

Модифицированный алгоритм обработки тенеграмм, полученных при помощи кодированных апертур

Д.В. Дранько*, С.А. Щелканов

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Искра»,
ул. Звейнека, 145, 91033 Луганск, Украина

(Получено 18.10.2012; в отредактированной форме – 01.11.2012; опубликовано online 29.12.2012)

В работе описывается новый алгоритм обработки тенеграмм, полученных при помощи кодированных апертур на основе MURA в томографических системах с использованием позиционно-чувствительных детекторов в слабосходящихся пучках гамма квантов. Показана принципиальная возможность добиться лучшего углового разрешения по сравнению с традиционным алгоритмом обработки при тех же параметрах томографической системы.

Ключевые слова: Томография, Кодированная апертура, MURA, Алгоритм, Слабосходящийся пучок.

PACS number: 29.40.Mc

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для визуализации и локализации источников гамма излучения нередко применяется метод кодированных апертур. Он был разработан в семидесятых годах прошлого века и обладает рядом преимуществ перед более традиционными сканирующими методами. А именно большей чувствительностью к зашумленным сигналам, большей скоростью измерений, возможностями томографического исследования поля зрения благодаря «фокусировке» прибора, реализующего метод кодированных апертур, на определенное расстояние между прибором и исследуемой плоскостью. Изначально метод кодированных апертур разрабатывался для астрофизических приложений, таких как гамма телескопы, однако более поздние исследования показали возможность использовать метод и при работе в ближнем и среднем поле зрения, что позволило конструировать на основе кодированных апертур медицинские томографы, приборы для локализации источников гамма излучения на местности и для контроля ядерных установок.

Стандартный алгоритм расшифровки изображения привязывает угловое разрешение и точность углового позиционирования метода к размеру элемента маски, и геометрии измерения. Это приводит к необходимости для детализации поля зрения конструировать маски с небольшим размером единичного элемента и большим количеством элементов маски, что усложняет конструкцию прибора, и приводит к дополнительным источникам помех в обрабатываемой тенеграмме, фиксируемой детектором.

Данная работа посвящена одному из путей улучшения метода кодированных апертур, позволяющего добиваться значительно лучшего разрешения и угловой локализации в расшифрованном изображении без увеличения размерности кодирующей маски.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследований является гамма телескоп с кодирующей маской и непрерывным позиционно-чувствительным детектором (ПЧД), схема измерительной системы которого представлена на рис. 1.

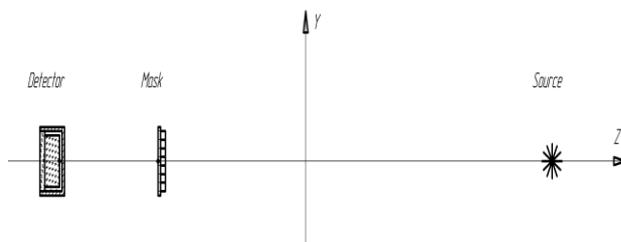


Рис. 1 – Схематическое изображение экспериментальной установки

Экспериментальные данные получены методом численного моделирования системы с использованием полномасштабной программно-имитационной модели гамма телескопа на базе пакета GEANT.

Моделируемая система имеет следующие параметры: кодированная апертура 33 на 33 с базовым фрагментом 17 на 17, построенным по методу квадратичных вычетов [1] (базовый фрагмент такой матрицы выглядит аналогично тенеграмме на рис. 2а, если поставить в соответствие красным полям пустоты в маске, а синим – свинцовые элементы) и размером элемента $15 \times 15 \times 5$ мм, позиционно чувствительный детектор, с размером чувствительной поверхности 310 на 285 мм, расстояние маска – ПЧД – 220 мм, один или несколько точечных источников гамма квантов, расположенных в плоскости, отстоящей от маски на 10 м. На выходе моделирующей программы был получен массив данных с координатами и энергией сцинтилляции событий, зарегистрированных позиционно чувствительным детектором. Количество моделируемых событий было достаточно для фиксации порядка 10^5 событий взаимодействия гамма квантов с объемом детектора.

* iskra_nipki@mail.ru

Классический алгоритм обработки данных в системах с кодированной апертурой позволяет получить угловое разрешение источников гамма квантов в пределах телесного угла, закрытого от детектора единственным элементом маски. [2]

Целью данной работы является разработка алгоритма, позволяющего существенно повысить угловое разрешение поля зрения при тех же условиях измерений и входных данных.

3. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

При классической обработке данных по Фенимору [2] необходимо преобразование массива входных данных в матрицу счетов, каждый элемент которой есть результат суммирования количества событий по площади детектора, соответствующей тени, отбрасываемой на детектор соответствующим элементом маски. При этом размерность матрицы счетов соответствует размерности базового фрагмента маски. В данной работе было предложено разбиение поверхности детектора на более мелкие участки. Фактически площадь, соответствующая тени одного элемента маски разбивалась на $d \times d$ равных участков, где d – параметр разбиения. Вид тенеграм **Sh** для классического случая и для $d = 3$ приведен на рис. 2

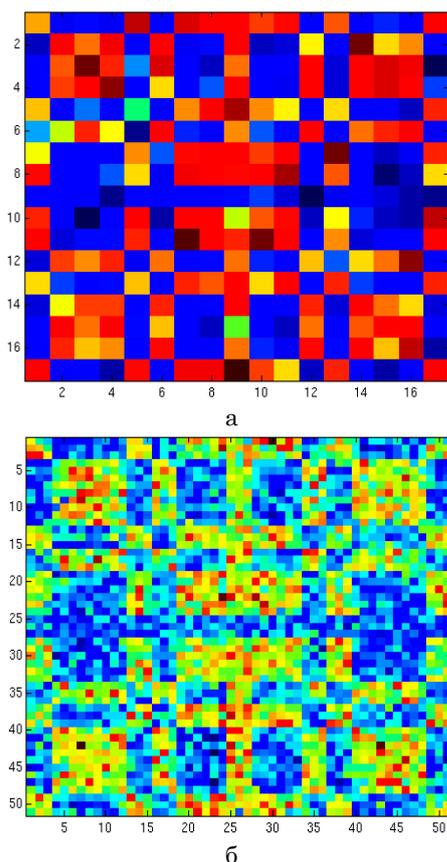


Рис. 2 – Тенеграммы 17 на 17 (а) и 51 на 51 (б), полученные из одного массива входных данных. (Здесь и далее рост значений отображен градиентом от синего к красному)

Для свертки полученной тенеграммы в исследуемом алгоритме соответственно предложено увеличить размерность обрабатываемой матрицы **G**. Новая обрабатываемая матрица G_d вычисляется по формуле:

$$G_d(i, j) = G \left[\left\lceil \frac{i-1}{d} \right\rceil + 1, \left\lceil \frac{j-1}{d} \right\rceil + 1 \right], \quad (1)$$

где квадратные скобки обозначают антье функцию. Размер матрицы G_d превышает размер матрицы **G** в $d \times d$ раз, причем каждый элемент матрицы **G** преобразуется в подмассив $d \times d$ заполненный значениями, равными значению элемента **G**.

Матрица **C** формируется путем свертки тенеграммы и обрабатываемой матрицы $C = Sh \times G_d$ по формуле:

$$C(i, j) = \sum_{k=1}^{d \times n} \sum_{l=1}^{d \times n} Sh(k, l) * G_d(k+i-1, l+j-1) \quad (2)$$

В результате формируется матрица, каждый элемент которой не несет в себе информацию исключительно об источнике излучения, находящемся в соответствующем телесном углу поля зрения, как происходит при использовании классического обрабатываемого массива, но представляет собой линейную комбинацию зарегистрированного детектором гамма излучения из близлежащих к данному углу источников. В данном случае распределение источников гамма излучения $S(i, j)$ в соответствующем телесном углу связано с матрицей **C** формулой:

$$C(i, j) = \sum_{k=1}^d \sum_{l=1}^d S(i+k-d, j+l-d) * A(k, l), \quad (3)$$

где элемент матрицы **A**, по сути представляющей аппаратную функцию отклика системы на точечный источник, имеет вид:

$$A(i, j) = \min(i, 2d - i) \times \min(j, 2d - j), \quad (4)$$

где $\min(a, b)$ – минимальное из пары чисел a и b .

