электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Оптимизация многопараметрового неразрушающего контроля объектов на основе комплексирования измерительной информации

11, ноябрь 2014

Крайний В. И.

УДК: 620.192

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
vladk5@yandex.ru

Введение

В статье рассматривается системный подход к исследованию технического состояния материалов, конструкций и объектов с помощью методов неразрушающего контроля с использованием комплексирования измерительных устройств и проведения наблюдений во времени (накопления информации) для повышения качества и надежности обнаружения дефектов и повреждений.

Основными тенденциями обследования объектов с целью определения дефектов, повреждений и аномалий являются повышение точности определения дефектов, глубин обследования, усложнение решаемых задач. Наличие многих методов неразрушающего контроля (НК) не случайно: оно свидетельствует об отсутствии универсальных методов. Часто только рациональный выбор их комплексов позволяет достичь требуемого результата при неразрушающем контроле [1 − 5].

Под комплексированием устройств НК понимается их объединение в комплексную систему, осуществляющую совместную обработку информации и обеспечивающую повышение точности, помехозащищенности и надежности.

Необходимость комплексирования методов обусловлена тем, что многие из них, во-первых, некорректны: малым изменениям сигналов от аномалий, дефектов и повреждений могут соответствовать большие изменения их физико-геометрических параметров. Эта закономерность известна как принцип эквивалентности [6].

Во-вторых, по мере увеличения глубины обнаружения дефектов уменьшается отношения величины сигнала к уровню помех. В результате, несмотря на совершенствование методов, отношение сигнал/помеха увеличивается мало. По этим причинам определение параметров дефектов оказывается затрудненным, неоднозначным и недостоверным. Для

уменьшения некорректности необходимо применение ряда методов с разными физическими основами.

В статье рассмотрены вопросы обнаружения дефектов и аномалий при одновременном использовании нескольких методов неразрушающего контроля. Предложена классификация комплексирования на два вида: по информации на входе и на выходе устройств неразрушающего контроля. Для каждого из этих видов проведена постановка задачи и описано оптимальное решение по критерию отношения правдоподобия. Показано, что в случае комплексирования по информации на выходе устройств реализация системы проще, требует меньше вычислительных затрат и при этом могут использоваться уже выпускаемые промышленностью или имеющиеся в наличии приборы неразрушающего контроля. Для этого случая приведены выражения для расчета вероятности правильного обнаружения дефектов (аномалий) и ложной тревоги (ошибки второго рода) и рассмотрен пример, подтверждающий более высокие характеристики системы по сравнению с одним измерительным устройством.

Предварительные замечания

Эффективность выявления дефектов теми или иными физическими методами можно оценить с помощью математического и физического моделирования [6 − 8]. Проведя расчет сигналов, полученных от дефектов для разных методов, можно получить сравнительные характеристики через показатель контрастности:

$$\gamma = (A_{\max} - A_{ср}) / \sigma_{фон}, \qquad (1)$$

где $A_{ср} = \sum_{i=1}^{n} A_i / n$, $\sigma_{фон} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (A_i - A_{ср})^2 / n}$.

Здесь A_i, $A_{ср}$ и $A_{\max}$ – соответственно амплитуда измеренного сигнала при обследовании объекта в любой его точке, средняя по изучаемому участку с n точками наблюдений и максимальный сигнал над центром дефекта; $\sigma_{фон}$ - фоновое стандартное среднеквадратическое отклонение, характеризующее уровень помех и точность измерений.

На практике при выявлении дефектов используется эмпирическое правило "трех сигм и трех точек". Согласно этому правилу, обнаружение дефектов считается надежным, если они по амплитуде превышают $3\sigma_{фон}$, а по протяженности прослеживаются более чем в трех соседних точках наблюдения. Показателем надежности обнаружения дефекта является $\gamma \cdot m$, где m- ширина зоны дефекта на уровне $3\sigma_{фон}$.

Более универсальной характеристикой эффективности метода является энергетическое отношение аномалия/помеха

$$\gamma_э = \sum_{i=1}^{n} A_i^2 / \sigma_{фон}^2 = A_{ср}^2 n / \sigma_{фон}^2, \qquad (2)$$

где $\sigma_{фон}^2$ - общая дисперсия, зависящая от уровня помех и точности измерений.

В целом, эффективность того или иного метода определяется: природой физического процесса; наличием экранирующих включений с резко контрастными свойствами; неоднородностью среды, создающей помехи; интенсивностью помех, влияющих на величину $\sigma_{фон}$ и другими факторами.

