

3-ХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХСВЯЗНОГО БИНАРНОГО ОБЪЕКТА ПО МАЛОМУ ЧИСЛУ ПРОЕКЦИЙ

С. А. ЗОЛОТАРЕВ, В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, Г.-Р. ТИЛЛАК

Компьютерная радиография является наиболее распространенным способом контроля труб и визуализации выявленных коррозионных дефектов [1]. Кроме того, она давно используется для оценки толщины стенок труб по изменению оптической плотности фильма вдоль диаметра трубы [2]. Погрешность таких оценок составляет не менее 0,2...0,3 мм. Для современной промышленности необходимо снижение этого уровня до 0,1 мм и менее. Кроме того при использовании такой технологии невозможно раздельно оценить дефекты, проецирующиеся в одну и ту же область радиограммы. Для повышения разрешающей способности и определения точного геометрического положения дефектов может быть использована 3-хмерная малоракурсная томография [3]. Для преодоления проблемы высокой размерности обратной задачи предлагается использовать поверхностное представление объекта реконструкции. Еще одна отличительная черта изучаемой проблемы заключается в следующем: 1) мы исследуем так называемые однородные объекты, которые имеют постоянный коэффициент линейного ослабления. После проведения соответствующей нормировки он приводится к значению, равному единице. Кроме того, 2) источник рентгеновского излучения является точечным, 3) основным механизмом взаимодействия рентгеновского излучения с веществом является поглощение и 4) реконструируемый объект — внутренняя поверхность трубы, а внешняя поверхность — цилиндрическая с фиксированным радиусом.

Основные определения. Рассматривается нелинейное операторное уравнение

$$A(\vec{R}(M)) = \vec{F}, \quad (1)$$

где \vec{F} — совокупность измеренных данных для всех проекций.

Для N проекций: $\vec{F} = \{f_n^m\}$; $n = \overline{1, N}$, где функция $f_n^m(p)$ — измеренные данные на n -й проекции; $\{p_j^n : j = \overline{1, J_n}\}$ — позиции пикселей n -й проекции; ϑ_n — угол проецирования для n -й проекции; $J = \sum_n J_n$ — суммарное число пикселей на всех про-

екциях. Вектор $\vec{R}(M)$ — радиус-вектор текущей точки внутренней поверхности $M(x, y, z)$, $\{M_i : i = \overline{1, I}\}$ — позиции узлов решетки внутренней

поверхности. Оператор A связывает внутреннюю поверхность S , определяемую как годограф конца вектора $\vec{R}(M)$ и проекции объекта, т.е.

$$A(\vec{R}(M)) = \{A(\vec{R}(M))_n\}, \quad n = \overline{1, N}.$$

Здесь $A(\vec{R}(M))_n = f_n^c(p)$ — расчетные данные n -й проекции. Источники излучения располагаются на дуге окружности в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Плоскости детекторов перпендикулярны центральному лучу, проведенным через источник и точку вращения. Все они расположены на одном расстоянии от оси вращения.

Представление объекта. Будем рассматривать объект контроля, описываемый двумя цилиндрическими оболочками: внешней и внутренней. Внешняя оболочка в данной работе считается заданной заранее. Внутренняя оболочка задается узловыми точками в цилиндрической системе координат $\rho(\varphi, y)$, полученными дискретизацией по полярному углу $\{\varphi_k : k = \overline{1, K}\}$, и оси $OY \{y_l : l = \overline{1, L}\}$, которая совпадает с осью ординат декартовой системы координат. Число узловых точек остается постоянным в течение всего процесса реконструкции. Цилиндрическая система координат используется только для первоначальной дискретизации внутренней оболочки. Все дальнейшие операции выполняются в декартовой системе координат. Сетки по полярному углу и оси ординат будем считать равномерными. Заметим, что $I = K * L$. Для решения прямой задачи рассмотрим внутреннюю поверхность как совокупность элементарных поверхностных элементов $S_u : u = \overline{1, U}, \quad U = 2 * K * (L - 1).$

