

УДК 539.16.07, 539.122.164.074.3, 539.121.6/.7.07

Е.Г. Ярошук, мл. науч. сотрудник

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Искра"

г. Луганск, ул. Звейненка, 145с, Украина, 9103

E-mail: official@iskra.lugansk.ua

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ КОДИРОВАННЫХ АПЕРТУР

Рассматривается методика восстановления изображения источников гамма-излучения, а также предлагается метод для восстановления спектра излучения с определенного направления при решении задач дистанционного обнаружения, идентификации, локализации и оценки радиоактивных источников с использованием систем визуализации гамма-излучения на базе кодированных апертур.

Ключевые слова: *ионизирующее излучение, кодированные апертуры, локализация, идентификация, метод реконструкции.*

Введение

Известно, что в наше время существует большая вероятность утечки радиоактивных веществ в результате аварии на предприятиях, АЭС, или проведении террористических актов. Поэтому для ликвидации последствий загрязнения окружающей среды, либо для контроля над перемещением и эксплуатацией радиоактивных веществ существует необходимость в решении задач своевременного дистанционного обнаружения, идентификации, локализации и качественной оценки очагов радиоактивного заражения, либо просто источников гамма-излучения. Для решения этих задач на современном этапе развития науки и техники больше всего подходят системы визуализации гамма-излучения, построенные на базе кодированных апертур.

Системы визуализации гамма-излучения с кодированной апертурой (СКА) представляют собой приборы, реализующие мультиплексную логику измерений [1], и обладают значительными преимуществами перед сканирующими системами. Чувствительность системы с кодированной апертурой существенно выше из-за значительной доли ($\sim 0,5$) открытой поверхности детектора. Особенно ярко преимущество системы с кодированной апертурой проявляется во времени измерений при необходимости получения изображения большого количества пространственных элементов. Такая система обеспечивает мультиплексный выигрыш за счет того, что в процессе измерений одновременно наблюдаются все пространственные элементы поля зрения [2 – 4].

Для решений задач дистанционного обнаружения, идентификации и локализации радиоактивных источников при помощи СКА при обработке спектральных данных необходимо применять методики восстановления распределения изображения источников, а также методики восстановления спектров с выбранного направления.

Цель работы: анализ методики восстановления распределения изображения источников и разработка методики восстановления спектров с выбранного направления, а также применение данных методов на практике для обработки спектральных данных получаемых от приборов на базе СКА для решения задач поиска и идентификации источников ионизирующего излучения (ИИИ).

Восстановление распределения источников

В системах визуализации гамма-излучения с помощью кодирующих апертур маска, состоящая из массива непрозрачных и прозрачных элементов, устанавливается между областью источников и позиционно-чувствительной детектирующей плоскостью (позиционно-чувствительный детектор – ПЧД) так, что любой источник в поле зрения, проецирует тень маски на детектирующую плоскость. Апертура разрабатывается таким образом, что тень маски, проецируемая источником в любой позиции в поле зрения, уникальна и, следовательно, записанная тень может быть использована для восстановления положения источника. В СКА для восстановления пространственных распределений источников гамма-излучения чаще всего используется метод корреляции или его модификации [4]. Преимущества этого метода восстановления перед другими (максимального правдоподобия, минимума энтропии и т.п.) заключаются в простоте математических действий и, как следствие, в высоком быстродействии, что особенно важно при получении многоэлементных изображений поля зрения в режиме реального времени. Изображения в системах с кодированной апертурой строятся следующим образом. Вся информация для восстановления интенсивности γ -поля содержится в матрице счетности P , элементы которой представляют собой числа событий, зарегистрированных соответствующими элементами ПЧД за время наблюдения в выбранном для измерений энергетическом диапазоне. При этом следует отметить, что каждый элемент матрицы счетности представляет собой корреляцию функции O

распределения источников γ -излучения в поле зрения с функцией маски M и счета событий фона, не зависящего от источников:

$$P = O \otimes M + B.$$

Здесь B – матрица счета событий фона, $\otimes$ – символ корреляции.

Процесс получения изображения методом корреляции для случая двумерной апертуры математически можно представить в виде:

$$O_{i,j}^* = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} P_{k,l} \cdot G_{i+k,j+l}. \quad (1)$$

Здесь $O_{i,j}^*$ – элемент матрицы восстановленного пространственного распределения источников гамма-излучения, $P_{k,l}$ – элемент матрицы счетов событий, зарегистрированных ПЧД, $G_{i+k,j+l}$ – элемент матрицы обработки.

Матрица G определяется соответствующим образом, исходя из выбранной кодирующей последовательности и размера маски. Причем для точного восстановления распределения источников функция пропускания апертуры и обрабатывающая функция должны быть выбраны таким образом, чтобы удовлетворить требованию:

$$a * G = \delta.$$

где a – функция, описывающая свойства пропускания апертуры, представляет собой матрицу состоящую из “0” и “1”, где “0” соответствует не пропускающему элементу маски, а “1” – пропускающему. Конфигурация a полностью определяется кодирующей последовательностью апертуры. При этом функция G определяется следующим образом:

$$G_{i,j} = \begin{cases} 1, & a_{i,j} = 1 \\ -1, & a_{i,j} = 0 \end{cases},$$

где n, m – размерности базового фрагмента кодирующей маски. Заметим, что количество элементов разрешения ПЧД равно количеству элементов ($n \times m$) в базовом фрагменте кодирующей маски.