Задача в общем плане сводится к математическому или физическому моделированию прямых и обратных задач для разных классов физических моделей. Наиболее распространенным классом являются одномерные модели, в которых физические свойства меняются в одном направлении, например, с глубиной. Это типично для однослойных или многослойных объектов. Основными инструментальными методами изучения таких объектов являются: тепловизионные, с помощью ультразвуковых, электромагнитных, акустических, упругих волн и другие [1 − 5].

Для анализа количественных признаков дефектов можно использовать коэффициенты контрастности γ_k (1) и $\gamma_{эk}$ (2), где *k*- номер метода. Повысить надежность выделения дефектов комплексом методов (*k* = 1, 2, 3, ..., *l*) можно с помощью функции комплексного показателя:

$$ФКП = \sum_{k=1}^{l} C_k \, |\gamma_k| ,$$

где l - число методов в комплексе; $|\gamma_k|$- абсолютное значение коэффициента контрастности; C_k - эвристический весовой коэффициент, устанавливаемый на основе общих теоретических или практических представлений.

На графиках ФКП максимумы соответствуют положениям центров самых достоверных дефектов.

При одновременном использовании нескольких методов неразрушающего контроля общая вероятность правильного обнаружения дефекта при взаимной независимости совместимых событий (операций контроля) может быть получена следующим образом [6].

Вероятность пропуска дефекта при совместном использовании l методов контроля равна

$$1 - D_c = \prod_{i=1}^{l} (1 - D_i) ,$$

где D_c - вероятность правильного обнаружения дефекта системой при совместном использовании l методов контроля; D_i - вероятность правильного обнаружения дефекта при использовании i – го метода контроля; $i = 1,...,l$.

Отсюда можно получить вероятность правильного обнаружения дефекта системой при совместном использовании l методов контроля:

$$D_c = 1 - \prod_{i=1}^{l} (1 - D_i) .$$

Основная часть

Комплексирование устройств НК можно классифицировать на следующие виды:

- по информации на входе устройств;
- по информации на выходе устройств.

При комплексировании по информации на входе устройств система комплексирования синтезируется на основе обработки сигналов, полученных в зоне дефекта. Информация представляет из себя векторный процесс на входе устройств. Такой подход позволяет получать максимальное количество информации из наблюдаемого процесса.

При комплексировании по информации на выходе устройств используется векторный процесс на выходе устройств после обработки. Такая система синтезируется с учетом ограничений, накладываемых использованием конкретных устройств. Качество обработки информации в этом случае может быть ниже, чем в первом случае. Тем не менее, комплексирование по информации на выходе устройств целесообразно, так как позволяет синтезировать оптимальную или квазиоптимальную систему с учетом тех устройств, которые производятся или уже имеются в наличии.

Общую задачу комплексирования устройств с целью обнаружения дефектов можно сформулировать следующим образом.

Пусть имеется l разных устройств, производящих обнаружение одного и того же дефекта. Рассмотрим задачу их оптимального комплексирования в двух вариантах: по информации на входе и выходе этих устройств.

При комплексировании по информации на входе наблюдаемый процесс y_{it} можно задать в общем виде

$$y_{it} = \vartheta s_{it} + \eta_{it} + \xi_{it};\ \ \vartheta = 0,1;\ \ 0 \le t \le T;\ \ i = 1,...,l$$

где $s_{it}, \eta_{it}, \xi_{it}$ - полезный сигнал, внешняя помеха и собственный шум i-го устройства соответственно.

Поскольку устройства в общем случае имеют разные физические принципы работы, то все сигналы на входах устройств будут разными, даже если они получены от одного дефекта. При этом некоторые сигналы могут отсутствовать: $s_{jt} = 0,,\ \ 0 \le t \le T$ если соответствующие устройства не обнаружили дефект.

Если распределения вероятностей сигналов, помех и шумов известны, то задача обнаружения сводится к проверке гипотезы $\vartheta = 1$ при альтернативе $\vartheta = 0$. Оптимальное решение находится по критерию отношения правдоподобия

$$\Lambda(y) \equiv \frac{w(y\,|\,1)}{w(y\,|\,0)} \ge h\,,$$

где $w(y\,|\,1)$ и $w(y\,|\,0)$ - плотности распределения вероятности наблюдаемой реализации y случайного процесса при наличии и отсутствии дефекта соответственно.

При использовании критерия Неймана − Пирсона порог h определяется заданной вероятностью ложной тревоги (ошибки второго рода).

