

преобразователя бегущего магнитного поля, характеризующегося линейной зависимостью фазы напряженности возбуждающего магнитного поля φ от осевой линейной координаты x :

$$\varphi = x \pi / a, \quad (4)$$

где a – межполюсное расстояние.

На каждом межполюсном интервале трансформаторного ВТП имеется измерительная обмотка ИО₁ – ИО₁₀. Обмотки ВТП охвачены короткозамкнутым витком КЗВ, укрепленным на перемещающемся с измеряемым уровнем поплавке. ЭДС наводятся в тех ИО, вблизи которых находится КЗВ. При этом фазы вносимых напряжений связаны с измеряемым перемещением той же формулой (4), что и фаза напряженности возбуждающего магнитного поля. Измерительным каналом ИК осуществляется аналоговая обработка сигналов ВТП и цифровое измерение фазы вносимых напряжений. Вычислительным блоком, выполненным на основе микроконтроллера МК, осуществляется расчет уровня жидкости в резервуаре на основе совместной обработки информации о превышении порогового уровня вносимыми ЭДС измерительных обмоток и информации о их фазе. Уровнемер УПЭ-1.0 имеет следующие основные характеристики:

- пределы измерения уровня нефти – (1,5 – 10) м,
- пределы измерения уровня подтоварной воды – (0,5 – 4) м,
- минимальная разность уровней нефти и воды – 1,5 м,
- максимальная погрешность измерения уровня нефти – 2,5 мм,
- максимальная погрешность измерения уровня подтоварной воды – 50 мм,
- высота резервуара – $11,5 \pm 0,5$ м,
- уровнемер имеет цифровую индикацию значений уровней нефти и подтоварной воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков В.К., Гольдштейн А.Е. Использование вращающегося электромагнитного поля для селективного обнаружения металлических предметов // В кн.: Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. – Рижский политехн. ин-т, 1979. – С.44–48.
2. Жуков В.К., Гольдштейн А.Е., Сафончик Е.И. Ферромагнитный эллипсоид вращения в трехмерном вращающемся магнитном поле // В кн.: Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. – Рижский политехн. ин-т, 1982. – С.25–33.
3. Гольдштейн А.Е., Калганов С.А. и др. Идентификация физических параметров проводящих объектов с использованием возбуждения разночастотных пространственных компонент магнитного поля // Дефектоскопия. – 1990. – № 2. – С.72–77.
4. Булгаков В.Ф., Гольдштейн А.Е., Калганов С.А. Вихретоковый дефектоскоп для контроля цилиндрических изделий. Патент РФ № 2090882 // Бюл. изобр. – 1997. – №26.
5. Гольдштейн А.Е., Грошев В.Я., Забродский В.А., Калганов С.А. Электромагнитный уровнемер. Авт. свид. № 2077805 // Бюл. изобр. – 1997. – № 11.
6. Гольдштейн А.Е., Калганов С.А. Измерение перемещений с использованием вихретокового преобразователя с бегущим магнитным полем // Дефектоскопия. – 1997. – № 5. – С.59–64.

УДК 620.179.15

В. А. БАРАНОВ, У. ЭВЕРТ

АЛГОРИТМЫ НЕЛИНЕЙНОГО ТОМОСИНТЕЗА СО СТРУКТУРНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ПРОЕКЦИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

Одной из основных тенденций развития современного неразрушающего контроля (НК) является повышение роли обработки данных, сопровождающееся возрастанием степени математизации методов НК, повсеместной компьютеризацией систем контроля и их превращением в "системы вычислительной диагностики", а также созданием информационных технологий НК. Среди широкого арсенала средств информатики для практической дефектоскопии наиболее важны цифровые методы обработки изображений и, в особенности, методы томографические, фундаментальное преимущество которых, а именно возможность непосредственной визуализации внутреннего строения объекта контроля по его проекциям, в настоящее время хорошо осознано и по достоинству оценено как разработчиками систем контроля, так и дефектоскопистами-практиками.