Поверхностный элемент — это треугольник, вершинами которого являются узловые точки дискретной решетки. Отметим, что границы треугольника (т.е. его стороны и вершины) могут не принадлежать поверхностному элементу. Тогда $S = \cup S_u, S_{u_1} \cap S_{u_2} = \emptyset, u_1 \neq u_2$. Проекцию элемента поверхности S_u на n -ю плоскость детекторов обозначим σ_u^n . Разбиение поверхности осуществляется таким образом, что соприкасающиеся стороны соседних треугольников и их общие вершины будут принадлежать только одному из них. Такое разбиение всегда возможно, но оно не единственное. Разбиение может быть осуществлено двумя путями:

до начала реконструкции определенным образом маркируются границы каждого треугольника с тем, чтобы они не имели общих точек с границами соседних треугольников;

в процессе реконструкции принадлежность грани к элементу поверхности S_u определяется по проекции данного треугольника σ_u^n на текущей плоскости детекторов. Это может быть установлено по топологической ориентации проекции поверхностного элемента σ_u^n на плоскости детекторов. Идея такого подхода была предложена Загоновым В. П.

В настоящей работе реализованы оба этих подхода. Были разработаны оригинальные математические алгоритмы и осуществлена их программная реализация. По затратам машинного времени они оказались эквивалентными. Основное преимущество второго подхода заключается в возможности описания внутренней поверхности в виде произвольным образом упорядоченного списка поверхностных элементов.

Расчет прямого оператора. Осуществляется последовательный перебор всех элементов внутренней оболочки и для каждого из них:

- а) находится проекция треугольника S_u на текущую плоскость детекторов;
- б) устанавливаются границы треугольника σ_u^n ;
- в) определяются все пиксели $p_j^n : j = \overline{1, J_n}$, центры которых лежат внутри треугольника σ_u^n или на его границах;
- г) рассчитываются точки пересечения лучей, проходящих через центры внутренних и граничных пикселей треугольника σ_u^n с внутренней и внешней поверхностью объекта.

Вычисление точек пересечения с внутренней поверхностью сводится к пересечению соответствующих лучей с плоскостью, определяемой элементом S_u . Точки пересечения с внешней поверхностью рассчитываются один раз до начала реконструкции.

После определения всех точек пересечения, лежащих на конкретном луче, осуществляется их сортировка по возрастанию либо убыванию параметра прямой, на которой лежит луч.

Число точек пересечения для каждого луча всегда будет четным. Вычисляя расстояния между соответствующими парами точек и суммируя их, определим лучевую сумму $f_n^c(p)$ для пикселя $p_j^n : j = \overline{1, J_n}$, определяющего данный луч.

Таким образом, после обхода всех проекций и расчета прямого оператора $A(\vec{R}(M))_n = f_n^c(p)$, $n = \overline{1, N}$, мы определим все расчетные лучевые суммы.

Функционал

$$\delta_n(\vec{R}(M)) = \sum_{p_1}^n |f_n^c(p) - f_n^m(p)| \sum_{p_1}^n f_n^m(p) \quad (2)$$

измеряет отклонение внутренней поверхности S , заданной дискретной решеткой узлов M_i , $i = \overline{1, I}$, от внутренней поверхности, соответствующей измеренным данным для n -й проекции. Среднее значение отклонения

$$\delta_{mid}(\vec{R}(M)) = \sum_n \delta_n(\vec{R}(M)) / N. \quad (3)$$

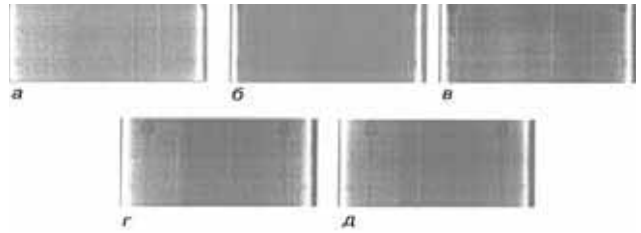


Рис. 1. Проекция для углов, град: а – 0; б – 25; в – 45; г – (-25); д – (-45).



Рис. 2. Реконструированная внутренняя поверхность трубы, развернутая по полярному углу.

