

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ АПЕРТУРНОЙ ФУНКЦИИ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ В КОМПТОНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Произведен вывод математических зависимостей, описывающих функцию роста и апертурную функцию рассеивающего объема в системах комптоновской томографии. Получены аналитические соотношения, построены графические зависимости апертурных функций по трем координатным направлениям. Даны рекомендации относительно выбора предпочтительного направления сканирования.

Системы пространственного отбора комптоновской томографии конструируются с применением двух или более коллимационных каналов. Пересечение первичного пучка излучения и зоны чувствительности детекторов дает возможность получения рассеивающего объема (РО), которым проводится сканирование объекта контроля. Размер и форма рассеивающего объема описываются апертурной функцией $S(x, y, z)$, участвующей в дальнейшей обработке изображения. Исследования показали, что экспериментальные измерения $S(x, y, z)$ сопряжены с большими трудностями. Так, при снятии самой характеристики $S(x, y, z)$ очень сложно реализовать "точечный" рассеиватель. При вычислении $S(x, y, z)$, как производной от переходной характеристики $V(x, y, z)$, сложно использовать "полубесконечную" геометрию по одному направлению, не нарушая геометрий по двум другим осям. Наибольшего соответствия, а следовательно, и большей точности реконструкции, можно добиться с помощью детального математического описания апертурной функции рассеивающего объема (АФРО) по конструктивным данным коллимационной системы.

Каждая установка комптоновской томографии имеет свои конструктивные особенности, размерные характеристики, следовательно, и свою форму рассеивающего объема. При этом форма рассеивающего объема однозначно определяет апертурную функцию, а также и пространственное разрешение системы.

Общие подходы для описания АФРО сформулированы в статьях [1] для установки, используемой в НПО "АЛТАЙ" г. Бийска и [2] для томографа "TomScan-200", г. Москвы.

В данной статье объектом исследования является система CBS LBD китайского производства [3]. Для построения АФРО необходимо детальное описание геометрической фигуры, которая образуется при взаимном пересечении первичного пучка излучения, фокусируемого узким цилиндрическим коллиматором и зоной чувствительности детекторов (4шт.), которая формируется коллимационной системой, состоящей из набора стальных пластин (рис. 1). Пластины собраны в секции по 11шт. с каждой стороны от центральной оси. Строение секции показано на рис. 2.

Так как данный томограф может обеспечить сканирование в трех взаимно перпендикулярных направлениях, то форма апертурной характеристики по каждому направлению будет своя.

В первом приближении будем учитывать то, что пучок квантов, образуемый коллиматором источника, представляет собой форму цилиндра, поэтому можно записать уравнение прямых, ограничивающих данную фигуру в плоскости (y, z) .

$$\begin{aligned} y_0(z) &= -1.1667 \cdot z + 177.184 \\ y_1(z) &= -1.1667 \cdot z + 175.866 \end{aligned} \quad (1)$$

