

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# *ДЕФЕКТОСКОПИЯ*

№ 2

*ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК*

2012

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*В.И. Крайний, О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков*

Рассмотрены основные принципы и методы комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля с целью обнаружения аномалий, дефектов и повреждений в различных объектах и конструкциях. Приведены результаты разработки алгоритма комплексирования методов неразрушающего контроля, направленных на решение поставленных задач, на основе методов оценки эффекта телескопирования и построения многомерных аналогов способов обратных вероятностей и результаты экспериментов.

*Ключевые слова:* методы комплексирования, многопараметровый неразрушающий контроль, надежность обнаружения аномалий, дефекты, конструкции.

Современное развитие техники и технологий обеспечения безопасности эксплуатации сложных технических систем невозможно без применения методов неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики [1—4].

К настоящему времени сформировались четыре основных направления в развитии НК:

совершенствование аппаратуры контроля;

совершенствование методического обеспечения (математическое моделирование, методы обнаружения дефектов и т. д.);

контроль объекта одновременно несколькими методами (с использованием существующей аппаратуры) с последующей совместной обработкой полученных результатов (комплексирование) с целью оптимизации использования методов и режимов контроля для решения поставленных задач;

проведение организационных мероприятий по минимизации рисков эксплуатации объектов (выпуск распорядительной документации — приказы, распоряжения и т. д.; организация саморегулируемых организаций, кластеров и т. д.).

Анализ этих направлений показывает следующее.

В настоящее время существует многообразие аппаратуры НК, при этом ее совершенствование идет по пути повышения точности и расширения функциональных возможностей, то есть создается универсальная аппаратура для различных областей применения, что не всегда технически и экономически оправдано. Создание новой специальной аппаратуры экономически не всегда оправдано вследствие больших финансовых, временных затрат и времени окупаемости.

---

Владимир Иванович Крайний, канд. техн. наук, директор по реализации федеральных программ ООО «Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», Москва. Тел. (499) 237-7288. vik@wemo.ru

Олег Николаевич Будадин, доктор техн. наук, профессор, директор по науке, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, член-корр. Российской инженерной академии. ООО «Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», Москва. Тел. (499) 237-7288. budadin@wemo.ru, oleg.budadin@yandex.ru

Тимур Евгеньевич Троицкий-Марков, председатель совета директоров, почетный изобретатель Москвы. ООО «Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», Москва. Тел. (499) 237-7288. E-mail: info@wemo.ru



Более эффективным с точки зрения авторов является направление создания специального методического и программного обеспечения НК с применением существующего аппаратного парка. Это направление имеет меньшие финансовые затраты, однако требует достаточно больших трудозатрат на отработку технологии контроля и не дает возможность оперативного расширения области применения аппаратуры и технологий НК.

Что касается четвертого направления развития, то несмотря на большую рекламную компанию до настоящего времени оно никак себя не позиционировало с точки зрения повышения технической и экономической эффективности НК, отсутствуют четко сформулированные перспективы решения конкретных технических задач и т. д. Поэтому наиболее актуально с технической точки зрения и экономически эффективно решение задач повышения безопасности эксплуатации технических объектов с использованием методов НК на основе третьего направления — комплексирования.

В последнее время появляется все больше публикаций, свидетельствующих о тенденции комплексирования методов НК для обеспечения необходимой достоверности и информативности результатов контроля, например, [5—14]. Общий недостаток предлагаемых работ заключается в отсутствии совместной обработки данных и оптимизации режимов контроля.

В статье приведены результаты разработки алгоритма комплексирования методов неразрушающего контроля на основе оценки эффекта телескопирования и построения многомерных аналогов способов обратных вероятностей. Экономическая выгода заключается в возможности использования существующего парка технических средств и соответственно сокращения финансовых и временных затрат на внедрение технологии контроля, а техническая выгода заключается в достаточно большой универсальности технологии контроля и повышении достоверности и оперативности результатов контроля.