Например для $d = 3$:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 6 & 4 & 2 \\ 3 & 6 & 9 & 6 & 3 \\ 2 & 4 & 6 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Данное уравнение (3) решалось методом Гаусса-Зейделя [3], который предполагает нахождение итерации решения системы $AS = C$ из формул вида:

$$A(1,1) \times S(1) = C(1,1) - A(1,2) \times S(2) - A(1,3) \times S(3) - \dots - A(1,n) \times S(n)$$

Для вычисления каждой последующей итерации $S_t(i, j)$ (начальной итерацией выбиралось нулевое решение) вычислялась промежуточная величина **R** по формуле

$$R(i, j) = \sum_{k=1-d}^{d-1} \sum_{l=1-d}^{d-1} S_{t-1}(i+k, j+l) \times A(k+d, l+d) \quad (5)$$

При классической записи системы линейных уравнений $Ax = b$, $R = Ax_{t-1}$. И соответственно $x_t(i) = (b(i) - R(i) + A(i, i) \times x_{t-1}(i)) / A(i, i)$.

$$S_t(i, j) = (C(i, j) - R(i, j) + S_{t-1}(i, j) \times A(d, d)) / (d \times d) \quad (6)$$

Каждый последующий элемент, в отличие от метода Якоби, вычисляется по последним известным итерациям остальных элементов. Отрицательные элементы $St(i, j)$ на этой же итерации зануляются. Таким образом находится искомая матрица S .

На рис. 3 изображено, как выглядит матрица S при искомом точечном источнике, расположенном в центре поля зрения для $d = 3$.

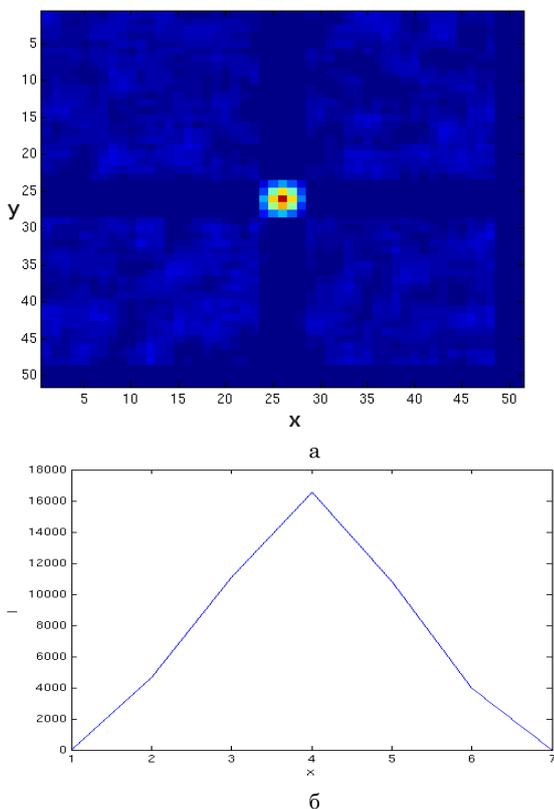


Рис. 3 – Матрица S . (а) – общий вид, (б) – срез центрального пика

На рис. 4 представлен результат решения уравнения (3) для этого случая.

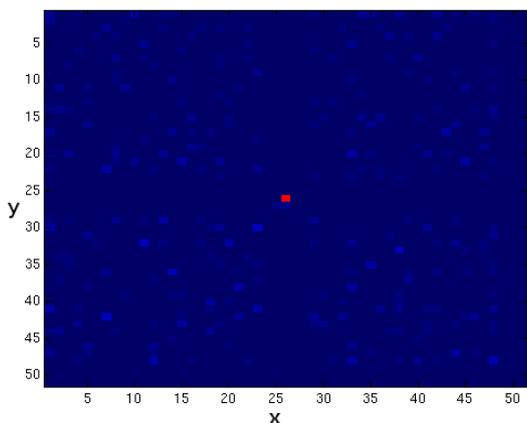


Рис. 4 – Матрица S

На рис. 5 представлены результаты для двух точечных источников, расположенных в пределах одной угловой дискретности поля зрения.