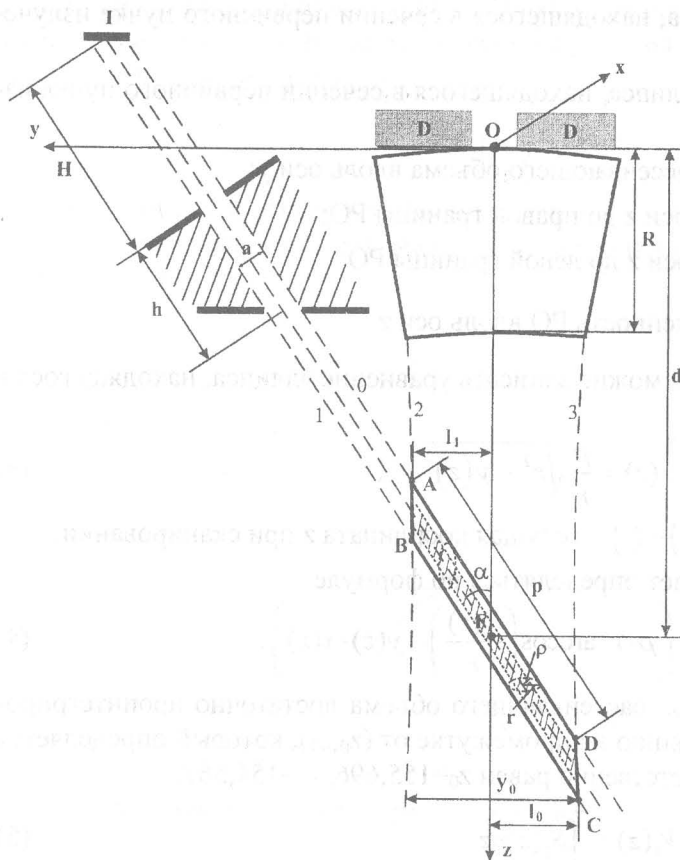


Рис. 1. Сканирующая система томографа CBS LBD

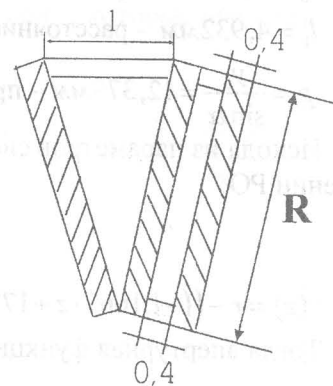


Рис. 2. Секция фокусирующего коллиматора томографа CBS LBD

Зона чувствительности детекторов будет ограничена прямыми, записанными в следующей форме:

$$\begin{aligned} y_2(z) &= 0.217 \cdot z - 36.97, \\ y_3(z) &= 0.099 \cdot z - 10.835. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как рассеивающий объем представляет собой сложную X-образную фигуру, то и форма апертурной функции при сканировании в различных направлениях будет своя.

Сканирование вдоль оси z

При сканировании в данном направлении АФРО будет состоять из трех участков:

1. Зона входа (между точками С и D)

АФРО определяется площадью сегмента, расположенного в сечении рассеивающего объема при пошаговом перемещении системы сканирования вдоль оси z.

Параметры сканирующей системы:

$a = 1 \text{ мм}$ - диаметр первичного пучка излучения;

$\alpha = 49,4^\circ$ - угол, образованный пересечением центральных осей пучков коллиматора источника и детектора;

$H = 203 \text{ мм}$ - расстояние от фокуса рентгеновского аппарата до преколлиматора;

$h = 12 \text{ мм}$ - длина преколлиматора;

$d = 151,3 \text{ мм}$ - фокус постколлиматора;

$R = 80 \text{ мм}$ - длина постколлиматора;

$\rho = 0,5 \text{ мм}$ - малая ось эллипса, находящегося в сечении первичного пучка излучения;

$r = 0,659 \text{ мм}$ - большая ось эллипса, находящегося в сечении первичного пучка излучения;

$y_0 = 9,399$ - протяженность рассеивающего объема вдоль оси y ;

$l_0 = 4,467 \text{ мм}$ - расстояние от оси z до правой границы РО;

$l_1 = 4,932 \text{ мм}$ - расстояние от оси z до левой границы РО;

$p = \frac{y_0}{\sin \alpha} = 12,379 \text{ мм}$ - протяженность РО вдоль оси z .

Исходя из параметров системы можно записать уравнение эллипса, находящегося в сечении РО:

$$x(z) = \frac{\rho}{r} \sqrt{r^2 - y(z)^2}, \quad (3)$$

где $y(z) = r - ((-1,1667 \cdot z + 177,184) + l_0)$ - текущая координата z при сканировании.