Основными тенденциями обследования объектов с целью определения аномалий структуры, конструкции и т. д. являются повышение достоверности определения аномалий и расширение области использования аппаратуры и технологии контроля. Наличие многих методов неразрушающего контроля не случайно: оно свидетельствует об отсутствии универсальных методов. Часто только рациональный выбор их комплексов позволяет достичь требуемого результата при неразрушающем контроле. Под комплексированием устройств НК понимается их объединение в комплексную систему, осуществляющую совместную обработку информации и обеспечивающую повышение достоверности, помехозащищенности и надежности.

Необходимость комплексирования методов обусловлена также 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 [15]. Во-вторых, по мере увеличения трудностей обнаружения аномалий и дефектов уменьшается отношение величины сигнала к уровню помех. В результате несмотря на совершенствование методов, отношение сигнал/помеха увеличивается мало. По этим причинам определение параметров аномалий и дефектов оказывается затрудненным, неоднозначным и недостоверным. Для уменьшения некорректности необходимо применение ряда методов с разными физическими основами.



Комплексирование устройств НК можно разделить на следующие виды:

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

В первом случае система комплексирования синтезируется на основе обработки сигналов, полученных в зоне аномалии или дефекта, и представляет собой 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. 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.

Создание комплексных систем неразрушающего контроля подразумевает использование различных физических полей на разных уровнях наблюдения (на некотором расстоянии, на поверхности или внутри объектов: оборудования, конструкций, зданий, грунта и т. д.). Это существенным образом расширяет информацию об изучаемых объектах и процессах и возможности ее обработки и интерпретации на персональном компьютере с целью решения различных задач. Комплексный характер информации обуславливает необходимость использования системного анализа при обработке и интерпретации данных.

Большое значение приобретает проблема комплексирования многопараметровой информации. Принципы системного анализа основываются на положении, что процессы, происходящие внутри объекта и на его поверхности, взаимосвязаны. Система неразрушающего контроля должна включать комплексную компьютерную обработку на основе использования разных физических полей (теплового  $T(x, y, z, t)$ , радиоволнового  $U_p(x, y, z, t)$ , ультразвукового  $U_{y,z}(x, y, z, t)$  и других видов), ее интеграцию при разных уровнях зондирования (на некотором расстоянии от объекта контроля, на его поверхности, внутри объекта контроля) и комплексирование информации как по методам, так и по уровням с целью определения векторных параметров  $\mathbf{d}$  аномалий или дефектов  $F_{\text{def}}(\mathbf{d})$

$$f(T(x, y, z, t), U_p(x, y, z, t), U_{y,z}(x, y, z, t), \dots) \rightarrow F_{\text{def}}(\mathbf{d})|_{t=t_0}$$

На практике системный анализ сводится к тому, что оптимизируются отдельные элементы системы и устанавливается их влияние на эффективность системы в целом. Например, максимизируется величина энергетического отношения сигнал/помеха в многомерном (разные методы и много уровней) пространстве с целью решения задачи обнаружения аномалий, дефектов и повреждений обследуемых объектов. Комплексная же оптимизация труднореализуема из-за сложности обработки большого объема регистрируемой информации, принципа эквивалентности и неоднозначности решения обратных задач для разных методов.

При решении задач обнаружения аномалий и дефектов по одному полю или по комплексу полей можно максимизировать либо пиковое, либо энергетическое отношение сигнал/помеха в многомерном пространстве этих полей. Это при разных априорных ограничениях, накладываемых на полезный сигнал и помеху, приводит к использованию приемов распознавания образов (многомерные аналоги способов обратных вероятностей и самонастраивающейся фильтрации, метод главных компонент и т. д.) для



комплекса полей [15—17]. Следующий этап системного анализа — оптимальный выбор стратегии, обеспечивающей достижение цели управления. Например, оптимальный комплекс методов при решении задачи поисков аномалий и дефектов может быть выбран путем минимизации функции потерь, включающей энергетическое отношение сигнал/помеха, рассчитываемое для любого набора физических полей.

Так как исходная информация регистрируется на разных уровнях, практически все конкретные приложения связаны с анализом корреляционных (ковариационных) матриц измеряемых полей и признаков. Размерность этих матриц зависит от числа уровней наблюдения регистрируемых полей и признаков, от числа точек наблюдения на каждом уровне и т. д.

