УДК 620.179.15:621.391:621.396.96:535.317.25

# АПЕРТУРНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ТЕНЕВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ. Ч. II. ДВУМЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ

В.И. Солодушкин, В.А. Клименов, В.А. Удод, А.К. Темник

Томский политехнический университет

E-mail: vi\_s@mail.ru

Предложен достаточно простой и технически легко реализуемый алгоритм двумерной коррекции апертурных искажений теневых радиационных изображений, основанный на инверсии искажений в пространственной области. Приведены конкретные примеры восстановления теневого радиационного изображения в соответствии с данным алгоритмом.

#### Ключевые слова:

Апертура, алгоритм коррекции искажений, радиометрическая система, неразрушающий контроль, теневое радиационное изображение.

#### Key words:

Aperture, algorithm correction of distortions, radiometric system, non-distruction control, shadow radiation image.

#### Введение

Процесс визуализации теневого радиационного изображения объекта контроля в радиометрических системах неизбежно сопровождается различными по характеру и величине искажениями. Среди таковых и апертурные искажения, обусловленные, в частности, конечными размерами апертуры детектора излучения [1–5]. Они проявляются как усреднение изображения по апертуре детектора, что приводит к «размытию» изображения и уменьшению контраста мелких деталей. В результате снижается вероятность обнаружения локальных дефектов и пространственная разрешающая способность радиометрической системы контроля в целом.

Методы коррекции апертурных искажений, как правило, реализуются в частотной области. Технически это сопряжено с необходимостью использования компьютерной техники [4, 6]. Кроме того, полная коррекция апертурных искажений в частотной области оказывается принципиально невозможной из-за наличия нулей у передаточной функции апертуры детектора излучения, что имеет место в большинстве практических случаев [4, 6, 7]. Вследствие чего существенное значение приобретает задача разработки эффективных алгоритмов коррекции апертурных искажений теневых радиационных изображений в радиометрических системах контроля, основанных на инверсии искажений в пространственной области.

### Алгоритм двумерной коррекции апертурных искажений

Для двумерной функции (изображения) апертурную трансформацию (искажение) формально можно описать уравнением:

$$\int_{x-a}^{x} du \int_{y-b}^{y} s_{1}(u,v) dv = s_{2}(x,y)$$

где  $s_1(u,v)$ ,  $s_2(x,y)$  — входное и выходное изображения соответственно:  $[0; a] \times [0; b]$  — апертура детектора; u и v — размеры окна коллиматора. При условии, что

в 2—4 квадрантах  $s_1(x,y)=0$ , вытекает, что формула инверсии для данного интегрального уравнения будет иметь следующий вид:

$$s_1(x, y) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N s_2(x - ma; y - nb) \right),$$

где *m* равно целой части дроби x/a; а n — целой части дроби y/b. Или, что то же самое,

$$s_1(x, y) = \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{N} s(x - ma; y - nb),$$

где 
$$s(x, y) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} s_2(x, y).$$

Численную реализацию данного двумерного алгоритма обращения можно записать в виде:

$$s_{1}(x, y) \approx \frac{K}{\Delta a \Delta b} \sum_{i=-n_{x}}^{i=n_{x}} \sum_{j=-n_{y}}^{j=n_{y}} ijs_{2}(x+i\Delta a, y+j\Delta b),$$

$$K = \frac{9}{n_{x}n_{y}(n_{x}+1)(n_{y}+1)(2n_{x}+1)(2n_{y}+1)};$$

$$2\Delta a n_{x} \leq a; \quad 2\Delta b n_{y} \leq b,$$

где  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  — шаги дискретизации изображения  $s_2(x,y)$  вдоль соответствующих координатных осей, а  $(2n_x+1)(2n_y+1)$  — число отсчетов изображения  $s_2(x,y)$ , используемых для нахождения оценки изображения  $s_1(u,y)$  в точке (x,y).

Недостатки данного алгоритма:

- достаточно быстрое увеличение статистической погрешности восстановления: дисперсия восстановленного изображения в точке (*x*,*y*) растёт пропорционально количеству слагаемых равного произведению *mn*, вследствие того, что при радиометрических измерениях изображение *s*<sub>2</sub>(*x*,*y*) «зашумлено» аддитивной помехой со слабокоррелированными значениями;
- увеличение объёма вычислений при численной реализации алгоритма, обусловленного ростом числа слагаемых в формуле обращения.

Приведем также алгоритм с применением набора специальных коллимационных масок [8]. Суть этого алгоритма заключается в перекрытиях объекта контроля коллимационными масками, состоящими из набора прозрачных и непрозрачных (для излучения) зон прямоугольной формы. При этом апертура каждого отдельного детектора (имеющая прямоугольную форму) условно разбивается на *К*×*K* частичных прямоугольников (пикселей), а время измерения излучения в каждом из маскированных состояний детектора считается постоянным. Для наглядности на рис. 1 представлен полный цикл измерения излучения для одной позиции дискретного сканирования объекта контроля линейкой из трех детекторов с апертурами из 3×3 пикселей. Суть последующей обработки заключается в том, что от величин измерений при открытой линейке детекторов (положение 1 на рис. 1) вычитаются измерения при частичном перекрытии линейки коллимационной маской (положения 2–10 на рис. 1).

Данный алгоритм имеет ряд недостатков: • сложность технической реализации;  дискретность сканирования в двух направлениях, приводящая к систематической составляющей погрешности измерения излучения.