Тогда апертурная функция будет определяться по формуле

$$S_1(z) = \left(\rho \cdot r \cdot \arccos \left(\frac{y(z)}{r} \right) - y(z) \cdot x(z) \right). \quad (4)$$

Для построения функции роста рассеивающего объема достаточно проинтегрировать полученную апертурную функцию на промежутке от (z_0, z_1) , который определяется координатами точек С и D и соответственно равен $z_0 = 155,696$, $z_1 = 154,567$.

$$V_1(z) = \int_{z_0}^{z_1} S_1(z) dz. \quad (5)$$

2. Средняя зона (между точками D и B)

Искомая апертурная функция системы будет определяться площадью эллипса, расположенного в сечении РО:

$$S_2(z) = \pi \cdot \rho \cdot r, \quad (6)$$

где $h(x) = z(x) \cdot \sin \alpha$ - приращение функции при сканировании вдоль оси z , определяемое шагом сканирования

При этом для нахождения функции роста рассеивающего объема необходимо проинтегрировать полученную апертурную функцию на промежутке (z_1, z_2) , который определяется координатами точек D и B и соответственно равен $z_1 = 154,567$, $z_2 = 147,64$.

$$V_2(z) = \int_{z_1}^{z_2} S(z) dz. \quad (7)$$

3. Зона выхода (между точками B и A)

Определяется аналогично зоне входа

$$x(z) = \frac{\rho}{r} \sqrt{r^2 - y(z)^2}, \quad (8)$$

где $y(z) = -r + (l_1 - (-1,1667 \cdot z + 175,866))$ - текущая координата z при сканировании.

Тогда апертурная функция будет определяться по формуле

$$S_3(z) = \left(\rho \cdot r \cdot \arccos \left(\frac{y(z)}{r} \right) - y(z) \cdot x(z) \right). \quad (9)$$

При интегрировании апертурной функции на промежутке (z_2, z_3) , определяемом координатами точек А и В, соответственно $z_2=147,64$, $z_3=146,54$, получим формулу для определения функции роста РО.

$$V_3(t) = \int_{z_2}^{z_3} S_3(z) dz. \quad (10)$$

Объединив все три рассмотренных участка, получим зависимости АФРО и функции роста рассеивающего объема при сканировании вдоль оси z , которые представлены на рис. 3 (а, б).

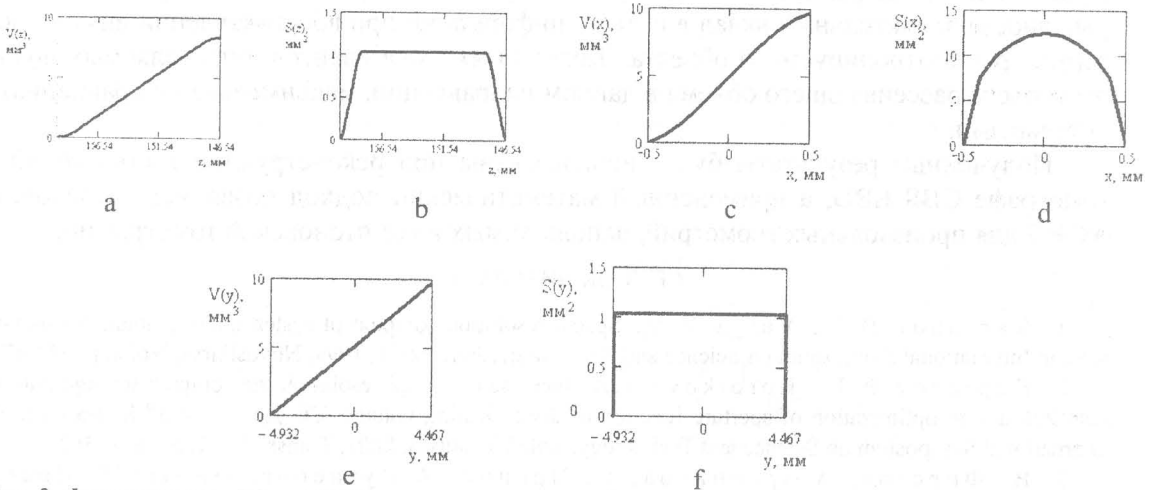


Рис. 3. Функции роста РО и АФРО при сканировании: а, б – вдоль оси z ; с, d – вдоль оси x ; е, f – вдоль оси y

Сканирование вдоль оси x

АФРО будет определяться площадью параллелограмма, расположенного в сечении РО при сканировании

$$S(x) = 2 \cdot p \cdot h(x), \quad (11)$$

где $h(x) = \left(\frac{r}{\rho} \sqrt{\rho^2 - x^2} \right) \cdot \sin \alpha$ - высота параллелограмма.