Принцип деформации внутренней поверхности объекта. Для реконструкции внутренней поверхности объекта используется итерационная процедура, обеспечивающая последовательную минимизацию функционала невязки (3). Междуитерационная деформация внутренней поверхности осуществляется с использованием взвешенной поддержки центральных областей трубы, где эффект рассеивания рентгеновских лучей не вносит значительный вклад в измеренные данные. Эта процедура производится следующим образом:

осуществляется последовательный перебор всех узловых точек внутренней поверхности M_i , $i = \overline{1, I}$. Через каждую узловую точку M_i проводим N лучей, которые пересекут соответствующие плоскости детекторов в пикселях p_j^n , $n = \overline{1, N}$. Для них вычисляем разности между измеренными и вычисленными значениями лучевых сумм $\Delta f_n(p) = f_n^c(p) - f_n^m(p)$. Потом находим взвешенную среднюю разность

$$\sum (M_i) = \sum_n \Delta f_n(p) \cos(\Psi_i^n) / N, \quad (4)$$

где Ψ_i^n – это угол между проекциями на плоскость, перпендикулярную оси ординат луча, проведенного через данный узел M_i от источника, расположенного под углом ϑ_n , и радиус-вектора $(\vec{R}(M))$. Величина смещения узла M_i будет

$$h(M_i) = \lambda^{(0)} * \sum (M_i), \quad 0 < \lambda^{(0)} < 1, \quad (5)$$

где λ_0 – величина параметра релаксации для 1-й итерации.

Релаксационные методы решения систем уравнений и неравенств подробно рассмотрены в [5]. Смещение производится вдоль перпендикуляра, опущенного из данного узла M_i на ось ординат. Если в среднем рассчитанные лучевые суммы больше, чем измеренные, то смещение $h(M_i)$ будет положительным. Это приведет к увеличению расстояния между узлом и осью ординат, т.е. толщина стенки объекта станет меньше. Для обеспечения более гладкого смещения точек внутренней поверхности осуществлялось усреднение двумерного массива $h(M_i)$, $i = \overline{1, I}$, методом скользящего окна. При

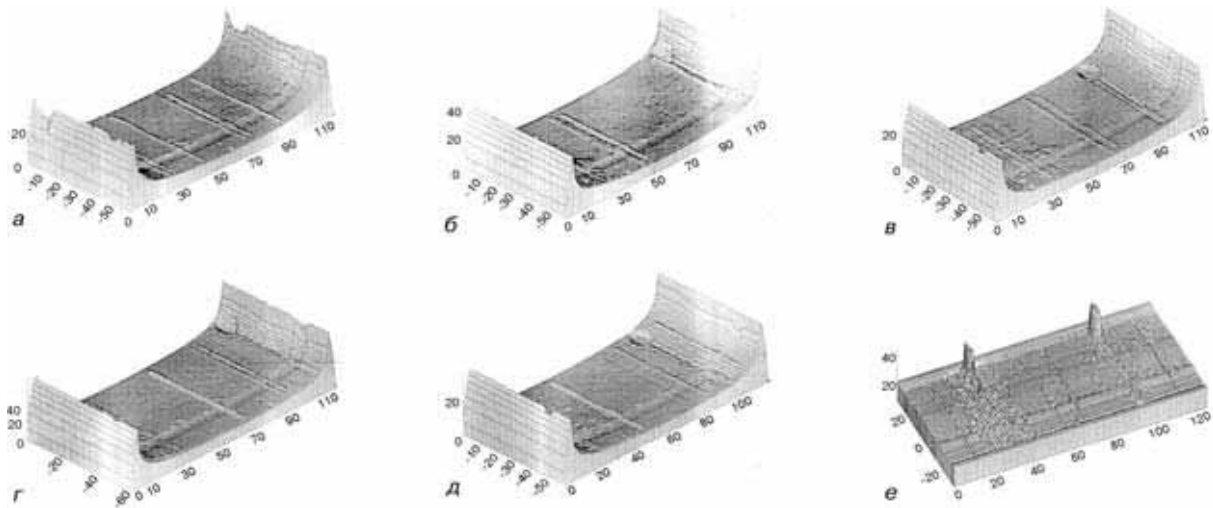


Рис. 3. Проекция для разных углов, полученные по реконструированным объектам, для углов, град: а – 0; б – 25; в – 45; г – (-25); д – (-45); е – трехмерное представление внутренней поверхности реконструированного объекта.

