

Возможности биспектрального подхода к обработке сигнала

О. В. БОЧАРОВА¹, И. Е. АНДЖИКОВИЧ², А. В. СЕДОВ¹, В. В. КАЛИНЧУК^{1,2}

¹Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: olga.v.bocharova@gmail.com

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: vkalin415@mail.ru

Предложен биспектральный подход к обработке сигналов, позволяющий распознавать дефекты инженерных конструкций при контроле параметров поверхностного волнового поля. Подход основан на использовании адаптивно настраиваемого ортонормированного базиса. Проведена серия экспериментов, демонстрирующая высокую эффективность подхода.

Ключевые слова: дефект, неразрушающий контроль, поверхностное волновое поле, биспектральный подход, признаковое диагностическое пространство.

A bispectral approach to signal processing, which allows to carry out detection of defects by controlling the characteristics of the surface wave field is proposed. The approach is based on using of adjustable orthonormal basis. A series of experiments demonstrating the high efficiency of the approach is carried out.

Key words: defect, nondestructive testing, surface wave, bispectral approach, feature diagnostic space.

Широкое распространение для поиска скрытых расслоений и неоднородностей, возникающих как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации композитных материалов и многослойных конструкций, получили акустические методы контроля. Акустические методы контроля основаны на регистрации изменений параметров динамических процессов в контролируемых объектах. Метод контроля собственных частот колебаний конструкции показал свою эффективность для изделий ограниченных размеров [1, 2]. Для стержневых конструкций широко используют метод, основанный на регистрации деформационных откликов на серийные ударные воздействия и сравнении фазовых диаграмм деформационного поведения неповрежденной и поврежденной моделей [3]. Такой метод также позволяет осуществлять контроль напряженного состояния объекта [4, 5]. В [6–8] представлен резонансный метод диагностики напряженного состояния конструкции, который основан на регистрации изменения резонансной частоты колебания жесткого штампа на поверхно-

сти контролируемого объекта. В [9, 10] предложены методы диагностики дефектов, основанные на контроле изменения амплитудных характеристик волновых полей на поверхности поврежденных тел. В основе указанных методов лежит регистрация параметров волнового поля на поверхности среды с последующей частотно-временной обработкой сигнала для контроля изменения амплитудно-частотных, фазовых или спектральных характеристик поступающего сигнала. Использование преобразования Фурье не всегда позволяет достичь желаемых результатов.

В настоящей работе предложен биспектральный подход к анализу параметров поверхностной волны, созданной ударным возмущением. В основе метода лежит использование адаптивно-настраиваемого ортонормированного базиса, который в максимальной степени обеспечивает разнесённость получаемых после обработки образов сигналов, соответствующих различным типам дефектов. Такой подход позволяет существенно повысить эффективность их распознавания.

Методы исследования. Биспектральный подход к анализу параметров поверхностной волны реализован в лабораторных условиях на упрощённых моделях сложных конструкций. В моделях имитировались искусственные сквозные трещины и анализировались изменения поверхностной волны в зависимости от параметров этих трещин. В качестве основы служила алюминиевая балка квадратного сечения длиной 490 мм и сечением 16 мм². Для имитации дефектов типа трещины на различной глубине от поверхности балки электроискровым лобзиком прорезали сквозные отверстия-щели разной длины. Ширина трещин составила 0,5 мм. Для снижения влияния посторонних резонансов и акустического фона балку установили на двух опорах через виброизолирующие демпфирующие прокладки ДП (рис. 1). Колебания исследуемой точки поверхности среды регистрировали калиброванным малогабаритным ИСР-акселерометром 352A24 А1 фирмы PCB Piezotronics (США).