При интегрировании полученной апертурной функции на промежутке, определяемом малой осью эллипса, получим функцию роста РО:

$$V(x) = \int_{-\rho}^{\rho} S(x) dx. \quad (12)$$

Полученные зависимости приведены на рис. 3 (с, d).

Сканирование вдоль оси y

Апертурная функция будет определяться площадью эллипса, расположенного в сечении РО при сканировании:

$$S(y) = \pi \cdot \rho \cdot r. \quad (13)$$

Путем интегрирования $S(y)$, получим функцию роста РО:

$$V(y) = \int_{-l}^{l_0} S(y) dy. \quad (14)$$

Полученные зависимости приведены на рис. 3 (е, f).

АФРО представляет собой сложную объемную фигуру, образованную пересечением слаборасходящегося цилиндра и X-образной протяженной фигуры. Получены координаты всех особых точек, математические выражения и массивы чисел, описывающие переходные функции $V(x)$, $V(y)$, $V(z)$ и апертурные функции по всем направлениям $S(x)$, $S(y)$, $S(z)$.

Исходя из приведенных зависимостей, геометрические размеры РО имеют порядок 1мм по оси x , 9,4мм по оси y , 9,2мм по оси z . Анализ графиков показывает, что наиболее оптимально сканирование объекта вдоль оси x , так как в этом случае апертурная функция имеет выраженный максимум и отсутствуют прямолинейные участки, которые вносят значительный вклад в потерю информации при восстановлении внутренней структуры контролируемого объекта. Также статистика квантов, определяемых функцией роста рассеивающего объема в данном направлении, максимальна по сравнению с остальными.

Полученные результаты будут использованы при реконструкции изображений в томографе CBS LBD, а примененный математический подход позволяет исследовать АФРО для произвольных геометрий, используемых в комптоновской томографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kapranov B.I., Varga V.V. Spatial resolution compton of systems, Сб. докладов Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, June 22-25, 1999, Novosibirsk, Vol 2, p. 672-676.
2. Kapranov B.I., Korotkova I.A. Increase of spatial resolution the compton tomograph-tomscan-200 due to optimization of aperture function of disseminating volume. Сб. Докладов 5th Korea - Russia International Symposium on Science and Technology, June 26 - July 3, 2001, Tomsk, Vol 1, p. 360 – 362.
3. В. Фирстов, А Бронников, С. Пронин, А Кузнецов, Gu Benli, Huang Yan Wang, Zhou Wenming Xiaochun. Метрологические аспекты радиационных интроскопических систем на основе регистрации обратнорассеянного излучения. Контроль. Диагностика, № 11 1999, с. 18 – 25.

УДК 620.179

Ю.В. АЛХИМОВ, В.К. КУЛЕШОВ

МОЗАИЧНЫЙ ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГРП ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА

Проведены исследования мозаичного детектора большой площади для регистрации рентгеновского излучения, составленного из нескольких газоразрядных преобразователей рентгеновского излучения в видимое. Рассмотрены вопросы электропитания детектора и выравнивания яркости свечения отдельных преобразователей в мозаичном блоке. Проведены испытания макета мозаичного детектора.

Работа выполнена в рамках программы сотрудничества Министерства образования Российской Федерации и Министерства Российской Федерации по атомной энергии по направлению "Научно-инновационное сотрудничество" 2002 г.

Для рентгеновского контроля объектов большого размера необходимо использовать преобразователи рентгеновского изображения в видимое большой площади. Предложено использовать для увеличения площади контроля мозаичный газоразрядный экран. Мозаичный экран составлен из нескольких газоразрядных преобразователей (ГРП) рентгеновского излучения в видимое изображение. ГРП представляет собой отпаянную плоскую камеру, которая наполнена ксеноном при атмосферном давлении. На двух противоположных стенках камеры расположены электроды. При взаимодействии рент-