значениях $\delta_{mid}(\vec{R}(M)) > 0,2$ фильтрация производилась окном 5×5 элементов. После достижения значений $\delta_{mid}(\vec{R}(M)) \leq 0,2$ размер окна уменьшался до 3×3 элементов. Смещение внутренней границы осуществлялось для всех узловых точек одновременно. После смещения всех узловых точек M_i получим новую дискретную решетку $M_i^{(q)}, i = 1, \bar{I}$. Для $(q + 1)$ -й итерации будем иметь соответственно:

$$\sum (M_i^{(q)} = \sum_n \Delta_n^{(q)}(p) \cos(\Psi_i^n) / N, \quad (4^*)$$

$$h(M_i^{(q)}) = \lambda^{(q)} \sum (M_i^{(q)}), \quad 0 < \lambda^{(q)} < 1. \quad (5^*)$$

После внесения поправок $h(M_i^{(q)}, i = 1, \bar{I}$, получим очередное приближение $\vec{R}(M_i^{(q+1)}), i = 1, \bar{I}$. Итерационный процесс останавливался, если для трех последовательных итераций не удавалось получить лучшее приближение, т. е. если справедливы неравенства

$$\begin{aligned} \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) &\geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-1)})), \\ \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) &\geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-2)})), \\ \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) &\geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-3)})). \end{aligned} \quad (6)$$

Пример применения алгоритма. Для проверки предлагаемого метода в ВАМ (Берлин) осуществлен эксперимент, в котором получены пять проекций трубы из нержавеющей стали. Съемка экспериментальных данных проводилась с фиксацией полученных радиограмм на новом типе детекторов – люминесцентной регистрирующей пластине (Imaging Plate) [4]. Внешний диаметр трубы 112 мм, толщина стенки 3,6 мм.

Внутренняя поверхность трубы имела впадины и выпуклости различных размеров. Для проверки разрешающей способности алгоритма к внутренней поверхности трубы прикрепили четыре проволоочки диаметрами 1,8; 1,4; 1,25 и 0,8 мм. Просвечивание трубы осуществлялось придиевым источником.

Время экспозиции 6 мин. Получено пять изображений при углах поворота трубы +45; +25; 0; -25 и -45°. Размер пиксела исходных изображений 50 мк. Расстояние от источника до детектора 1604 мм; от нижнего края трубы до плоскости детекторов 12 мм. Это привело к сильному рассеиванию на краях трубы. Для данной геометрии источник излучения можно считать точечным, т.е. просвечивание осуществляется коническим пучком. Коэффициент линейного ослабления материала трубы $\mu = 74,8 \text{ м}^{-1}$.

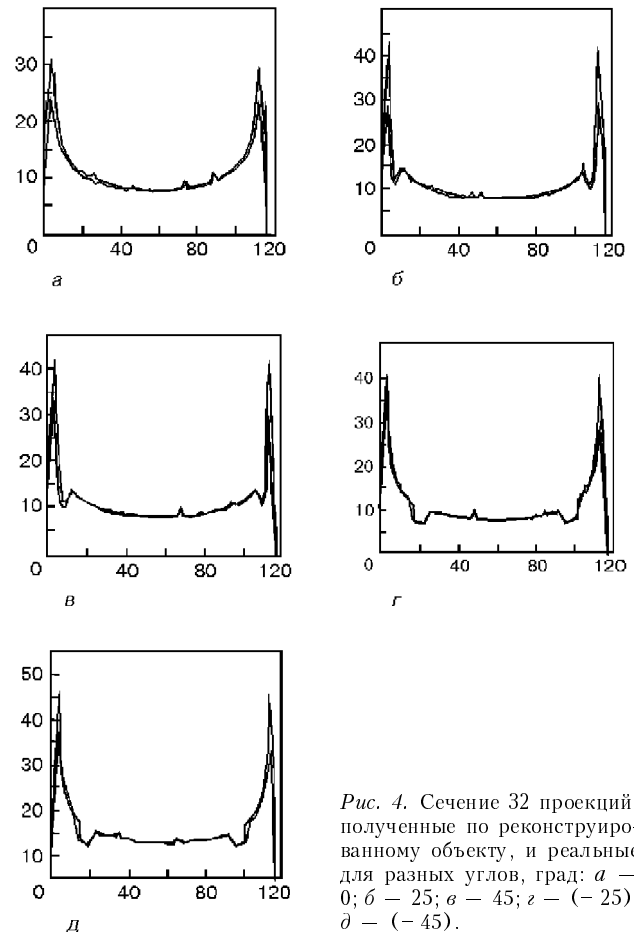


Рис. 4. Сечение 32 проекций, полученные по реконструированному объекту, и реальные для разных углов, град: а – 0; б – 25; в – 45; г – (-25); д – (-45).