Парадоксально, тем не менее, что вычислительная томография (ВТ), адекватно соответствуя сущности и целевым установкам интроскопии, до сих пор не стала массовым или хотя бы достаточно рас-

пространственным инструментом НК. Такое положение дел частично объяснимо сложностью технической базы ВТ, требующей высоких технологий и немалых материальных затрат. Особенно важно, что стоимость реализации резко возрастает для трёхмерной (3D) томографии (т.е. полному восстановлению внутреннего строения трёхмерного объекта по его двумерным проекциям). Между тем именно эти методы в силу их информативности наиболее перспективны для преимущественного использования в НК.

Не отрицая этих технических проблем, мы все же считаем, что трудности с реализацией ВТ в большей мере обусловлены концептуальными нежели техническими причинами. Математическая модель, положенная в основу системы, во многом предопределяет ее будущую аппаратную конфигурацию. Так, основные технические трудности при разработке систем 3D томографии предопределены недостатками известных к настоящему моменту алгоритмов 3D реконструкции – их "псевдоуниверсальностью", негибкостью и непомерными вычислительными затратами даже при использовании современных матричных процессоров.

В настоящее время хорошо известно, что обратная задача по неполным данным неразрешима, поэтому в любом из реконструктивных методов для стабилизации решения должна использоваться дополнительная априорная информация. Методы, основанные на вариационных принципах статистики (таких как максимум энтропии, максимум правдоподобия и др.) [1, 2, 3], на первый взгляд кажутся наилучшим образом подходящими для решения проблемы. К сожалению, огромные вычислительные затраты, присущие итерационным реализациям этих методов [3], вместе с другими их недостатками заставляют обратить внимание на альтернативные пути восстановления по неполным данным и, прежде всего, на алгоритмы реконструкции, разработанные в рамках концепции нелинейного обратного проецирования (НЛОП) [4, 5, 6, 8, 9, 10].

Подход НЛОП основан на оценках T решений интегральных проекционных уравнений (оценок НЛОП) [4, 5, 6].

В общем случае оценка НЛОП есть нелинейная функция f от N неотрицательных переменных (луч-сумм P_1, P_2, \dots, P_N , инцидентных произвольной точке объекта контроля с координатами x, y, z), неотрицательная, симметрическая (т.е. инвариантная относительно любых перестановок своих аргументов)

$$T = T\{x, y, z\} = f(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (1)$$

и интерпретируемая как некоторое нелинейное усреднение вместо классической обратной проекции, являющейся частным случаем (1):

$$T(x, y, z) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_n(x, y, z). \quad (2)$$

Теоретически два типа оценок НЛОП из класса (1) наиболее важны и часто используются в наших алгоритмах:

1) порядковые статистики

$$f = S_k(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (3)$$

(например, медиана в случае $k=N/2$ или $(N+1)/2$, или оценка по минимальным проекциям в случае $k=1$)

$$T = T\{x, y, z\} = \min(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (4)$$

и

2) нелинейные усреднения вида

$$F(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N F(P_n), \quad (5)$$

где $F(P)$ в (5) монотонная неотрицательная функция, так что нелинейное уравнение (5) разрешимо относительно f .

Свойства оценок НЛОП были детально рассмотрены в [6] и [8]. В частности было показано, что оценка по минимальным проекциям является решением задачи минимизации с ограничениями для норм невязок на классе оценок НЛОП. Исследованы также тесные связи и параллели [6, 8], существующие между подходами НЛОП и ПНВМ (методом прецирования на выпуклые множества) [7].

Использование методов НЛОП даёт возможность преодолеть недостатки классического томосинтеза и возродить его в новой (цифровой) форме как вполне конкурентноспособную ветвь ВТ. Подобно методу MENT [3] и другим "алгебраическим" нелинейным алгоритмам метод нелинейного томосинтеза пригоден для восстановления по предельно малому (3–8) числу проекций (при значительном

(в 10–100 раз) снижении вычислительных затрат по сравнению с другими методами этого класса [1, 3]. В рамках НЛОП часто возможны разительные упрощения задачи восстановления без какой-либо потери качества синтезируемого изображения.

Гибкость нелинейного томосинтеза во многом достигается за счёт предобработки, основанной на априорном знании об объекте контроля. Поиск систематических путей внесения априорной информации в процедуру восстановления сопряжен с решением задачи классификации объектов контроля на основе структурного подхода. Тщательный отбор и изучение (предположительно немногочисленных) структурных типов открывает перспективные пути создания адаптивных алгоритмов восстановления (их параметры зависят от характеристик объекта контроля).