Для решения задачи обнаружения дефектов по данным комплекса разных методов и с учетом многоуровневых наблюдений могут применяться следующие методы: оценки эффекта телескопирования; построения многомерных аналогов способов обратных вероятностей (при наличии априорной информации о форме аномалий) и самонастраивающейся фильтрации (при отсутствии информации о форме аномалий) [15] и т. д. Далее будут рассмотрены методы оценки эффекта телескопирования и построения многомерных аналогов способов обратных вероятностей.

Обнаружение аномалий, дефектов основано на принципах расширения площади исследования и сохранения их проявлений в физических полях разного уровня [15], что выражается в эффекте телескопирования аномалий этих полей. Последний заключается в совпадении аномалий по всем уровням и уменьшении их размеров при переходе к более низкому уровню. Этот эффект проявляется в телескопичности аномальных значений:

комплексного параметра (или меры сходства), полученного на разных уровнях при обработке данных с помощью алгоритмов распознавания образов;

энергетического отношения сигнал/помеха, полученного по результатам обработки полей разного уровня.

При использовании одного метода для обнаружения аномального эффекта, создаваемого, например, дефектом на трех разных уровнях, используется количественная оценка эффекта телескопирования (в  $i$ -й точке)  $\rho_i$  [15], соответствующая отношению аномалия/помеха при многоуровневом наблюдении и равная следующей квадратичной форме:  $\rho_i = X^T D^{-1} X$  или

$$\rho = [X_1, X_2, X_3] \begin{bmatrix} 1/D_1 & & \\ & 1/D_2 & \\ & & 1/D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  — векторы либо наблюдаемых значений поля, либо значений комплексного параметра (мер сходства) на трех уровнях наблюдений (1, 2 и 3);  $1/D_1, 1/D_2, 1/D_3$  — величины, обратные дисперсиям значений поля или мер сходства на разных уровнях.

При измерениях по площади векторы  $X_1, X_2, X_3$  представляют собой квадратные или прямоугольные матрицы, размеры которых определяются величиной двумерного “окна” на каждом уровне съемки. Количество точек для интервала или “окна” каждого уровня съемки определяют априорными размерами искомой аномалии, в качестве их оценок используют значения интервалов корреляции, вычисляемые по одно-



мерным или двумерным автокорреляционным функциям наблюдаемых полей.

Выражение (1) справедливо для некоррелированных помех, в противном случае в обратной корреляционной матрице помех  $D^{-1}$  следует учитывать корреляционные свойства. Значения  $D_1, D_2, D_3$  определяются на участках, о которых точно известно, что там нет аномалий. Текущее значение величины  $\rho$  определяют путем перемещения заданных по размерам интервала или "окна" в пределах наблюдаемых значений.

Решение об аномальности величины  $\rho_i$  следует принимать на основе применения статистики (критерия) Фишера [15]. При  $\rho_i > \rho_n$ , где  $\rho_n$  определяется по таблицам распределения статистики Фишера для заданных степеней свободы и вероятности ошибки первого рода (пропуска сигнала), принимается решение о наличии эффекта телескопирования и соответственно аномалии.

В том случае, когда имеются наблюдаемые значения по разным методам и по разным уровням одновременно, обратная корреляционная матрица  $D^{-1}$  превращается в блочную матрицу (матрицу матриц), а вектор  $X$  — в матрицу, число строк которой определяется числом уровней. Например, для двух уровней и трех полей, наблюдаемых по каждому уровню, выражение (1) приобретает вид

$$\rho = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{21} & X_{31} \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/D_{11} & & 0 \\ & 1/D_{21} & \\ 0 & & 1/D_{31} \end{bmatrix} & [0] \\ [0] & \begin{bmatrix} 1/D_{12} & & 0 \\ & 1/D_{22} & \\ 0 & & 1/D_{32} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \\ X_{31} & X_{32} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где первый индекс в обозначениях  $X$  и  $D$  соответствует номеру метода, а второй — номеру уровня. Если наблюдаемые значения представляют собой данные, измеренные по некоторой площади при использовании комплекса полей и при этом на разных уровнях, то выражение (2) превращается в перемножение блочной матрицы  $X$ , каждое значение  $X_{ij}$  — матрица, число блоков которой определяется числом уровней, на двойную блочную матрицу  $D^{-1}$ , то есть матрицу матриц, где число блоков первого порядка определяется числом методов, а число блоков второго порядка определяется числом уровней.