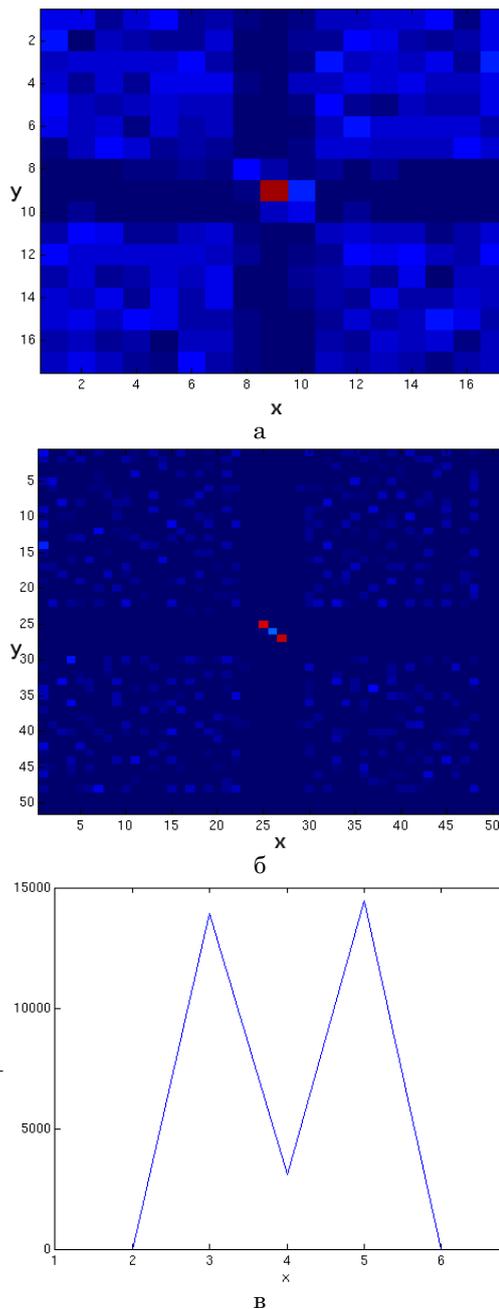


Рис. 5 – Расшифровка тенеграммы от двух точечных источников по классическому алгоритму (а) и при параметре $d = 3$ (б); (в) – срез центральных элементов по диагонали

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В условиях геометрии измерения промоделированной в данной работе, представленный алгоритм позволяет добиться улучшения углового позиционирования и углового разрешения по сравнению с алгоритмом, приведенным в [2]. Фактически два точечных источника, находящиеся в пределах одной угловой дискретности поля зрения и не разделяемые классическим алгоритмом (рис. 5а), разделяются, удовлетворяя критерию Релея (рис. 5б, в). Разрешающая способность, получаемая этим алгоритмом, не привязана жестко к количеству элементов маски, и, по-видимому, ограничивается разрешающей способностью позиционно-чувствительного детектора (ПЧД).

В рассмотренном случае идеального ПЧД, разрешающая способность значительно повышается по отношению к разрешающей способности классического алгоритма. На рис. 6 приведен результат расшифровки тенеграммы, полученной от трех точечных источников, расположенных в пределах одной дискреты

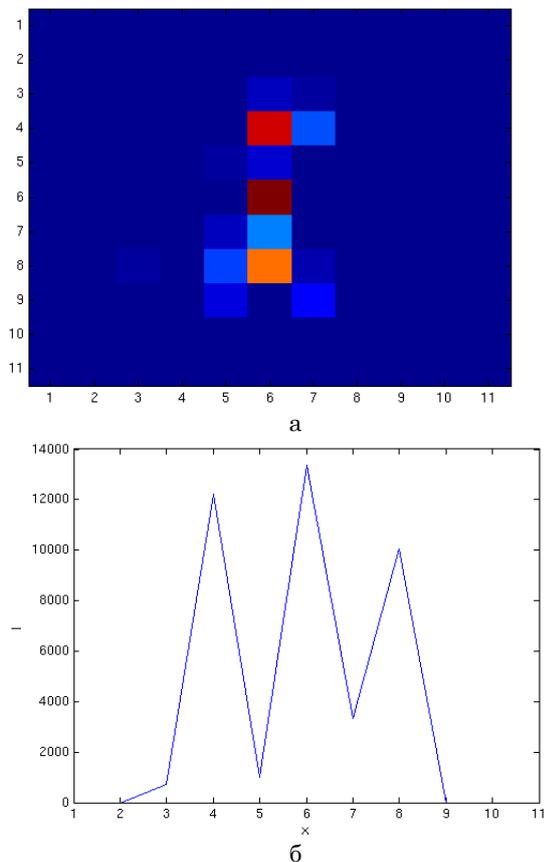


Рис. 6 – Результат расшифровки тенеграммы в пределах одной дискреты (а); срез на вертикальную ось (б)

