

## ФОРМИРОВАНИЕ «КАРТ ДЕФЕКТНОСТИ» ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ТЕОРЕТИКО-ГРУППОВЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.А. Баранов, У. Эверт, В.К. Кулешов, М.Н. Янушевская

*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.*

### Структурно-ориентированные методы формирования карт дефектности

В статистических теоретико-групповых методах обработки изображений объект реконструкции рассматривается как структура, т.е. целое, устойчивое относительно определенных внешних и внутренних изменений [5-7]. Формально они задаются группой автоморфизмов объекта [1]. Решение реконструктивной задачи основывается на статистической оценке его структурных инвариантов, что, в свою очередь позволяет выявлять структурно-функциональные связи в нем. Такой подход к проблемам неразрушающего контроля (НК) [4-7] дает возможность уточнения понятие «дефект», предопределяя развитие новых методов формирования карты дефектности объекта контроля.

Дефект - это явление и коллективное, и локальное одновременно. На макро- и мезоуровне он занимает какую-то конечную окрестность точки  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1\Lambda})$  конфигурационного пространства  $S_C$  контролируемого объекта, в более конкретном варианте – окрестность точки  $(x, y, z)$  контролируемого «изделия». Естественно рассматривать его 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 [5-7]. В данном

случае оценка структурных инвариантов применяется к локальным микроизображениям внутри скользящего окна.

### Теоретико-групповой способ задания структурной нормы контроля и «горизонта событий» в структурно-ориентированном НК

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  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1\Lambda})$ . Пониженная (существующая в отличие от  $L_S$  «объективно») симметрия описывается какой-то другой группой  $L_O$ . Содержательность итогового изображения достигается разницей симметрий  $L_S$  и  $L_O$ . Для ее количественной оценки сконструирован неотрицательную «меру различия»

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

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  $I_O$ .

При этом группа  $L_O$  обычно не входит явно в (1) в качестве аргумента

В теоретико-групповой нулевой гипотезе с группой  $L_S$  заложено представление исследователя о «структурной норме», характерной для восстанавливаемого объекта, которое и используется затем в реконструктивном алгоритме. «В действительности пространство аморфно, и форму ему сообщают те вещи, которые в нем находятся» (А.Пуанкаре, «Наука и метод»). Смысл гипотетической группы  $L_S$  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  $L_S$ , следовательно возникает 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 и типа «да», и типа «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  $L_S$ ) это события ниже данного «горизонта». Они поглощаются фоном и остаются невидимыми.

В конкретных статистических алгоритмах группа  $L_S$  заменяется своей конечной подгруппой и строится статистика  $F$ , аналогичная мере различия (1), которая используется затем в качестве распределения яркостей итогового изображения. Статистический подход позволяет выйти за рамки «жесткой модели» [3,2] классического теоретико-группового анализа и приспособить его аппарат для решения синтетических реконструктивных задач.

#### **Формирование карты дефектности на основе составной теоретико-групповой 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  $L_C (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1\lambda})$ , конфигурационного пространства  $S_C$ , которое может быть или евклидовым пространством, или же многообразием. Группа  $L_C (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1\lambda})$  совпадает с группой  $L_S$  если  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1\lambda}$  – координаты «центрального элемента» в  $S_C$ . Косвенная информация о микрообласти представлена исследователю локальным микроизображением в окрестности точки  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1\lambda})$ . 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  $\varepsilon$  «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 есть по меньшей мере один дефект, который интерпретируется как «невыврожденное» состояние микрообласти, а статистика  $F$  дает ему количественную оценку. Бездефектная же 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 ( $F = F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1\lambda})$ ) изображения.

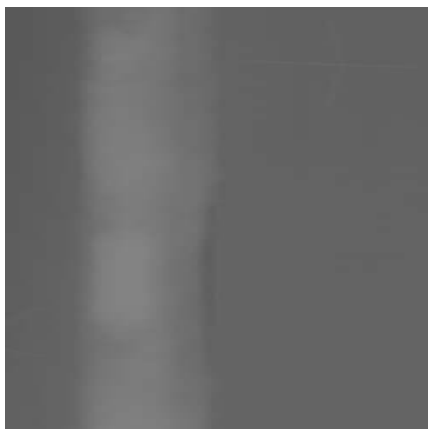
#### **Пример карты дефектности. Диагностика зон формирования трещин в сварных швах на основе распознавания и статистической оценки локальной анизотропии**

При радиационном контроле сварных швов в трубопроводах атомных электростанций рентгеновские проекционные изображения (рисунок 1,а) геометрически представляют собой развертки цилиндра. (Низ изображения совпадает с его верхом и координата по вертикали является угловой, меняясь от 0 до  $2\pi$ ). 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

ФОРМИРОВАНИЕ «КАРТ ДЕФЕКТНОСТИ» ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ  
НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ТЕОРЕТИКО-ГРУППОВЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ

микротрещин с размерами ниже критического радиуса, а также от мелких неопасных трещин.