Оценка эффекта телескопирования (1) положена в основу при обобщении рассматриваемого далее способа обратных вероятностей для комплекса одновременно наблюдаемых физических полей (или нескольких уровней наблюдения одного и того же поля). Надежность обнаружения комплексной аномалии  $\gamma$  определяется суммой значений энергетических отношений аномалия/помеха, рассчитанных для каждого  $l$ -го поля (или  $l$ -го уровня), то есть  $\rho = \sum \rho_l$ ,  $l = 1, \dots, L$ , где  $L$  — число полей (или число уровней наблюдения) [15].

Величина надежности обнаружения  $\gamma$  рассчитывается с помощью интеграла вероятности

$$y = \Phi\left(\sqrt{\rho/2}\right) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\sqrt{\rho/2}} e^{-x^2/2} dx. \quad (3)$$

Способ обратных вероятностей для обнаружения аномалий, дефектов может быть сформулирован следующим образом. В  $i$ -й точке наблюдаемые значения представляются  $L$ -мерным вектором  $Y_i = (y_{1i}, \dots, y_{Li})$ , компоненты которого  $y_{1i}, \dots, y_{Li}$  являются значениями по отдельным полям или уровням.

Наблюдаемые значения в  $i$ -й точке  $Y_i$  являются суммой векторной аномалии  $A_i = (a_{1i}, \dots, a_{Li})$  и помехи  $N_i = (n_{1i}, \dots, n_{Li})$ , то есть  $Y_i = A_i + N_i$  или только помехи  $Y_i = N_i$ . Здесь  $a_{1i}, \dots, a_{Li}$  — заданные по форме аномалии для каждого поля или уровня. Предполагается, что векторная помеха  $n_{1i}, \dots, n_{Li}$  имеет  $L$ -мерное нормальное распределение с нулевым средним и матрицей  $D$ , а также, что помехи для каждого поля не коррелированы.

Задача обнаружения  $L$ -мерной аномалии может быть сформулирована следующим образом: для интервала из  $m$  точек (интервал  $m$  оценивается для наиболее протяженной аномалии) и  $L$  полей или уровней определить, являются ли наблюдаемые сигналы суммой известных по форме аномалий и  $L$ -мерной помехи (ненулевая статистическая гипотеза  $H_1$ )  $Y_i = A_i + N_i$ ,  $i = 1, \dots, m$  или являются только помехой по каждому полю в отдельности  $Y_i = N_i$ ,  $i = 1, \dots, m$  (нулевая статистическая гипотеза  $H_0$ ).

Форму аномалии по каждому полю получают, как и в одномерном варианте способа, из решения прямых задач. Величину дисперсии помехи оценивают на участке, о котором точно известно, что аномалии или дефекты на нем отсутствуют.

По аналогии с одномерным вариантом способа обратных вероятностей можно получить выражения для функций правдоподобия для гипотез  $H_1$  и  $H_0$  —  $P(Y/H_1)$  и  $P(Y/H_0)$  соответственно, тогда отношение правдоподобия с учетом предположения о некоррелированности помехи для разных полей имеет вид

$$\Lambda = P(Y/H_1)/P(Y/H_0) = \exp \left[ \sum_i Y_i' D^{-1} A_i - (1/2) \sum_i A_i' D^{-1} A_i \right]. \quad (4)$$

При  $\Lambda > 1$  выполняется гипотеза  $H_1$ , при  $\Lambda \leq 1$  — гипотеза  $H_0$ . Апостериорная вероятность наличия аномалии  $p(H_1/Y)$  рассчитывается по формуле Байеса (формуле обратных вероятностей), которая в данном случае принимает вид

$$p(H_1/Y) = \Lambda / (\Lambda + 1). \quad (5)$$

При  $p(H_1/Y) > 0,5$  принимается решение о наличии аномалии  $A_i$ , при  $p(H_1/Y) \leq 0,5$  — об ее отсутствии.

