

УДК 620.179.15;621.396.965.8

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ТЕОРЕТИКО-
ГРУППОВЫЕ
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КАК
СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ КАРТ
ДЕФЕКТНОСТИ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ**

В.А. Баранов, У. Эwert*, Е.С. Учайкина,
Ю.Г. Свинолулов

Томский политехнический университет
*Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung,
г. Берлин, Германия
E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru

Баранов Владимир Александрович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. междунар. науч. обр. лаб. радиационного контроля и диагностики кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru

Область научных интересов: квантовая теория твердых тел, материаловедение, реконструктивная вычислительная диагностика, вычислительная томография, обработка изображений, радиационный контроль.

Эwert Уве, Dr. Rer. Nat., Директор-профессор подразделения 8.3 Радиология в институте Bundesanstalt für Material- forschung und prüfung, г. Берлин, Германия.

E-mail: uwe.ewert@bam.de

Область научных интересов: радиационный контроль, материаловедение, реконструктивная вычислительная диагностика, вычислительная томография, обработка изображений и теория решения обратных задач.

Учайкина Елена Сергеевна, аспирант, инженер междунар. научно-образовательной

лаборатории радиационного контроля и диагностики кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: uchaikina2@mail.ru

Область научных интересов: обработка изображений, вычислительная диагностика, квантовые компьютеры.

Свинолулов Юрий Григорьевич, канд. техн. наук, зам. генерального директора ОАО «Манотомь», г. Томск.

E-mail: sjg@manotom-tmz.ru

Область научных интересов: квантовая теория твердых тел, материаловедение, теория решения обратных задач, реконструктивная вычислительная диагностика, вычислительная томография, обработка изображений, радиационный контроль.

Статистический теоретико-групповой подход к обработке изображений использован как концептуальная основа для новой интерпретации понятия «дефект» и для направленной реконструкции карт дефектности. Рассмотрено применение локальной группы Ли в качестве инструмента для задания структурной нормы контроля. Предложены методы распознавания и статистической оценки аномальных структурно-функциональных связей в объекте с целью выявления дефектов.

Ключевые слова:

Структурный инвариант, группа Ли, статистическая гипотеза, обработка изображений, пространственная фильтрация.

Key words:

Structural invariant, Lie group, statistical hypothesis, image processing, spatial filtering.

**Формирования карт дефектности на основе
структурно-ориентированного подхода**

В статистических теоретико-групповых методах обработки изображений объект реконструкции рассматривается как структура, т. е. целое, устойчивое относительно определенных внешних и внутренних изменений [1–3] Формально такие изменения задаются группой автоморфизмов объекта [4]. Решение реконструктивной задачи основывается на статистической оценке структурных инвариантов, что, в свою очередь, позволяет выявлять структурно-функциональные связи в объекте. Такой подход к проблемам неразрушающего контроля (НК) [1–3, 5] позволяет уточнить понятие «дефект», предопределяя развитие новых методов формирования карты дефектности объекта контроля.

Дефект можно рассматривать как

одновременно коллективное и локальное явление. На макро- и мезоуровне он занимает некую конечную окрестность точки $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1L})$ конфигурационного пространства S_C контролируемого объекта, в более конкретном варианте – окрестность точки (x, y, z) контролируемого «изделия». Естественно, рассматривать дефект как особое состояние этой микрообласти, в которой структурно-функциональные связи, характерные для «фона» объекта, нарушены. В силу этих обстоятельств среди разработанных авторами структурно-ориентированных методов и инструментов программного обеспечения для распознавания и оценки дефектов более всего подходят алгоритмы пространственной фильтрации изображений с локальной группой Ли L_S , определяющей фон итогового изображения [1–3]. В данном случае оценка структурных инвариантов применяется к локальным микроизображениям внутри скользящего окна.