а) Нефильтрованная проекция

Рисунок 1 а- Структурно-ориентированная фильтрация рентгеновской проекции кольцевого сварного шва

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» (тракуемых как «дефекты») по признаку локальной анизотропии микроизображений. В этом случае в роли локальной группы Ли  $L_S$  фигурирует группа  $SO(2)$ , в качестве инструмента статистического анализа обычно применяется дисперсионный анализ, а в качестве  $F$  берется 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. Выбираются  $N$  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 ( $i=1, 2, \dots, l$ ,

$j=1, 2, \dots, J$ , где  $l$  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, «рисуеться» 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.

На рисунке 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. «Диссимметрия творит явление» (П.Кюри).

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 этих событий и в этом ее прогностическая ценность. Алгоритмы типа (2) регулярно и рутинно используются в Германии с конца 90-х гг. для контроля объектов ядерной энергетики.

#### **Информационная избыточность исходных изображений и теоретико-групповая фокусировка информации при формировании карт дефектности**

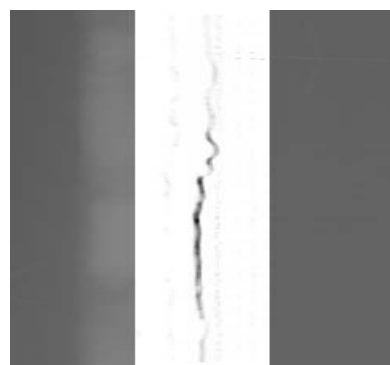
В отличие от «материальных» характеристик объекта контроля типа «коэффициента линейного ослабления рентгеновского излучения»  $\mu(x, y, z)$ , возможность восстановления которых становится призрачной уже при относительно слабой некорректности исходной задачи реконструкции, структурно-функциональные связи 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  $L_S$ ).

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.



б) Фильтрованная проекция

Рисунок 1 б - Структурно-ориентированная фильтрация рентгеновской проекции кольцевого сварного шва

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

#### **О различии между «структурно-ориентированной» и «структурно-адаптивной» реконструкциями объектов**

Широко распространены «адаптивные» алгоритмы реконструкции (их параметры зависят от характеристик объекта контроля). В «структурно-адаптивной» реконструкции сам

## ФОРМИРОВАНИЕ «КАРТ ДЕФЕКТНОСТИ» ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ТЕОРЕТИКО-ГРУППОВЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

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 «полу-эмпирическому 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 объектов контроля. Они регулярно используются в практике НК, в частности для диагностики строительных конструкций и для визуализации зон формирования трещин в компонентах работающих атомных электростанций в процессе их работы. По мнению авторов, сфера применения указанных методов в НК будет расширяться. Особенно перспективно их применение на стыке дефектоскопии и материаловедения.

Потенциальная сфера их приложений за пределами НК также широка и в данный момент трудно очертить ее границы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейль, Г. Классические группы, их инварианты и представления /Г. Вейль/ М.: Инстр. лит-ра, 1947 – 408 с.
2. Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа /Н.Н. Моисеев- М: - Наука, - 1981 . – 487 с.
3. Бордовский, Г.А. Физические основы математического моделирования / Г.А. Бордовский, А.С. Кондратьев, А.Д.Р. Чоудери / М:-Академия,- 2005 . – 320 с.
4. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and Co<sup>60</sup> radiation // NDT & E International, Elsevier Science Ltd. – 1997. – V. 30. – № 4. – P. 243–248.
5. 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 Universität Stuttgart, Band 23, SS. 13.1-13.14.
6. Баранов, В.А. Томографическая визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Известия Томского политехнического университета / В.А. Баранов, У. Эwert, Б. Редмер- Издательство ТПУ, 2008. – Том 312 - № 2-С. 299-311.
7. Баранов, В.А. Нелинейные структурно-ориентированные методы обработки изображений / В.А. Баранов, В.В. Бразовский, В.К. Кулешов, У. Эwert / Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, -№3.-2011.- С.91-94.

**Баранов В.А.**, к.т.н., старший научный сотрудник международной лаборатории радиационного контроля Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета, тел.: 8(3822) 41-73-07, E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru;

**Эwert Уве**, профессор, директор подразделения 8.3 Радиология в институте Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung, г. Берлин, Германия, E-mail: uwe.ewert@bam.de;

**Кулешов В.К.**, д.т.н., профессор кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета, тел.: 8(3822)41-73-07, E-mail: mail@introscopy.tpu.ru

**Янушевская М.Н.**, ст. преподаватель кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета, тел.: 8(3822)41-73-07, E-mail: yanushevskaj@tpu.ru