Надежность обнаружения  $\gamma$  аномалии вычисляется с помощью интеграла вероятности (3), для которого верхним пределом служит обобщенное энергетическое отношение аномалия/помеха  $\rho = A' D^{-1} A$

$$\gamma = \Phi\left(\sqrt{A' D^{-1} A/2}\right). \quad (6)$$

Аналогично величине  $A' D^{-1} A$  можно рассчитать выражение  $Y' D^{-1} A$  в формуле (4), в которой компонентами вектора  $Y$  являются наблюдаемые



значения в  $m$  точках каждого поля или уровня. В случае одновременного наблюдения разными методами и на разных уровнях корреляционная матрица становится блочной, а векторы  $A_i$  и  $Y_i$  превращаются в матрицы.

Рассмотренный способ повышения надежности обнаружения аномалий с использованием комплексирования информации был использован при многопараметровом неразрушающем контроле подземных инженерных коммуникаций (бетонных труб). Использовались три метода контроля: радиолокационный метод подпочвенного зондирования, тепловой, ультразвуковой.

| Методы   | Назначение  | Область применения  |
|--|---|---|
| Метод подпочвенной радиолокации (радиоволновый контроль) | НК диэлектрических, композитных и других материалов. Для изделий из металлов — только измерение геометрических размеров. Информационное поле — электромагнитная волна. Регистрируемый параметр (информационный признак) — диэлектрическая проницаемость   | НК конструкций, сооружений, зданий, фундаментов и грунта  |
| Тепловой   | Обнаружение внутренних и наружных дефектов (раковин, полостей, трещин, инородных включений, отклонений физических свойств объекта контроля от нормы, наличие мест локального перегрева (охлаждения) и т. д.). Информационное поле — тепловое (инфракрасное) излучение. Регистрируемые параметры — теплотехнические характеристики объекта | НК различного оборудования во время работы (энергетического, электрического и др.), конструкций, зданий, трубопроводов, кабелей и т. д. |
| Ультразвуковой   | Обнаружение несплошностей и неоднородностей, определение их координат и размеров. Информационное поле — у. з. волна. Регистрируемый параметр — затухание на границе раздела сред  | НК твердых тел (металлы и неметаллы)  |

В таблице приведены краткие характеристики методов, их назначение и области применения применительно к решаемой задаче.

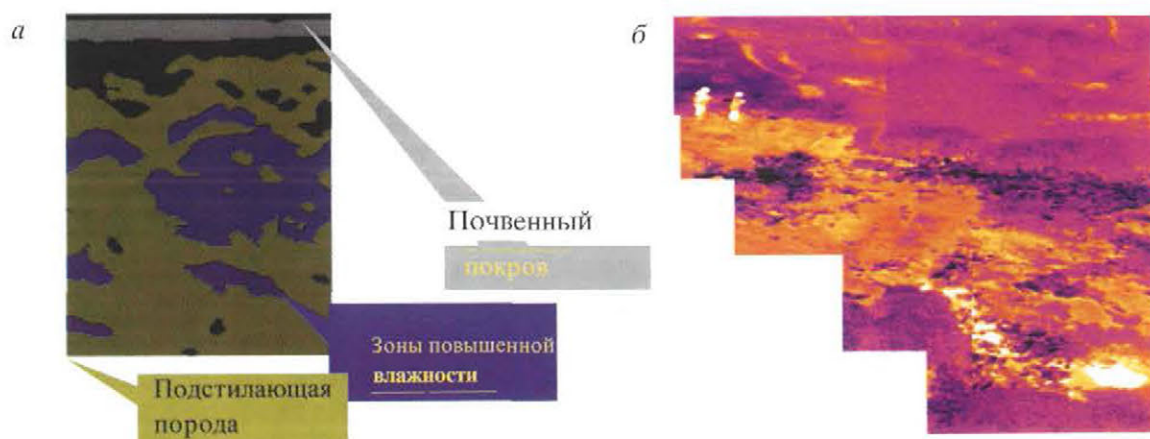
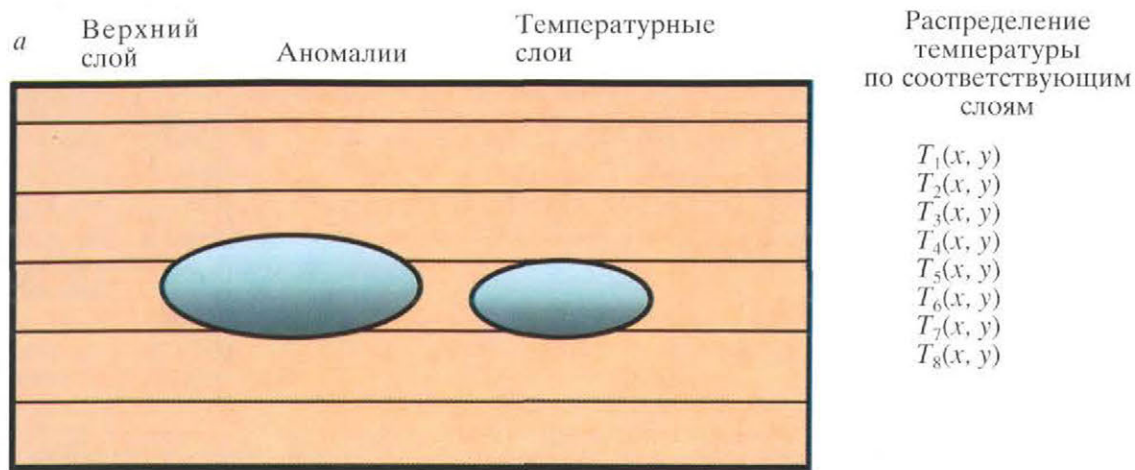