Для преодоления недостатков вышеуказанных алгоритмов нами предлагается новый алгоритм нахождения исходного радиационного изображения  $s_1(x,y)$ , основанный на использовании другого способа обработки информации. Сущность предлагаемого алгоритма заключается в следующем. Применяется дискретно-непрерывное сканирование (по направлению оси OX – дискретное, по направлению оси OY – непрерывное). Непрозрачная для излучения прямоугольная пластина вводится в зону пучка с постоянной скоростью в каждом коллимационном окне многоканальной системы контроля (рис. 2).

При таком сканировании для каждого коллимационного окна получим уравнение:

$$\int_{d}^{d+a} dx \int_{0}^{b} s_{1}(x, y) dy - \int_{0}^{y} dv \int_{j\Delta x-l}^{j\Delta x} s_{1}(x, v) dx = s_{2}(x, y) \Big|_{x=j\Delta x}.$$



Рис. 1. Набор апертур переменной прозрачности из 3×3 пикселей в линейке из 3-х детекторов, соответствующих последовательным перекрытиями линейки детекторов коллимационными масками, для одной позиции дискретного сканирования объекта



**Рис. 2.** Схема сканирования для предлагаемого алгоритма двумерной коррекции апертурных искажений (стрелками указаны направления сканирования)

Дифференцируя по переменной *у*, получим:

$$-\frac{\partial s_2(x,y)}{\partial y}\bigg|_{x=j\Delta x} = \int_{j\Delta x}^{j\Delta x} s_1(x,y)dx.$$

Здесь  $[d, d+a] \times [0, b]$  – апертура детектора;  $\Delta x$  – шаг сканирования пластины вдоль оси *OX*; *l* – ширина непрозрачного тела в направлении оси *OX*; *a*×*b* – размеры апертуры в линейке детекторов; *j*(*j*=1,2,3,...) – номер шага сканирования в направлении оси *OX*.

Ясно, что величина

$$\frac{1}{l}\int_{j\Delta x-l}^{j\Delta x}s_1(x,y)dx$$

является оценкой *j*-го столбца радиационного изображения.

Преимуществом данного алгоритма по сравнению с алгоритмом, основанным на применении коллимационных масок, является более простая техническая реализация и возможность получения оценки радиационного изображения в точке с произвольной ординатой. Кроме того, варьируя значением шага, можно улучшать качество получаемого изображения.

Результаты двумерной коррекции на основе предложенного алгоритма представлены на рис. 3–5.

Как видно из рис. 1–3, предложенный алгоритм создаёт потенциальные возможности для качественного восстановления изображений близко расположенных дефектов различной формы. Это равносильно повышению пространственной разрешающей способности радиометрической системы контроля с визуальным отображением дефектоскопической информации.

## Выводы

Разработан алгоритм двумерной коррекции апертурных искажений теневых радиационных изображений для радиометрических систем неразрушающего контроля, основанный на простран-



Рис. 3. Пример восстановления изображения двух прямоугольных дефектов размером 1×3 мм. Изображение: 1) исходное теневое; 2) искаженное теневое после сканирования апертурой размером 2×2 мм; 3) восстановленное



Рис. 4. Пример восстановления изображения 4-х прямоугольных дефектов размером 1×1 мм. Изображение: 1) исходное теневое; 2) искаженное теневое после сканирования апертурой размером 2×2 мм; 3) восстановленное



**Рис. 5.** Пример восстановления изображения 3-х дефектов, имеющих форму шаровых пор диаметра 1 мм и расположенных на расстоянии 2 мм друг от друга (между центрами). Изображение: 1) исходное теневое; 2) искаженное теневое после сканирования апертурой размером 2×2 мм; 3) восстановленное

ственно-временной модуляции пучка излучения непрозрачной пластиной в пределах каждой апертуры из линейки детекторов. Реконструкция изображений по данному алгоритму обладает тем преимуществом, что повышена точность радиометрических измерений, а количество вычислительных

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Завьялкин Ф.М., Солодушкин В.И., Удод В.А. Коррекция апертурных искажений пространственным кодированием проекций // II Всес. симп. по вычислительной томографии: Тез. докл. – Куйбышев, 1985. – С. 57–58.
- Sidulenko O., Solodushkin V., Udod V. Correction of aperture distortions in radiometric systems of radiation control // Proc. of the 5<sup>th</sup> Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology. – Tomsk, June 26–July 3, 2001. – Tomsk, 2001. – P. 374–377.
- Довнар Д.В., Предко К.Г. Метод устранения прямолинейного равномерного смаза изображения // Автометрия. – 1984. – № 6. – С. 94–97.
- Сондхи М.М. Реставрация изображения: устранение пространственно-инвариантных искажений // Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин / под ред. Г. Эндрюса и Л. Инло. – М.: Мир, 1973. – 219 с.

операций значительно уменьшено по сравнению с общеизвестными алгоритмами инверсии.

Работа выполнена в рамках программы развития Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» на 2009–2018 гг.

- Троицкий И.Н. О коррекции постоянной времени сглаживающего фильтра в сцинтилляционных гамма-дефектоскопах // Дефектоскопия. – 1973.– № 2. – С. 88–92.
- Фриден Б. Улучшение и реставрация изображения // Обработка изображений и цифровая фильтрация / под ред. Т. Хуанга. – М.: Мир, 1979. – 320 с.
- Солодушкин В.И., Удод В.А. Оптимальная по разрешающей способности одномерная фильтрация изображений // Оптика атмосферы. – 1991. – Т. 4. – № 10. – С. 1030–1034.
- Федоров Г.А. Радиационная интроскопия: Кодирование информации и оптимизация эксперимента. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 109 с.

Поступила 07.09.2010 г.