Основным предназначением такого рода структурно-ориентированной процедуры предобработки является распознавание и усиление элементов новой (упрощенной) структуры, в то время как информация о первоначальной структуре будет необратимо потеряна. В сущности, мы предлагаем взамен исходной "некорректно поставленной" обратной задачи решать другую "корректно поставленную" задачу для новой структуры. Естественно, степень упрощения тесно связана с характеристиками шума, и наиболее эффективные алгоритмы предобработки должны базироваться на статистической поддержке структурных элементов.

Один из предлагаемых нами статистических структурных подходов, основанных на соображениях симметрии, связан с использованием преобразования Хоха [11] (математически эквивалентному преобразованию Радона [12]). Его использование уместно в том случае, когда в объекте контроля физически существуют некоторые фиксированные направления (например, ориентированные вдоль прямых линий стальные стержни арматуры в бетоне). К сожалению, методы этого класса могут быть использованы только для распознавания и оценки изображений (не для их обработки). Один из путей их превращения в обычные процедуры пространственной фильтрации заключается в применении преобразования Хоха локально к микроизображению в пределах "скользящего окна" с последующим анализом статистической гипотезы о симметрии (в частности, изотропности) микроизображения. Другое предположение данного подхода состоит в том, что та же самая статистика, на основе которой отвергается или принимается гипотеза, может быть использована как количественная мера отклонения от точной симметрии (неизотропности) и служить как характеристика яркости результирующего изображения. Неизотропность отождествляется при этом с инцидентностью структурного элемента (стального стержня, трещины и т.д.) центральному элементу микроизображения.

В первую очередь нами были разработаны некоторые упрощенные процедуры этого класса, в которых все выборочные статистики вычисляются только на некоторых подмножествах микроизображения, а именно вдоль прямых линий, проходящих через центральный элемент. В этом случае к проблеме оценки неизотропности изображения применим однофакторный дисперсионный анализ.

Исходя из этого, рассмотрим N различных фиксированных направлений, соответствующих N группам данных (упомянутых выше подмножеств микроизображения). Для определенности предположим скользящее окно квадратным с полушириной M . Пусть p_{ij} – яркость элемента исходного изображения, r_{ij} – яркость элемента итогового изображения ($i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J$ 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). Рассмотрим параметр n 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 внутригрупповую) с $N-1$ и $N*(2*M-1)$ степенями свободы:

$$F = \frac{N(2M-1) \sum_{n=1}^N (a_n - \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N a_l)^2}{(N-1)2M \sum_{n=1}^N (q_n^2 - a_n^2)}, \quad (6)$$

так что итоговое изображение описывается как (6). (Более точно, к (6) может быть применено некоторое нелинейное преобразование f типа "look-up-table" так, что $r_{ij} = f(F_{ij})$).

В том случае, если все практически важные избранные направления в объекте определены и фиксированы, могут быть построены простые и эффективные структурно-ориентированные алгоритмы за счет разделения дальнейшей обработки изображений на N компонент. Исходное изображение должно быть обработано раздельно N раз для того, чтобы сформировать N компонент итогового изображения, которое должно быть синтезировано из них. Одна из наиболее простых процедур этого типа была

разработана нами для предобработки проекционных изображений железобетона. Алгоритм предобработки может быть представлен как

$$r = \text{MAX}_{n=1}^N \left\{ (1-\eta) + \eta a_n - \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (1-\delta_{ln} a_l) \right\}, \quad (7)$$

где η есть параметр ($0 \leq \eta \leq 1$), позволяющий менять степень детализации структуры в зависимости от интенсивности шума. Предполагается, что для объекта, искаженного очень интенсивным высокочастотным шумом, $\eta = 1$. Обычно $\eta = 0,5$.