Теоретико-групповой способ задания структурной нормы контроля

В алгоритмах этого типа интенсивность итогового изображения для его элемента, соответствующего центральному элементу окна, строится на оценке взаимодействия микроизображения с теоретико-групповым фильтром как степени понижения симметрии микроизображения в сравнении с симметрией фона. Алгоритм основан на проверке гипотезы о совпадении локальной симметрии фона и изображения в окрестности произвольной точки $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1L})$. Пониженная (существующая в отличие от L_S «объективно») симметрия описывается некоей другой группой L_0 . Содержательность итогового изображения достигается разницей симметрий L_S и L_0 . Для ее количественной оценки сконструируем неотрицательную «меру различия»:

$$\Phi = \Phi(L_S, I_0, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1L}). \quad (1)$$

Во «вторичном изображении» (1) представлены как инвариантные, так и неинвариантные (относительно L_S) свойства объекта (т. е. фон или «норма» с $\Phi = 0$ и «аномалии» с $\Phi > 0$), причем одновременное их присутствие принципиально необходимо. Мера (1) является, вообще говоря, нелинейным функционалом исходного изображения I_0 . При этом группа L_0 обычно не входит явно в (1) в качестве аргумента.

В теоретико-групповой нулевой гипотезе с группой LS заложено представление исследователя о «структурной норме», характерной для восстанавливаемого объекта, которое и используется затем в реконструктивном алгоритме. Смысл гипотетической группы LS в том, что она определяет «нормальные» структурно-функциональные связи между «вещами», которые находятся в пространстве в окрестности центра микроизображения, тем самым придавая ему форму. Для другого типа выявляемых аномалий («дефектов») возникнет норма, задаваемая другой группой LS , следовательно, возникнет и другая «форма пространства».

Разумеется, при столкновении с опытом структурная норма не «обязана» выполняться на 100%. Напротив, ценнейшую информацию дают именно отклонения от нее. В результатах проверки гипотезы должен содержаться элемент неожиданности (т. е. возможность ответов как «да», так и «нет»), иначе диагностика бессмысленна. Это позволяет во «вторичных изображениях» типа (1) визуализировать только лишь аномальные структурно-функциональные связи. Регистрация аномального элемента такого изображения – событие достаточно редкое, выше «горизонта событий», соответствующего структурной норме. Напротив, регистрация «нормальных» вторичных элементов (для которых симметрия исходных микроизображений выше либо равна симметрии LS) – это события ниже данного «горизонта». Вторичные элементы поглощаются фоном и остаются невидимыми.

В конкретных статистических алгоритмах группа LS заменяется своей конечной подгруппой и строится статистика F , аналогичная мере различия (1), которая затем используется в качестве распределения яркостей итогового изображения. Статистический подход позволяет выйти за рамки «жесткой модели» [6, 7] классического теоретико-группового анализа и приспособить его аппарат для решения синтетических реконструктивных задач.

Формирование карты дефектности путем проверки составной теоретико-групповой статистической гипотезы

Для распознавания локальной диссимметрии в объекте контроля (и, тем самым, для локализации аномалий) в задачах структурно-ориентированной дефектоскопии полезно сконструировать параметрическую группу локальной симметрии L_C ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A}$), конфигурационного пространства S_C , которое может быть или евклидовым пространством, или же многообразием. Группа L_C ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A}$) совпадает с группой L_S если $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A}$ – координаты «центрального элемента» в S_C . Косвенная информация о микрообласти представлена исследователю локальным микроизображением в окрестности точки ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A}$). Далее, если в какой-то области объекта контроля (например, во всем объекте) нулевая статистическая теоретико-групповая гипотеза с локальной группой L_S (по-другому с $L_C(x, y, z)$) выполняется с заданным уровнем значимости ε «равномерно», т. е. для всех без исключения точек области как «центральных элементов» микрообластей, то эта область считается бездефектной.

Иначе говоря, в бездефектной области выполняется «составная» нулевая гипотеза с группой $L_C(x, y, z)$. Альтернативная гипотеза заключается в том, что в области имеется, по крайней мере, один дефект, который интерпретируется как «невыврожденное» состояние микрообласти, а статистика F дает ему количественную оценку. При этом бездефектная зона трактуется как массив «вырожденных» состояний микрообластей. По результатам проверки составной гипотезы генерируется карта дефектности объекта в форме обычного двумерного ($F = F(x, y)$) или же многомерного ($F = F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A})$) изображения.