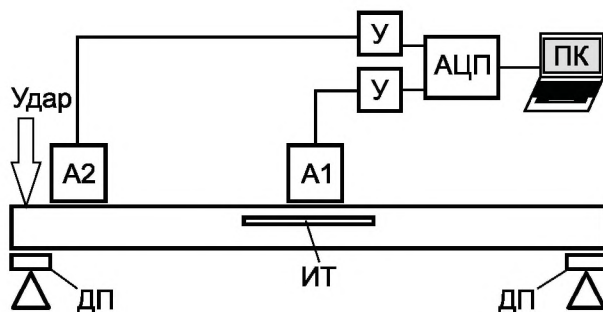


Рис. 1. Блок-схема эксперимента:

А1, А2 – основной и дополнительный акселерометры, соответственно; У – усилитель ZETLAB 440; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер; ДП – демпфирующие прокладки; ИТ – искусственная трещина

Сигнал акселерометра A1 усиливался предварительным ICP усилителем У ZETLAB 440. Аналоговые сигналы подавались на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП L-Card E14-140 и сохранялись для дальнейшей математической обработки в персональном компьютере ПК. Для синхронизации записи в зоне ударного возмущения подключили дополнительный акселерометр A2, дающий команду начала записи процесса (старт-триггер синхронизация). Ударное возмущение производилось электромагнитным ударным молотком, обеспечивающим постоянство условий возмущения во всех сериях измерений. На рис. 2 показана осциллограмма колебаний поверхности балки, зарегистрированная акселерометром. Для определения в образце дефекта и его параметров сигнал обрабатывали биспектральным методом [11]. Для этого возникшие колебания $\varphi(t)$, $t \in [0, T_n]$ фиксировали датчиком в течение временного интервала наблюдения T_n , достаточного для прихода отражённых волн от противоположного конца конструкции.

Распознавание дефекта по функциям отклика $\varphi(t)$ осуществляли на основе построенных признаков пространств диагностики χ . Для отображения обобщённого векторного топологического пространства $\mathbf{C}$ функций $\varphi(t)$ в пространство χ использовали ортогональное гомеоморфное отображение. Это отображение можно рассматривать как обобщённое спектральное разложение функций $\varphi(t)$ по ортонормированным базисным функциям $\{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots\}$ пространства χ вида [11]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i(t) &= \sum_{j=1}^{\infty} q_{ij} \chi_j(t); \\ [\varphi_i(t) \in \mathbf{C}] &\rightarrow [(q_{i1}, q_{i2}, \dots) \in \chi], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где q_i – коэффициенты разложения по базисным функциям.

С учётом того, что функция $\varphi_i(t)$ представлена конечным числом измерений N , т. е. $\varphi_i(t) \in \mathbf{R}^N$, ортогональное преобразование (1) можно представить как конечномерное в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i(t) &= q_0 + \sum_{j=1}^m q_{ij} \chi_j(t); \\ [\varphi_i(t) \in \mathbf{R}^N] &\rightarrow [(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im}) \in \mathbf{R}^m], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\mathbf{R}$ – векторное пространство действительных значений.

В соответствии с условием (2) график функции $\varphi_i(t)$ преобразуется в m -мерный образ $\mathbf{Q}_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im}) \in \mathbf{R}^m$. Ортонормированный базис $\{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m\}$ при этом является адаптивно настраиваемым, обучаемым и зависящим от типа преобразуемых функций $\varphi_i(t)$ в соответствии с изложенными ниже условиями.

Минимизация средней квадратической ошибки воспроизведения функции $\varphi_i(t)$ при фиксированном числе m ортонормированных функций должна иметь вид

$$\Delta = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\sum_{k=1}^N (H)^2 \right)^{1/2};$$