Рис. 1. Синтезированное пространственное распределение диэлектрической проницаемости в подповерхностном слое по результатам контроля методом подпочвенной радиолокации (радиоволновый контроль) — *а*; распределение температурного поля на поверхности Земли над контролируемым объектом — *б*.

На рис. 1 и 2 в качестве примера приведены результаты контроля двумя методами — тепловым (температурное поле поверхности Земли



как отклик на внутренние дефекты типа нарушения герметичности) и методом подпочвенной радиолокации (значение диэлектрической проницаемости в подповерхностном слое).



Внутреннее пространство

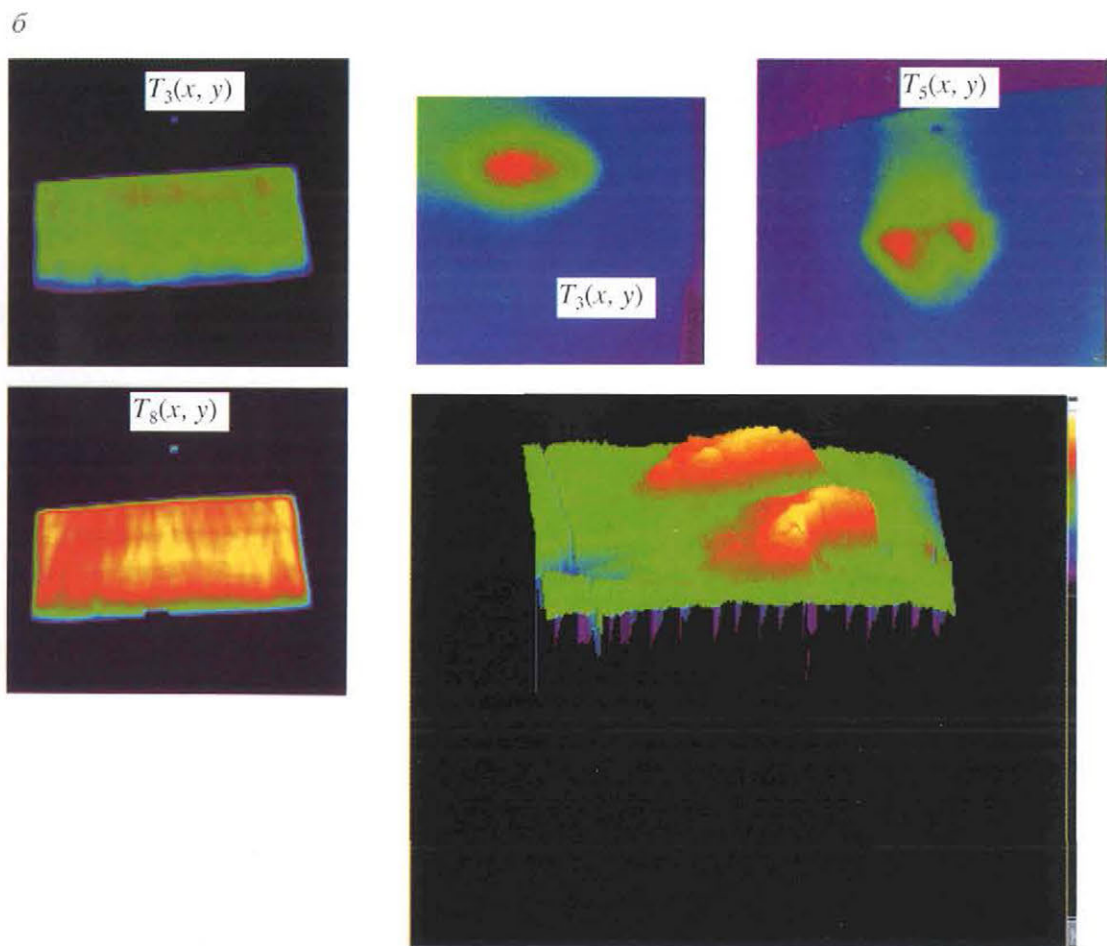


Рис. 2. Пример синтезирования распределения температурного поля подземного трубопровода:

*a* — послойное; *б* — пространственное.

Рассмотрим два примера оценки результатов комплексирования методов попарно: теплового и подпочвенной радиолокации, теплового и ультразвукового.

В первом случае (совместное использование теплового метода и подпочвенной радиолокации) приведем пример расчета квадратичной формы  $A'D^{-1}A$ . Для первого поля аномалия характеризуется значениями  $a_{11} = 0,5$ ;  $a_{12} = 2$ ;  $a_{13} = 0,5$ , дисперсия помехи  $D_1 = 4$ , для второго — аномалия  $a_{21} = 0,1$ ;  $a_{22} = 0,3$ ;  $a_{23} = 0,1$ , дисперсия  $D_2 = 0,1$ . В этом случае величина  $\rho = A'D^{-1}A$  равна