Пример карты дефектности. Диагностика зон формирования трещин в сварных швах на основе статистических оценок локальной анизотропии микроизображений

При радиационном контроле сварных швов в трубопроводах атомных электростанций рентгеновские проекционные изображения (рис. 1, а) геометрически представляют собой развертки цилиндра. (Низ изображения совпадает с его верхом и координата по вертикали является угловой, меняясь от 0 до 2π). Регистрации изображений такого рода осуществляется на сконструированном специально для этой цели сканирующем устройстве [5].

Зона формирования трещины визуализируется путем суммирования слабейших сигналов, идущих от огромного количества микротрещин с размерами ниже критического радиуса, а также от мелких неопасных трещин. Амплитуда такого суммарного сигнала незначительна, поэтому его трудно обнаружить на фоне общего проекционного вклада от объекта контроля. Однако положение меняется при предпочтительной ориентации микротрещин, появляющейся под воздействием макроскопически диссимметричных физических факторов. При этом понижается симметрия распределения микротрещин по угловым ориентациям, т. е. оно перестает быть изотропным и, таким образом, возникает возможность ситуационного распознавания «аномалий» (трактуемых как «дефекты») по признаку локальной анизотропии микроизображений. В этом случае в роли локальной группы Ли LS фигурирует группа $SO(2)$, в качестве инструмента статистического анализа обычно применяют дисперсионный анализ, а в качестве F выбирают дисперсионное отношение Фишера.

Рассмотрим один из алгоритмов распознавания локальной анизотропии этого класса (с вычислительными затратами, близкими к минимальным). В нем все выборочные статистики вычисляются на некоторых подмножествах локального изображения, а именно, вдоль прямых линий, проходящих через центральный элемент. Выбирают N различных фиксированных направлений, соответствующих N группам данных для этих подмножеств. Для определенности скользящее окно предполагается квадратным с полушириной M . Пусть p_{ij} и r_{ij} – яркости элементов исходного и итогового изображений ($i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J$, где I и J – размерности изображения), n ($n = 1, 2, \dots, N$) – номер произвольного направления, $a_{1ij}, a_{2ij}, \dots, a_{nij}$ – средние

значения и $q_{1ij}, q_{2ij}, \dots, q_{Nij}$ – среднеквадратичные в N группах данных (при вычислении этих значений центральный элемент не принимался во внимание). Для того чтобы в дальнейшем не делать формулы громоздкими, индексы i и j будут опущены. Параметр n рассматривается как фактор, предположительно влияющий на средние значения a_1, a_2, \dots, a_N . В соответствии с основными принципами дисперсионного анализа может быть построена статистика (F – отношение Фишера, т. е. межгрупповая дисперсия, поделённая на общую внутригрупповую) с $N-1$ и $N(2M-1)$ степенями свободы:

$$F = \frac{N(2M-1) \sum_{n=1}^N \left(a_n - \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N a_l \right)^2}{(N-1)2M \sum_{n=1}^N (q_n^2 - a_n^2)}, \quad (2)$$

описывающая итоговое изображение. Более точно, к полученной формуле может быть применено некоторое нелинейное преобразование $r_{ij} = f(F_{ij})$ типа «look-up-table» так, чтобы обеспечить приемлемую для человеческого глаза гистограмму яркости. Итоговое изображение, таким образом, «рисует» статистикой Фишера, являющейся в данном случае мерой различия между средними по различным направлениям. Иными словами, в данном подходе предполагалось, что та же самая статистика, на основе которой отвергается или принимается гипотеза, может быть использована как количественная мера отклонения от точной симметрии (здесь от изотропии) и служить как характеристика яркости результирующего изображения.

