй этап сканирования – в поперечном направлении. Для того чтобы объединить данные, полученные при сканировании в обоих направлениях, необходимо их синхронизировать, поэтому все измерения были привязаны по времени к модуляционному сигналу. С помощью данной методики выполнена томографическая регистрация акустического поля в плите. Затем плита была модифицирована путем создания в ней конструкционного дефекта в виде

несквозного отверстия диаметром 60 мм и глубиной 35 мм, расположенного с нижней стороны плиты, как схематично показано на рис. 2. В модифицированной плите также была выполнена томографическая регистрация акустического поля.

На рис. 3, *а*, *б* представлены результаты томографической реконструкции пространственного распределения амплитуды акустического поля в исходной, а также в модифицированной плите. Как видно из рис. 3, *а*, в случае, когда плита имела однородную структуру, суперпозиция акустического поля представляет собой практически симметричную картину, на которой пучности, примерно одинаковые по своему размеру, располагаются на плите в шахматном порядке. В тоже время, когда в плите появляется конструкционный дефект (рис. 3, *б*), внутри плиты возникает перераспределение суперпозиции акустического поля и около отверстия наблюдается увеличение амплитуды поля.

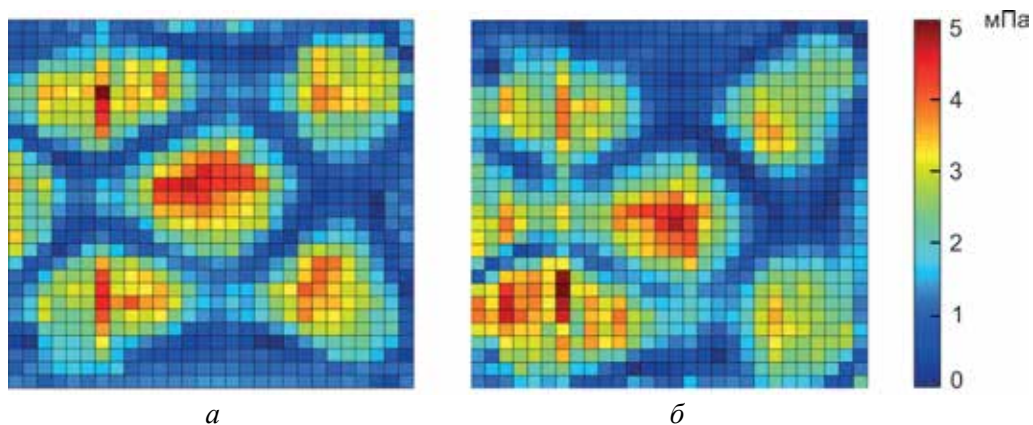


Рис. 3. Результат томографической реконструкции амплитуды акустического поля, сформированного в плите исходной (*а*) и модифицированной, с отверстием (*б*)

Для более наглядного отображения изменения суперпозиции акустического поля на рис. 4 представлена разностная картина пространственного распределения амплитуды акустического поля внутри плиты, представляющая собой разность между пространственным распределением амплитуды поля в исходной плите и пространственным распределением амплитуды поля в модифицированной плите. Значение в каждой точке определяет степень различия амплитуд для результатов, представленных на рис. 3, *а* и *б*.

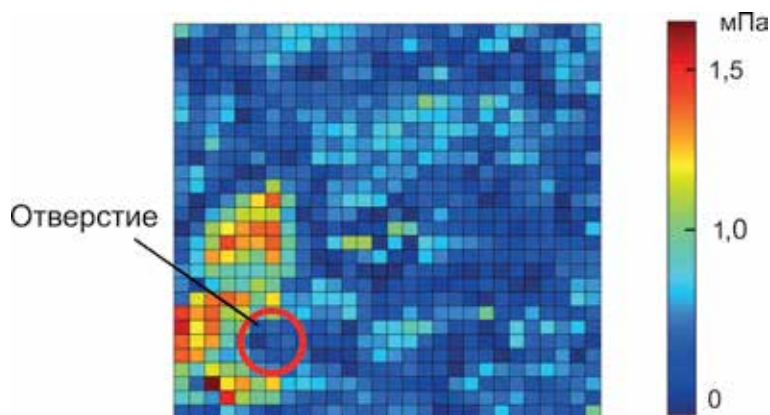


Рис. 4. Пространственное распределение разности амплитуд акустического поля внутри плиты с отверстием и без него

Как видно из рис. 4, максимальное различие наблюдается как раз в области, где располагается отверстие. Таким образом, разработанная волоконно-оптическая измерительная система на основе многоканального адаптивного интерферометра позволяет эффективно решать задачи, связанные с регистрацией и восстановлением пространственного распределения параметров слабых физических полей (например, задачи акустико-эмиссионного неразрушающего контроля). Это дает возможность в условиях промышленных шумов осуществлять мониторинг состояния конструкционных материалов, выявляя в них возможные скрытые дефекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гиневский С.П., Котов О.И., Николаев В.М., Петрунькин В.Ю. 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., Ромашко Р.В., Петров Ю.С., Кириченко О.В., Каменев О.Т. Томографические методы исследования векторных полей с применением оптоволоконных измерительных систем // Квант. электроника. 1997. Т. 24, № 5. С. 467–470.
4. Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Кульчин Ю.Н. Детектирование и реконструкция пространственного распределения слабых поперечных колебаний поверхности с помощью многоканального адаптивного волоконно-оптического интерферометра // Вестн. ДВО РАН. 2014. № 6 (178). С. 140–143.
5. 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.
6. Fiber optic smart structures / ed. E. Udd. N.Y.: Wiley-Interscience, 1995. Vol. 12.
7. Fomitchov P., Murray T.W., Krishnaswamy S. Intrinsic fiber-optic ultrasonic sensor array using multiplexed two-wave mixing interferometry // Appl. optics. 2002. Vol. 41, N 7. P. 1262–1266.
8. Glišić B., Inaudi D. Fibre optic methods for structural health monitoring. John Wiley & Sons, 2008. 276 p.
9. Guo H., Xiao G., Mrad N., Yao J. Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms // Sensors. 2011. Vol. 11, N 4. P. 3687–3705.
10. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. A multichannel adaptive interferometry system // J. Rus. Laser Res. 2010. Vol. 31, N 1. P. 55–60.
11. Stepanov S.I. Adaptive interferometry: a new area of applications of photorefractive crystals // International Trends in Optics / ed. J. Goodman. N.Y.; London: Acad. Press, 1991. Ch. 9. P. 125–140.