Проведенная оценка статистической значимости показывает, что источники излучения, детектированные данным алгоритмом, сохраняют уровень статистической значимости при повышении d (рис. 7). Уровень статистической значимости k рассчитывался по формуле:

$$k = S_i / \sigma \tag{7}$$

где S_i – элемент матрицы восстановленного пространственного распределения источников гамма

излучения, σ – оценка дисперсии одного элемента изображения, вычисляемая как сумма всех счетов событий, зарегистрированных детектирующей плоскостью в течении цикла измерений [4].

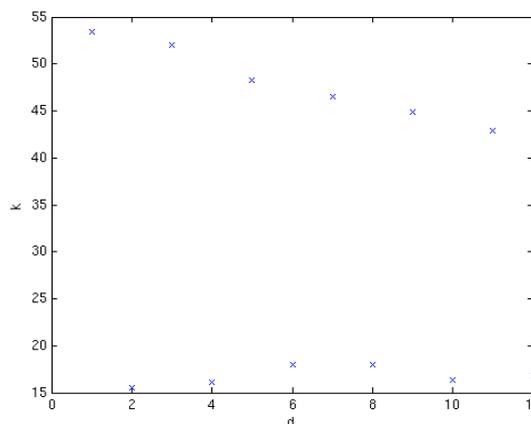


Рис. 7 – Оценка уровня статистической значимости. Значения при нечетных d соответствуют попаданию источника излучения напротив центра элемента разбиения ПЧД, при четных же источник находится напротив узла решетки разбиения

5. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали принципиальную возможность улучшения углового позиционирования и углового разрешения в системах с кодированными апертурами без изменений в кодирующей маске. Таким образом появляется возможность использовать маски с меньшим количеством элементов, что удешевляет производство, а также позволяет избежать таких нежелательных эффектов, как автоколлимация (при избыточной толщине элемента маски по сравнению с поперечными размерами элемента), в то же время позволяя не делать элементы маски тонкими, что плохо отражается на их поглощающей способности.

Однако очевидно данный алгоритм требует для своей реализации высокоточный ПЧД, так как минимально допустимый элемент разбиения не может быть сравним с погрешностью измерения координат события на ПЧД.

В настоящее время планируется более подробное изучение зависимости эффективности данного алгоритма от характеристик ПЧД и других факторов, предположительно ухудшающих данный метод.

Модифікований алгоритм обробки тінеграм, отриманих за допомогою кодованих апертур

Д.В. Дранько, С.О. Щелканов

Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Іскра»,
вул. Звейнека, 145с, 91033 м. Луганськ, Україна

У роботі описується новий алгоритм обробки тінеграм, отриманих за допомогою кодованих апертур на основі MURA в томографічних системах з використанням позиційно-чутливих детекторів в пучках гамма-квантів, які слабо розходяться. Показана принципова можливість домогтися кращого кутового дозволу у порівнянні з традиційним алгоритмом обробки при тих же параметрах томографічної системи.

Ключові слова: Томографія, Кодована апертура, MURA, Алгоритм, Пучок, що слабо розходиться.

A Modified Algorithm for Processing Shadowgraph, Obtained With the Coded Aperture

D.V. Dranko, S.A. Schelkanov

Research and development institute «Iskra», 145c, Zveinek str., 91033 Lugansk, Ukraine

This paper describes a new algorithm for processing shadowgraph obtained using coded apertures in the MURA-based tomographic systems using position-sensitive detectors in a slightly divergent beam of gamma rays. The principal possibility to achieve a better angular resolution compared to conventional processing algorithm for the same parameters tomographic system.

Keywords: Imaging, Coded aperture, MURA, Algorithm, Slightly divergent beam.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S.R. Gottesman, E.E. Fenimore, *Appl. Opt.* **28**, 4344 (1989).
2. E.E. Fenimore, *Appl. Opt.* **17**, 3562 (1978).
3. Л.И. Турчак, П.В. Плотников, *Основы численных методов, 2-е изд., перераб. и доп.* (Москва: ФИЗМАТЛИТ: 2002).
4. В.Ю. Плахотник, *Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов*, (Днепропетровск: 2007).