$$H = \varphi_i(k\Delta t) - \sum_{j=1}^m q_{ij} \chi_j(k\Delta t) - q_0,$$

где M – объём обучающей выборки; k – номер текущего из-

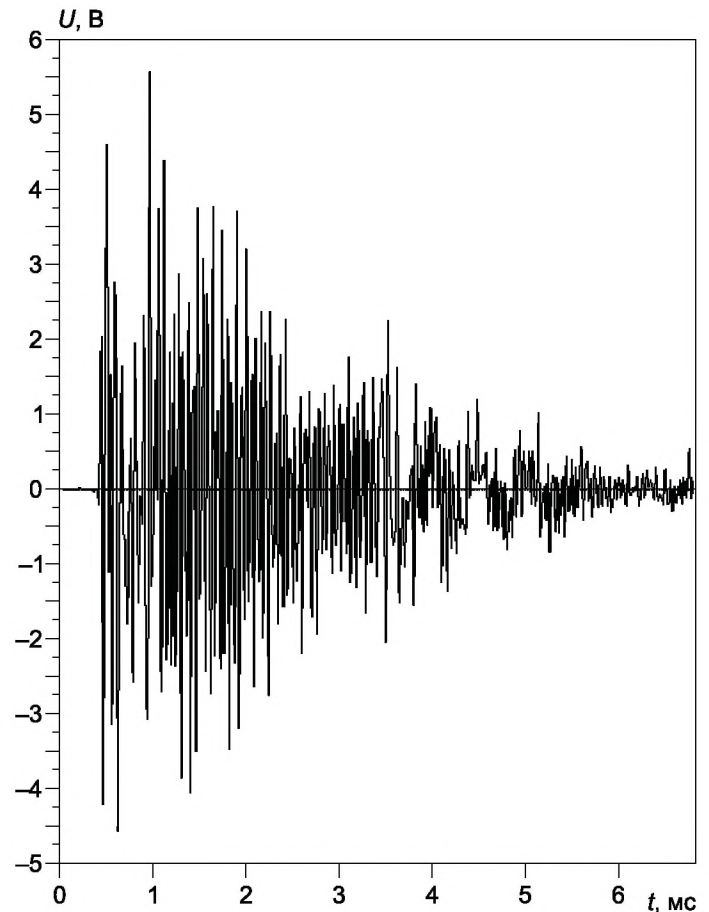


Рис. 2. Осциллограмма колебаний поверхности балки

мерения; Δt – шаг дискретизации по времени.

Ортонормированность базисных функций соответствует выражению

$$(\chi_i, \chi_j) = \begin{cases} 1, & i=j; \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad i, j = \overline{1, m}.$$

Обеспечение наибольшей разнесённости в признаковом пространстве образов, соответствующих различным типам дефектов, выглядит как

$$d^2(\mathbf{Q}_i, \mathbf{Q}_j) = \frac{1}{M} \sum_{i,j=1}^M \|\mathbf{Q}_i - \mathbf{Q}_j\|^2.$$

Для простоты графической и физической интерпретации дефектоскопия образцов осуществляется по образам $\mathbf{Q}_i = (q_{i1}, q_{i2}) \in \mathbf{R}^2$ в двумерном признаковом пространстве. Как показали исследования, указанная размерность признакового пространства достаточна для проведения качественной диагностики дефектов образцов.

Результаты исследований. Были проведены следующие эксперименты: исследование влияния глубины залегания дефекта на расположение образов в признаковом диагностическом пространстве; исследование размера дефекта на расположение образов в признаковом диагностическом пространстве.



Рис. 3. Расположение в пространстве распознавания образов функций откликов для балки, ослабленной трещиной с различной глубиной залегания:

1 – образец без дефектов; 2, 3 – образцы с трещинами шириной 0,5 мм, длиной 60 мм и глубиной залегания 12 и 3 мм, соответственно

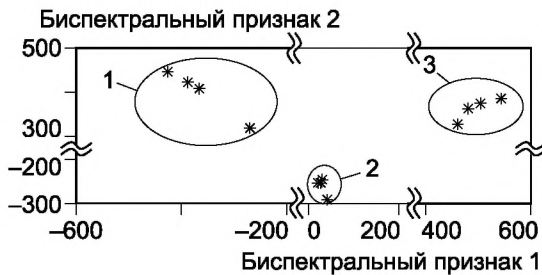


Рис. 4. Расположение в пространстве распознавания образов функций откликов для балки, ослабленной трещинами различной длины: 1, 2, 3 – для образцов с трещинами длиной 60, 80, 40 мм, соответственно

С учётом особенностей распространения волны в образце для анализа рассматривалась часть осциллограммы (см. рис. 2) длительностью 1 мс с шагом дискретизации по времени 2 мкс.