Однако такая система может оказаться сложной, так как ее реализация связана с передачей между устройствами и обработкой в ПК или вычислителе большого объема информации.

Гораздо проще реализуется система во втором случае − с комплексированием информации на выходе устройств. В этом случае каждое из устройств решает задачу обнаружения дефекта независимо друг от друга, а комплексирование осуществляется путем совместной обработки выходных данных устройств, т.е. результатов их решений о наличии или об отсутствии дефекта. Решение по-прежнему принимается на основе использования отношения правдоподобия, с той разницей, что для его вычисления используются не сигналы (например, отраженные) от дефектов как в предыдущем случае, а решения устройств.

Пусть *i*-е устройство (*i*=1,…,*l*), реализующее некоторую решающую функцию $\delta_i(\cdot)$, в результате наблюдения на отрезке [0, *T*] процесса y_{it} принимает решение $\delta_i(y_{i0}^T)=1$ о наличии сигнала и решение $\delta_i(y_{i0}^T)=0$ об его отсутствии с вероятностями правильного обнаружения D_i и ложной тревоги F_i.

Для повышения качества и надежности обнаружения дефектов и повреждений объектов, при низком отношении сигнал- шум (малый размер дефекта, большая глубина его расположения) необходимо использовать наблюдения (накопление информации) во времени. В этом случае на выходах устройств имеем случайный вектор $\delta_1,...,\delta_l$, компоненты которого принимают значения 0 или 1 с вероятностями

$$P(\delta_i=1\,|\,\vartheta=1)=D_i, P(\delta_i=0\,|\,\vartheta=1)=1-D_i,$$

$$P(\delta_i=1\,|\,\vartheta=0)=F_i, P(\delta_i=0\,|\,\vartheta=0)=1-F_i. \qquad (3)$$

По критерию отношения правдоподобия по наблюдениям $\delta_1,...,\delta_l$ выносится решение d_1 о наличии дефекта или d_0 об его отсутствии в соответствии с правилом

$$\Lambda_l \equiv \frac{P(\delta_1,...,\delta_l\,|\,\vartheta=1)}{P(\delta_1,...,\delta_l\,|\,\vartheta=0)} \geq h_l\,.$$

Конкретизируя отношение правдоподобия Λ_l с учетом (1) и статистической независимости δ_l по *i*, можно получить [8]

$$\sum_{i=1}^{l}\delta_i \ln[\frac{D_i(1-F_i)}{F_i(1-D_i)}] \geq h\,. \qquad (4)$$

Этот алгоритм дает решение задачи оптимального комплексирования измерительных устройств с использованием их выходной информации.

Согласно (4), решения $\delta_i=1$, формируемые устройствами, суммируются с весами $\mu_i=\ln[D_i(1-F_i)/F_i(1-D_i)]$.

Если вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги измерительных устройств одинаковы, т.е. $D_i=D,\ \ F_i=F$, $i=1,...,l$ то весовые коэффициенты становятся

одинаковыми $\mu_i = \mu$ и их можно опустить без потери оптимальности. Порог h выбирается по вероятности ложной тревоги F_c (ошибке второго рода), заданной для системы измерительных устройств (критерий Неймана- Пирсона). Синтезированная система по принципу действия аналогична бинарному накопителю, подсчитывающему число единиц и сравнивающему накопленную величину с порогом. Величина (4) в этом случае имеет биномиальное распределение вероятностей. Характеристики обнаружения системы D_c, F_c рассчитываются аналогично характеристикам одного устройства [8]:

$$D_c = \sum_{m=h}^{l} C_l^m D^m (1-D)^{l-m} ,$$

где $C_l^m = l!/[m!(l-m)!]$ - число сочетаний из l по m; порог h – наибольшее целое число, удовлетворяющее неравенству

$$F_c \le \sum_{m=h}^{l} C_l^m F^m (1-F)^{l-m} .$$

Для этого случая при количестве измерительных устройств l = 5 (при D = 0,7 и F = 0,1 для каждого измерительного устройства) характеристики обнаружения $D_c(h)$, $F_c(h)$ в зависимости от порога h приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

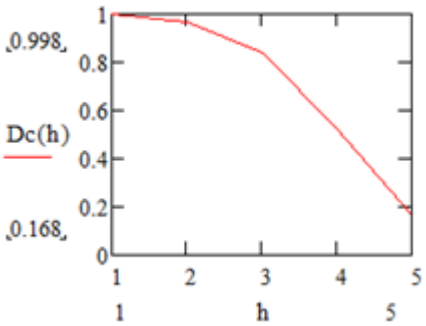

Рис. 1 Вероятность правильного обнаружения системы Dc в зависимости от величины порога h