Для проведения реконструкции изображения были переведены в более крупную сетку. Размер пиксела новых изображений составил 0,2 мм. Размер изображений получили равным 593×299 пикселов. Дискретизация внутренней поверхности: по углу 1200 точек, а по оси ординат 213 точек (0,3° и 0,3 мм — размер интервалов по углу и координате). Число элементов внутренней поверхности равно 508800.

Число итераций обычно составляло 10–15. Время счета на компьютере Pentium-200 порядка двух часов. Это время можно значительно сократить, если задействовать дополнительную оперативную память. Функционал невязки минимизировался до значения 0,0785.

По непосредственной оценке в сравнении с реальным объектом установлено, что погрешность реконструкции составила порядка 2 %, а величина артефактов — 1 %. Среднее отклонение реконструированного внутреннего радиуса трубы от истинного значения в тех местах, где не было выступов и впадин равно 0,1 мм. Используемые проекции и результаты реконструкции приведены на рис. 1–4.*

ВЫВОДЫ

Разработан метод реконструкции 3-хмерных изображений объектов по данным ограниченного числа рентгеноскопических проекций при наличии сущес-

твенной модельной неопределенности на краях (за счет краевых эффектов и дополнительного рассеивания). Сущность метода состоит в использовании взвешенной поддержки проекционных данных в зависимости от расстояния до проекции края трубы. Экспериментальная проверка метода показала его высокую эффективность при реконструкции внутренней поверхности коррелированных труб по малому числу проекций (в эксперименте 5) и ограниченном угле обзора (90°).

1. *Zscherpel U., Bellon C.* Wall Thickness Estimation from Digitized Radiographs., 7-th ECNDT Conference. — Copenhagen, 1998. — P. 2819–2825.
2. *Willems P., Vaessen B.* — Agfa Gevaert. — Belgium. Hueck W. VEBA Ol. — Germany. Ewert U. a. o., BAM — Berlin. Applicability of CR for corrosion and Wall Thickness Measurements, 7-th ECNDT Conference. — Copenhagen, 1998 — P. 2774–2781.
3. *Vengrinovich V., Denkevich Y., Tillack G.-R., Heine S.* X-ray 3-D reconstruction using minimal projections and maximum a priori knowledge. Preceding International Conference «Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics». — Minsk, Belarus, 1995. P. 77–81.
4. *Ewert U., Onel Y., Zscherpel U., Stade J.* — BAM, Germany. Willems. P. — Agfa Gevaert. — Belgium., 7-th ECNDT Conference. — Copenhagen, 1998. P. 2725–2732.
5. *Herman G. T.* Image reconstruction from projections. The fundamentals of computerized tomography. Academic press. — New-Jork, 1980.

Ин-т прикладной физики НАН Беларуси,

Минск

Федеральный ин-т исследования материалов и контроля,

Берлин

Поступила в редакцию

20.09.2000

Всероссийская конференция с международным участием

СВАРКА И КОНТРОЛЬ-2001

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ

18–20 сентября 2001 г.

г. Воронеж

- ✓ Технология и оборудование для поверхностного упрочнения и нанесения покрытий
- ✓ Методы и средства контроля и диагностики сварных соединений
- ✓ Автоматизация и компьютеризация сварочных процессов
- ✓ Сертификация продукции, оборудования, технологии, сварочных материалов и персонала в сварочном производстве

Тел. / факс: (0732) 71-65-59, E-mail: alex@mk.vrn.ru

* Эксперимент по получению рентгеноскопических проекций трубы выполнен в BAM (Berlin) в лаборатории рентгенографии и ламинографии с участием У. Эверта, И. Онея, А. Кунцевича, В. Венгриновича.