На рис. 3 приведены результаты построения признакового диагностического пространства. Показаны кластеры (выделены эллипсами) для алюминиевых балок квадратного сечения без дефектов и балок, ослабленных трещинами глубиной залегания 3 и 12 мм. Внутри кластеров расположены образы функций откликов (помечены звездочками) для различных балок. Для каждого варианта дефекта провели несколько измерений. Серия измерений демонстрирует достаточно высокую степень повторяемости регистрируемого сигнала.

На рис. 4 приведён результат построения признакового диагностического пространства и расположения образов функций откликов для балки без дефектов и балок, ослабленных трещиной различной длины, с глубиной залегания 8 мм. Показаны кластеры для балки без дефектов, балок с трещинами длиной 40, 60 и 80 мм. Из полученных результатов следует, что в пространстве распознавания имеется чёткое распределение образов функций откликов в зависимости от параметров трещины, т. е. длины и глубины её за-

легания. Это подтверждает эффективность предложенного биспектрального подхода к повышению информативности регистрируемых сигналов.

Заключение. Создана экспериментальная установка, позволяющая в лабораторных условиях контролировать параметры поверхностного волнового поля на образцах, ослабленных дефектами. Предложен и реализован биспектральный подход к обработке сигналов в задачах распознавания скрытых дефектов по функции отклика на поверхности среды. Данный подход основан на адаптивно-настраиваемом ортонормированном базисе. Использование предложенного подхода позволяет чётко распознавать параметры трещины, такие как длина и глубина залегания в диагностическом пространстве образов, что может представлять интерес при решении задач определения скрытых дефектов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-19-01676.

Л и т е р а т у р а

1. Ахтямов А. М., Каримов А. Р. Диагностирование полости в призматической балке // Дефектоскопия. 2013. № 3. С. 15–20.
2. Bocharova O. V. On inverse problem of identification the cavity in the elastic cylinder // J. Physics: Conference Series. 2014. V. 490. No. 1. P. 012057. DOI:10.1088/1742-6596/490/1/012057.
3. Есипов Ю. В., Мухортов В. М., Калинин В. В., Анджинович И. Е. О возможности раннего диагноза состояния стержневых конструкций с применением сегнетоэлектрических датчиков динамической деформации // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2010. № 4. С. 29–35.
4. Есипов Ю. В., Сазанов С. Н., Узунян А. М. Экспериментальная идентификация напряжённого состояния элементов стержневых конструкций // Измерительная техника. 2010. № 12. С. 32–35.
5. Есипов Ю. В., Акопьян В. А., Рожков Е. В. Испытательный стенд для анализа деформационных образов моделей стержневых конструкций // Измерительная техника. 2008. № 3. С. 31–33.
6. Белянкова Т. И., Анджинович И. Е., Шейдаков Д. Н. Резонансный мониторинг структуры слоисто неоднородной среды // Вестник Южного научного центра РАН, 2007. Т. 3. № 2. С. 3–8.
7. Белянкова Т. И., Калинин В. В. О взаимодействии осциллирующего штампа с предварительно напряжённым полупространством // Прикладная математика и механика. 1993. Т. 57. № 4. С. 123–134.
8. Белянкова Т. И., Калинин В. В. Динамика массивного тела, взаимодействующего с предварительно напряжённым полупространством // Известия РАН. Механика твёрдого тела. 1994. № 6. С. 83–94.
9. Бочарова О. В., Лыжов В. А., Анджинович И. Е. Некоторые особенности волновых полей на поверхности тел, ослабленных наличием дефектов // Вестник Южного научного центра РАН. 2013. Т. 9. № 2. С. 11–15.