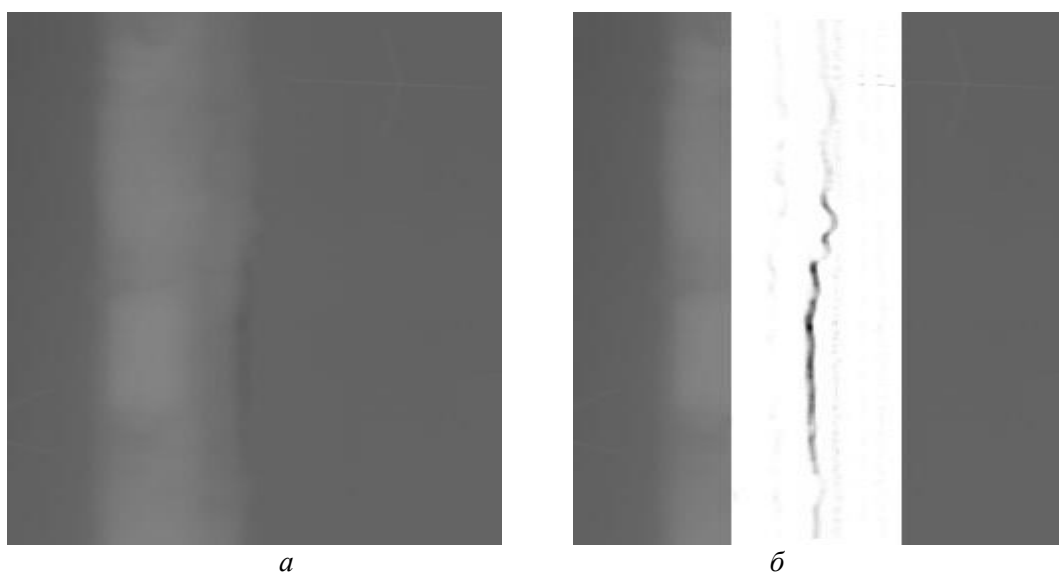


Рис. 1. Структурно-ориентированная фильтрация рентгеновской проекции кольцевого сварного шва. Проекция: а) нефильтрованная; б) фильтрованная

На рис. 1, б, представлены результаты структурно-ориентированной фильтрации по (2) для ROI (region of interest, области интереса) при $N = 4$ и $M = 32$ (ширина ROI в пикселях близка к 600). «Белое» на фильтрованной проекции соответствует тем областям, где нулевая теоретико-групповая гипотеза (в данном случае предположение об изотропности микроизображения в локальном пятне вблизи исследуемого центрального элемента) не отвергается. Напротив, «черное» – это свидетельства статистики Фишера о неправомерности нулевой гипотезы при различных уровнях значимости, т. е. значимая локальная анизотропия.

Отметим, что локальные теоретико-групповые фильтры типа (2) не реагируют на анизотропию низкочастотного фона исходного изображения. Реконструируемая ROI является типичной картой дефектности. Мера различия (2) при этом неотрицательна, как и (1). Было бы, однако, неверным трактовать «дефекты» на ROI как трещину, что часто пытаются делать. (При

такой ширине реальной трещины изделие уже бы разрушилось). «Черное» – это наиболее вероятная область, по которой в будущем пойдет уже развившаяся опасная трещина. Диагностика проводится до наступления опасных событий, и в этом состоит ее прогностическая ценность. Алгоритмы типа (2) регулярно и рутинно используются в Германии с конца 90-х гг. для контроля объектов ядерной энергетики.

Роль информационной избыточности исходных изображений при формировании карт дефектности

В отличие от «материальных» характеристик объекта контроля типа коэффициента линейного ослабления рентгеновского излучения $\mu(x, y, z)$, возможность восстановления которых становится призрачной уже при относительно слабой некорректности исходной задачи реконструкции, структурно-функциональные связи объекта весьма устойчивы. Кстати, именно они наиболее важны и для решения большинства практических проблем.

Информационная избыточность тесно связана с «вырождением», т. е. с наличием внутренних скрытых симметрий в объекте контроля, что позволяет организовать *статистическую поддержку* «релевантным» (т. е. «относящимся к делу») структурно-функциональным связям, в частности, такому свойству как «быть дефектом» в структурно-ориентированной дефектоскопии. Статистическая поддержка результатов диагностики, в общем и целом, тем эффективнее, чем глубже «вырождение», т. е. чем богаче ключевая группа для «фона» (В локальных вариантах структурно-ориентированной обработки изображений она представлена группой L_C).

В методах классического структурного анализа, где группа симметрии положена в основу классификации объектов, «нерелевантная» исходная информация отсекается. Например, при теоретико-групповой классификации различных геометрий все углы (как и все стороны) треугольника в аффинной геометрии «объявляются» равными. Такой прием освобождения от «излишних подробностей» часто оказывается полезным для «смысловой фильтрации» информации. Это один из элементов абстрагирования.