$$\rho = \begin{bmatrix} 0,25 & & & & & & 0 \\ & 0,25 & & & & & \\ & & 0,25 & & & & \\ & & & 10 & & & \\ & & & & 10 & & \\ & & & & & 10 & \\ 0 & & & & & & 10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,5 \\ 2 \\ 0,5 \\ 0,1 \\ 0,3 \\ 0,1 \end{bmatrix} = 2,225.$$

В соответствии с (6) значение надежности комплексного обнаружения аномалии  $\gamma = 0,7$ , в то время как при использовании только первого поля  $\gamma = 0,55$  ( $\rho_1 = 1,125$ ), второго —  $\gamma = 0,54$  ( $\rho_2 = 1,1$ ).

Во втором случае (совместное использование теплового и у. з. методов) для первого поля значения аномалии остаются теми же, что и в первом примере, а для второго поля — аномалия  $a_{21} = 0,2$ ;  $a_{22} = 0,4$ ;  $a_{23} = 0,2$ , дисперсия  $D_2 = 0,3$ . В этом случае величина  $\rho = A'D^{-1}A = 2,325$ .

Значение надежности комплексного обнаружения аномалии  $\gamma = 0,72$ , а при использовании только первого поля  $\gamma = 0,55$  ( $\rho_1 = 1,125$ ), второго —  $\gamma = 0,56$  ( $\rho_2 = 1,2$ ). Как следует из этих примеров, комплексирование двух методов позволяет увеличить надежность обнаружения аномалии (дефекта) на 30 %.

## ВЫВОДЫ

Использование рассмотренного метода комплексирования на основе способа обратных вероятностей для комплекса одновременно наблюдаемых физических полей позволяет существенно повысить надежность и достоверность обнаружения аномалий (дефектов). Комплексирование также дает экономический эффект за счет отказа от создания специальной дорогой аппаратуры и использования существующей аппаратуры при увеличении надежности обнаружения аномалий.