10. Бочарова О. В., Анджинович И. Е., Ворович Е. И. К проблеме исследования поверхностных волновых полей с помощью тонкоплёночных сегнетоэлектрических датчиков // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. Т. 11. № 1. С. 30–35.

11. Седов А. В. Моделирование объектов с дискретно-распределёнными параметрами: декомпозиционный подход. М.: Наука, 2010

Дата принятия: 06.12.2016.

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

551.510

Оценка погрешности лидарных измерений концентрации радионуклидов в атмосфере

В. Е. ПРИВАЛОВ¹, В. Г. ШЕМАНИН²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vaepriv@yandex.ru

²Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, Россия

Выполнена оценка погрешности измерений концентраций радионуклидов цезия, стронция, криптона и ксенона в диапазоне 10^{10} – 10^{13} см⁻³ в атмосфере. Измерения произведены лидаром дифференциального поглощения и рассеяния с учётом ширины линии генерации лазерного излучателя из состава лидара при зондировании на расстояниях до 2 км. При относительной погрешности измерений концентрации радионуклида 25 % на длине волны 852,1 нм получены минимальная 70 м и максимальная 1000 м трассы зондирования для цезия концентрациями 10^{11} и 10^{10} см⁻³, соответственно.

Ключевые слова: лидар дифференциального поглощения и рассеяния, радионуклид, концентрация.

Error estimation of the cesium, strontium, krypton and xenon radionuclides concentration in the range of 10^{10} – 10^{13} cm⁻³ in the atmosphere measurements by the differential absorption and scattering lidar with the laser line accounting at the ranging distance up to 2 km has been fulfilled. The ranging distance minimal value in 70 m for the cesium concentration of 10^{11} cm⁻³ at the 852,1 nm wavelength and the maximal value of 1 km for the cesium concentration of 10^{10} cm⁻³ at the same wavelength have been got for the 25 % relative error of the radionuclide concentration measurement.

Key words: differential absorption and scattering lidar, radionuclide, concentration, relative error.

В работах [1, 2] предложено лидарное уравнение для дифференциального поглощения и рассеяния атмосферного аэрозоля газовыми молекулами в обратном направлении с учётом конечной ширины линии излучения лазера. Такой учёт конечной ширины линии генерации реального лазера позволяет уточнить решение лидарного уравнения [3], особенно для очень малых концентраций исследуемых молекул [1]. Потенциальные возможности метода дифференциального поглощения и рассеяния молекулами радионуклида йода в атмосфере для решения таких измерительных задач оценены в [4, 5]. При этом предполагалось, что линия генерации лазера является дельта-функцией. Авторы [1] выполнили численные расчёты лидарного уравнения для дифференциального поглощения и рассеяния атмосферного аэрозоля молекулами йода и показали, что можно уточнить решение лидарного уравнения для очень малых концентраций детектируемых молекул (порядка 10^{10} см⁻³), приняв во внимание конечную ширину линии генерации лазера.

Целью настоящей работы является оценка погрешности измерения концентраций радионуклидов цезия, стронция, криптона и ксенона в атмосфере. Измерения выполняли лидаром дифференциального поглощения и рассеяния с учётом ширины линии генерации лазера при зондировании загрязнения атмосферы указанными радионуклидами.

В лидаре дифференциального поглощения и рассеяния применяется двухволновый излучатель: лазерный луч с одной длиной волны попадает в центр полосы поглощения радионуклида, с другой – находится вне этой полосы. Этот прибор построен на базе моностатического лидара, у которого два лазерных луча распространяются вдоль оси приёмного телескопа [1, 3]. Оптическая схема прибора приведена на рис. 1.

В качестве лазерного излучения вне полосы поглощения радионуклида можно использовать излучение основной гармоники YAG: Nd-лазера 8 с импульсами длительностью 10 нс, энергией 35 мДж и частотой следования до 10 Гц на