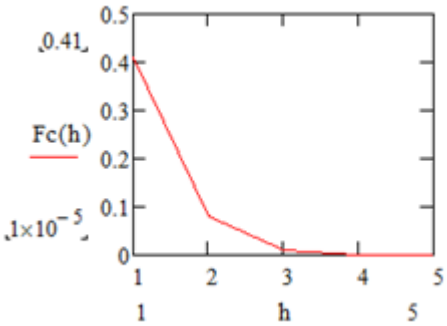

Рис. 2 Вероятность ложной тревоги системы Fc в зависимости от величины порога h

Из графиков видно, что, например, при $h = 2$ ($D_c = 0{,}969$, $F_c = 0{,}081$) и $h = 3$ ($D_c = 0{,}837$, $F_c = 8{,}56 \cdot 10^{-3}$) характеристики системы лучше по сравнению с одним измерительным устройством.

Как показано в [8], в результате описанного комплексирования l устройств отношение сигнал − шум увеличивается по сравнению с отношением сигнал- шум на выходе одного устройства (для устройств с оптимальной обработкой сигналов в l раз, если характеристики устройств одинаковы). При этом уменьшаются ошибки измерения параметров дефектов, что приводит к повышению качества и достоверности их оценки комплексной системой измерительных устройств.

Для выделения трудно обнаруживаемых (малых, глубокорасположенных) дефектов можно использовать различные методы: распознавание образов; дискриминантный, кластерный, факторный и другие виды анализа. Сущность их сводится к изучению сигналов, полученных от известных дефектов на этапах обучения. При исследовании используются математические методы оценки признаков таких дефектов [7, 9 − 10]. При проведении обследования объекта эти признаки используются при распознавании обнаруженных аномалий, которые могут быть потенциальными дефектами.

Заключение

Показано, что в случае комплексирования по информации на выходе устройств неразрушающего контроля реализация системы проще, требует меньше вычислительных затрат и при этом могут использоваться уже выпускаемые промышленностью или имеющиеся в наличии приборы. Для этого случая приведены выражения для расчета вероятности правильного обнаружения дефектов (аномалий) и ложной тревоги (ошибки второго рода). Расчеты подтверждают более высокие характеристики системы по сравнению с одним измерительным устройством.

Список литературы

1. Крайний В.И. Разработка метода комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля для обнаружения внутренних дефектов сложных конструкций // «Наука и образование». МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 10. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/615195.html (дата обращения 10.2013).
2. Бекаревич А.А., Будадин О.Н., Крайний В.И., Пичугин А.Н. Исследование возможности комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля сложных конструкций // «Контроль. Диагностика», № 2 (176), 2013, с.75-80.
3. Крайний В.И., Будадин О. Н. Оптимизация комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля подземных аномалий и объектов // XIX Международная научно- техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Во-

ронеж, 16-18 апреля 2013 г.): труды. Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО. 2013. Т. 1. С. 698 – 703.

4. Будадин О.Н., Филипенко А.А., Муханов Е.Е., Крайний В.И., Троицкий-Марков Т.Е. Повышение достоверности результатов дефектоскопии сложных конструкций из композитных материалов на основе комплексирования многопараметровой информации // Девятнадцатая международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (Гурзуф, 3-7 октября 2011 г): труды. Гурзуф – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2011, с. 121-128.
5. Будадин О.Н., Крайний В.И., Сучков В.И., Троицкий-Марков Т.Е Способ многопараметрового контроля строительных конструкций (транспортных туннелей, зданий, сооружений и др.): пат. 2467318 Российская Федерация. 2011. 17 с.
6. Кузнецов О.Л., Никитин А.А. Геоинформатика. М.: Недра, 1992. 302 с.
7. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
8. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. М.: Радио и связь, 1992. 304 с.
9. Capineri L., Falorni P., Ivashov S. and etc. Combined Holographic Subsurfac Radar and Infrared Termography for Diagnosis of the Conditions of Historical Structures and Artworks. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-5343-2, 2009 EGU General Assembly, 2009.
10. Yella S., Dougherty M.S. and Gupta N.K., Artificial intelligence techniques for the automatic interpretation of data from non-destructive testing, Insight, Vol. 48, No 1, jan. 2006, pp. 10-19.