Более полное представление о возможностях структурно-ориентированной фильтрации в сочетании с НЛОП можно получить, рассмотрев следующий пример послойной реконструкции железобетонной стены. Для получения радиографических проекций использовались источник излучения на основе Co^{60} и фотолюминесцентные экраны с биомедицинской системой BAS2000 (Fuji Film). Толщина стены была 400 мм. При измерении проекций использовалась копланарная геометрия (как в классическом томосинтезе). Расстояние от экрана до плоскости источника было равно 1000 мм. Источник последовательно смещался вдоль прямой линии в плоскости источника (с шагом 200 мм) в направлении, перпендикулярном стальным стержням в железобетоне.

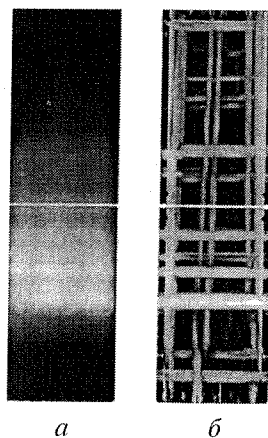


Рис.1

Рис.1. Сравнение исходной (а) и предобработанной (б) проекций для стальной арматуры в железобетонной стене

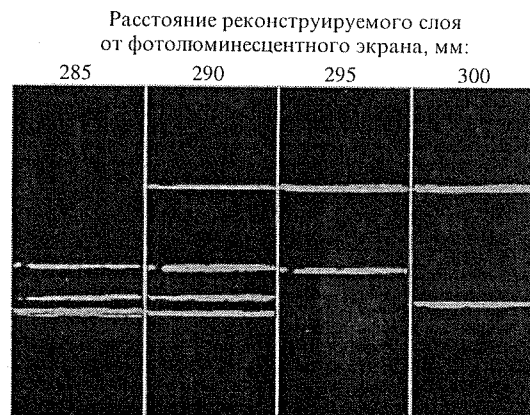


Рис.2

Рис.2. Четыре томограммы, синтезированные по четырем предобработанным проекциям

В данном эксперименте проекции железобетонной стены были подвергнуты предобработке на основе (7) с параметрами $N = 4$, $\eta = 0,5$, $M = 32$. Некоторые из результатов предобработки можно видеть на рис.1,а,б. 4 томограммы, показанные на рис.2, синтезированы по четырем предобработанным проекциям с использованием оценки НЛОП на основе второй порядковой статистики (3) и процедуры постобработки.

Результаты восстановления вполне удовлетворительны несмотря на плохую обусловленность задачи и сильное перекрытие проекционных изображений. Разрешение по координате Z (расстояние от стержня до плоскости регистрации) может быть заметно повышено, в частности, за счёт введения в алгоритм восстановления дополнительной априорной информации. Предложенный метод (с некоторыми улучшениями) может быть рекомендован для массового использования в промышленности и строительстве. Мы надеемся также разработать соответствующие НЛОП-алгоритмы со структурно-ориентированной фильтрацией для других типов объекта в неразрушающем контроле.

Мы благодарим д-ра Каллинга и Fuji Film Europe, Дюссельдорф (Германия) за помощь в экспериментальной части работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gordon R., Bender R., Herman G. T. Algebraic reconstruction technique (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography // J.Theor. Biol. – 1970. – № 29. – P.471–478.
2. Frieden B. R. Restoring with Maximum likelihood and entropy // J.Opt. Soc. Am. – 1972. – V.62. – P.511–518.
3. Minierbo G. MENT: A maximum entropy algorithm for reconstructing a source from projection data // Comput. Graph. Process. – 1979. – V.10. – P.48–68.