В статистических теоретико-групповых методах классификации объектов (одним из которых является фильтрация изображений) исходная информация используется экономнее и эффективнее. Она статистически «фокусируется», причем своеобразной «оптикой» для этого служит ключевая группа преобразований. «Фокусировка» направлена на четкое выделение какого-то одного элемента реконструкции (или группы совместимых элементов), тогда как другие («дополнительные») элементы остаются неопределенными. Она осуществляется на основе параметрической группы (например, $L_C(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1L})$ в алгоритмах с локальной группой). В методах нелинейного томосинтеза [4] реконструкция отдельного сечения с глубиной залегания Z осуществляется, по сути дела, также за счет теоретико-групповой фокусировки проекционной информации на основе двухпараметрической транзитивной группы.

«Структурно-ориентированная» и «структурно-адаптивная» реконструкция объектов

Широко распространены «адаптивные» алгоритмы реконструкции (их параметры зависят от характеристик объекта контроля). В «структурно-адаптивной» реконструкции сам термин «структура» понимается в обыденном смысле, как «строение». В данных алгоритмах нет речи об оценке структурных инвариантов. При использовании «адаптивных» методов в задачу вносится множество полуэмпирических характеристик объекта. Напротив, структурно-ориентированные методы позволяют компактно описать структурный тип объекта на основе группы преобразований и осуществить для него реконструкцию, в принципе не прибегая к «полуэмпирическому подходу». Тем не менее, в науке лишь очень немногие задачи могут быть решены «из первых принципов» и на практике полуэмпирические параметры все же приходится вводить. Но, во всяком случае, структурно-ориентированные методы позволяют

резко ограничить их число. К таким параметрам относится, например, полуширина окна в алгоритмах структурно-ориентированной пространственной фильтрации.

Основные результаты и выводы

На основе развитого авторами теоретико-группового статистического подхода для решения реконструктивных задач обработки изображений и предложенных ими методов пространственной фильтрации изображений, основанных на проверке статистической гипотезы о «локальной симметрии» микроизображения в скользящем окне, предложен новый подход к трактовке понятия «дефект» и разработаны методы формирования карт дефектности.

Новые методы обладают рядом существенных преимуществ, среди которых следует отметить их гибкость, а также высокую эффективность как при реконструкции предельно зашумленных изображений, так и при теоретико-групповом статистическом распознавании по ним дефектов в объектах контроля. Они регулярно используются в практике неразрушающего контроля, в частности, для диагностики строительных конструкций, а также для визуализации зон формирования трещин в компонентах работающих атомных электростанций. По мнению авторов, сфера применения указанных методов в НК будет расширяться. Особенно перспективно их применение на стыке дефектоскопии и материаловедения.

Очертить потенциальную сферу приложений разработанных методов за пределами НК в настоящий момент затруднительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ewert U., Redmer B., Müller J., Trobitz M., Baranov V. Mechanisierte Durchstrahlungsprüfung von Rundschweißnähten – Prüfung mediengefüllter Rohrleitungen und Tiefenlagebestimmung durch Tomosynthese // 23 MPA-Seminar «Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik» mit dem Schwerpunkt «Verhalten von druckführenden Komponenten und Systemen bei erhöhten Belastungen». Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA). – 1997. – Band 23. – SS. 13.1–13.14.
2. Баранов В.А., Эверт У., Редмер Б. Томографическая визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 299–311.
3. Баранов В.А., Бразовский В.В., Кулешов В.К., Эверт У. Нелинейные структурно-ориентированные методы обработки изображений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – № 3. – С. 91–94.
4. Вейль Г. Классические группы, их инварианты и представления. – М.: Иностранная литература, 1947. – 408 с.
5. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and Co⁶⁰ radiation // NDT & E International, Elsevier Science Ltd. – 1997. – V. 30. – № 4. – P. 243–248.
6. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М: Наука, 1981. – 487 с.
7. Бордовский Г. А., Кондратьев А.С., Чоудери А.Д.Р. Физические основы математического моделирования. – М: Академия, 2005. – 320 с.

Поступила 31.10.2011 г.