ООО «Технологический институт  
энергетических обследований, диагностики  
и неразрушающего контроля «ВЕМО»  
Москва

Поступила в редакцию  
26 августа 2011 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н. А. Анализ и управление безопасностью технических объектов на основе концентрации рисков.— М.: Научно-промышленный союз «РИСКОМ», 2011, с. 2—5.
2. Махутов Н. А., Гаденин М. Комплексный контроль. Диагностика материалов и конструкций на разных стадиях их жизненного цикла.— Технадзор, 2011, № 5, с. 46—48.
3. Троицкий-Марков Т. Е., Грунин И. Ю., Будько В. Б., Крайний В. И. Переход на новые поколения систем мониторинга комплексной безопасности строительных объектов.— Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. научн. трудов, вып. 9. Под ред. К. И. Еремина.— М., 2010, с. 300—316.
4. Будадин О. Н., Троицкий-Марков Т. Е. Технология комплексного теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений.— Строительные материалы XXI века (материалы, оборудование, технологии), 2004, № 3(62), с. 48—50.
5. Capineri L., Falorni P., Ivashov S. and etc. Combined Holographic Subsurface Radar and Infrared Thermography for Diagnosos of the Conditions of Historical Structures and



Artworks.— Geophysical Research Abstracts, 2009, v. 11, EGU2009-5343-2, 2009 EGU General Assembly.

6. RU 2255368, G06F7/00, опублик. 27.06.2005. Способ автоматического определения текущего состояния при многопараметрическом сравнении (Варакин П.Е., Варакин А.Л.), заявка 2003 135880/09 от 15.12.2003.

7. RU 2038595, G01N33/24, опублик. 27.06.1995. Сейсмоакустический способ контроля качества укладки неоднородных грунтов в насыпь. Государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" (Горшков Ю.М., Коптев В.И., Савич А.И., Кривенцов С.В.), заявка 5066919/33 от 29.09.1992.

8. RU 2177144, G01C15/00, E04G23/00, опублик. 28.04.2001. Способ построения многопараметрических цифровых моделей строительных объектов, анализа и моделирования их состояния (варианты) (Алмазова Н.М.), заявка 2001 111567/28 от 28.04.2001.

9. RU 2334262, G05B 13/00, опублик. 29.09.2008, бюл. № 26. Способ контроля и управления состоянием неопределенности системы (Лазарев В.Л.), заявка 2007116079/09 от 27.04.2007.

10. RU 2394227, G01N21/88, опублик. 10.07.2010, бюл. № 19. Способ неразрушающего контроля (Астахов С.А., Резников А.Е., Янаков А.Т., Кожеватов И.Е., Рудченко Е.А.), заявка 2008130970 от 29.07.2008.

11. RU 2156496, G06F7/00, опублик. 20.09.2000. Способ оперативного динамического анализа нечеткого состояния многопараметрического объекта или процесса (Омельченко В.В., Кузьмин Д.В.), заявка 99113671/09 от 17.06.1999.

12. RU 2271560, G05B23/00, опублик. 10.03.2006. Способ оценки состояния многопараметрического объекта (варианты), средство вычислительной техники и носитель данных для осуществления способа (Куклин А.А., Богатырев Л.Л., Мызин А.Л., Калина А.В.), заявка 2004101652/09 от 20.01.2004.

13. RU 2254602, G05B13/00, опублик. 20.06.2005. Способ адаптивной автоматической самонастройки многопараметрических систем автоматического управления на оптимальные условия (Щедрин А.В., Карасе В.Г.), заявка 2003 109492 от 04.04.2003.

14. Yella S., Dougherty M.S. and Gupta N.K. Artificial intelligence techniques for the automatic interpretation of data from non-destructive testing.— Insight, jan. 2006, v. 48, No 1, p. 10—19.

15. Кузнецов О.Л., Никитин А.А. Геоинформатика.— М.: Недра, 1992.— 302 с.

16. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов.— М.: Радио и связь, 1986.— 264 с.

17. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации.— М.: Радио и связь, 1992.— 304 с.