4. Баранов В. А., Чекалин А. С. Система цифрового томосинтеза для неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 1988. – № 5. – С.30–36.
5. Ewert U., Robbel J., Bellon C., Schumm A., Nockemann C. Digital Laminography, International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications. – Berlin, 1994. – P.148–159.
6. Baranov V. A. A variational approach to non-linear backprojection, in "Computerized tomography", papers of participants of International Symposium in Novosibirsk, Russia 1993. – Printed in Utrecht, The Netherlands, 1995. – P.82–97.
7. Youla Dante C. Generalized Image Restoration by the Method of Alternating Orthogonal Projections // IEEE Trans. on Circuits and Systems CAS-25. – 1978. – V. 9. – P.694–702.
8. Baranov V. A. Convex projections reconstruction algorithms on the basis of non-linear backprojection approach // International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications. – Berlin, 1994. – P.88–95.
9. Ewert U., Schumm A., Nockemann C., Baranov V. Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Laminographie, in Jahrestagung 1995, Zerstoerungsfreie Materialpruefung, 100 Jahre Roentgenstrahlen und die heutige Vielfalt industrieller ZfP-Praxis. – Aachen, 1995. – P.6.
10. Ewert U., Baranov V., Borchard R. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis techniques using imaging plates and Co-60 radiation // NDT & E International. – 1997. – V.30. – № 4. – P.243–248.
11. Hough P. V. Method and Means for Recognizing Complex Patterns / U.S. Patent 3069654, December 18, 1962.
12. Radon J. Uber die Bestimmung von Functionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten. – Leipzig: Ber. Verh. Sachs. Acad. Wiss., 1917.

УДК 621.384.634.3

С. В. БЕЛИКОВ, В. Г. ВОЛКОВ, Ю. Д. ЗРЕЛОВ, В. С. ПУШИН, В. Л. ЧАХЛОВ

НАДОРБИТНАЯ ИНЖЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В БЕТАТРОНЕ

Описана конструкция и приведены параметры малогабаритного бетатрона с надорбитной инжекцией. Показаны преимущества надорбитной инжекции по сравнению с классической, позволяющие улучшить параметры выведенного электронного пучка.

В бетатронах вывод ускоренных электронов за пределы ускорительной камеры, как правило, осуществляют с помощью несимметричного смещения электронов с равновесной орбиты. При этом применяют секторную обмотку, положение которой относительно выводного окна и инжектора выбирают таким образом, чтобы обеспечить максимальный вывод электронов и исключить попадание электронов на инжектор, который располагается в медианной плоскости на радиусе, большем радиуса равновесной орбиты [1].

Максимально удовлетворить этим двум требованиям затруднительно. Часть электронов попадает на инжектор и создаёт повышенный фон тормозного излучения, для устранения которого необходимо применять защитные экраны.

Известна конструкция бетатрона [2], в котором инжектор электронов расположен на радиусе, меньшем радиуса равновесной орбиты. Это упрощает систему вывода, однако значительно усложняет конструкцию инжектора и подвод к нему высокого напряжения инжекции.

Конструкция электромагнита бетатрона с гребневыми полюсами [3], формирующая управляющее поле с азимутальной вариацией, обеспечивает увеличение фокусирующих сил, а также позволяет установить инжектор над равновесной орбитой, при этом инжекторный патрубок располагается между гребнями полюса.

Для проверки эффективности надорбитной инжекции был использован малогабаритный бетатрон с четырёхгребневой конструкцией полюса [4].

Основные параметры исследуемого бетатрона: максимальная энергия ускоренных электронов 3 МэВ; радиус равновесной орбиты $r_0 = 4,5$ см; усредненный показатель спада магнитного поля на r_0 $n = 0,6$; глубина вариации поля на r_0 $f = 0,15$; частота циклов ускорения $F = 100$ Гц. Бетатрон снабжён ускорительной камерой с постоянной откачкой, имеющей несколько патрубков для размещения инжектора, выносной мишени и различных заслонок. Сечение межполюсного пространства приведено на рис.1. Инжектор смонтирован на цоколе,

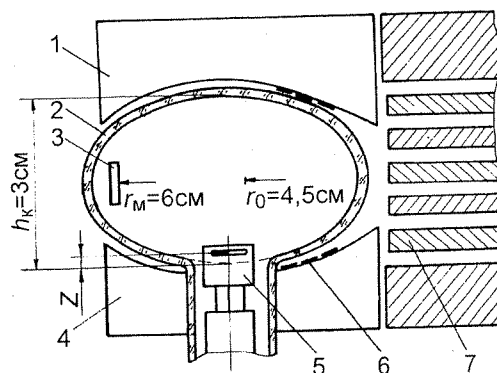


Рис.1. Межполюсное пространство бетатрона: 1, 4 – полюса электромагнита, 2 – ускорительная камера, 3 – мишень, 5 – инжектор, 6 – обмотка смещения, 7 – центральные вкладыши электромагнита