В случае наличия в поле зрения нескольких источников матрица P представляет собой суперпозицию теней маски, создаваемых потоками γ -квантов от различных источников. Однако эта ситуация не представляет принципиальной трудности при восстановлении образа, так как методика восстановления исходного изображения при помощи дискретной корреляции обеспечивает выделение всех источников.

Алгоритм восстановления спектра пикселя

В процессе наблюдения области интереса позиционно-чувствительный детектор СКА регистрирует потоки гамма квантов, приходящих со всех направлений в поле зрения прибора. В результате наблюдения система регистрирует некоторый массив счетов гамма квантов, распределенных по энергетическим каналам – спектр гамма-излучения из поля зрения вместе с фоном.

Идентификация гамма-излучающих радионуклидов производится по их гамма-спектрам, зарегистрированным в процессе наблюдения. В поле зрения СКА могут оказаться несколько источников различного нуклидного состава или источники сложного нуклидного состава. В этом случае суммарный спектр, зарегистрированный ПЧД в процессе наблюдений, будет представлять собой суперпозицию спектров всех радионуклидов. Идентификация излучающих нуклидов в такой ситуации будет затруднена.

В практике визуализации гамма-излучения с помощью СКА матрица счетностей P составляется в некотором спектральном окне (диапазоне энергий γ -квантов – диапазоне спектрометрических каналов). Обычно выбор спектрального окна определяется спектральным окном регистрации радионуклида, распределение которого в пространстве необходимо получить. Предельным случаем ширины спектрального окна может быть ширина единственного спектрометрического канала.

Таким образом, свойства кодированной апертуры дают возможность получить спектр отдельно каждого пикселя или произвольного набора пикселей изображения пространственного распределения источников. Метод, предлагаемый нами для выделения спектра отдельного пикселя или их набора, состоит в обработке накопленных данных методом корреляции при постоянном значении индексов пикселя изображения для всех энергетических каналов спектра. Восстановление спектра производится по формуле:

$$S_{i,j}^{(z)} = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} P_{k,l}^{(z)} \cdot G_{i+k,j+l}, \quad (2)$$

где i, j – индексы выбранного пикселя; $S^{(z)}$ – количество зарегистрированных событий в z -ом спектральном канале от пикселя с индексами i, j ; z – индекс спектрального канала, пробегающий

значения по всему спектральному окну регистрации; n, m – размеры основной последовательности кодирующего массива; G – обрабатываемый массив, применяемый при получении изображения; $P^{(z)}$ – матрица, описывающая тенеграмму в z -ом спектральном канале.

Аналогично производится выделение спектра выбранного пикселя и в случае применения одномерной маски. Для выделения спектра произвольной комбинации пикселей вначале выделяются спектры отдельно каждого пикселя из набора, а затем производится суммирование спектров.

Восстановление спектра выбранного пикселя или группы пикселей имеет смысл проводить при необходимости радиометрической оценки зафиксированных источников радиоактивного излучения, то есть идентификации гамма-излучающих нуклидов, определения их активности, составления двумерных карт активности, расчета и составления карт дозных полей. Алгоритм восстановления спектра пикселя (спектра с направления) аналогичен алгоритму восстановления изображения распределения источников.

В общем виде это выглядит таким образом:

на первом этапе составляется матрица счетности $P^{(z)}$, которая представляет собой матрицу значений счетов гамма квантов в z -ом спектрометрическом канале по всем спектрам, получаемых от элементов ПЧД;

производится корреляция матрицы счетности с обрабатываемым массивом G в соответствии с (1) при фиксированных значениях индекса пикселя (направления) i, j ;

полученное значение записывается в матрицу спектра пикселя S , как счет гамма квантов в z -ом спектрометрическом канале.

Вычисления проводятся для всех спектрометрических каналов. В результате полученная матрица S будет представлять собой восстановленный спектр гамма-излучения из пикселя с индексами (i, j) .

Экспериментальная проверка алгоритма

Для проверки работоспособности описанных выше алгоритмов восстановления распределения источников гамма-излучения и восстановления спектра с направления, были проведены эксперименты по накоплению и обработке спектрометрической информации с помощью гамма-сканера кругового обзора, построенного на базе кодированной апертуры и реализующего принцип пространственно-временного кодирования потока гамма-излучения. В экспериментах использовался гамма-сканер кругового обзора, разработанный в лаборатории НИПКИ “Искра” [6,7]. Прибор выполнен по схеме гамма-телескопа с единичным непрерывным цилиндрическим детектором CsI(Tl) Ш 50×100 мм и цилиндрической кодирующей маской, состоящей из последовательности прозрачных и непрозрачных для гамма-излучения элементов. Длина кодирующей последовательности 31 элемент. Прибор предназначен для обнаружения и определения направления на источник γ -излучения в диапазоне азимутальных углов от 0 до 360°; регистрации спектров γ -излучения и плотности потока γ -квантов с любого выбранного направления и оценки активности обнаруженных и идентифицированных источников [5,6].

В качестве источника гамма-излучения использовался изотоп ^{137}Cs активностью $3.5 \cdot 10^5$ Бк. Источник располагался на расстоянии 2,5 м от прибора, время экспозиции для получения статистически хорошо обеспеченных данных устанавливалось на 10800 с. На рисунке 1 изображен суммарный спектр, зарегистрированный детектором за время экспозиции. В спектре наблюдаются как пик полного поглощения ^{137}Cs , так и пики полного поглощения естественного фона (^{40}K , ^{232}Th и продуктов его ряда). Причем форма пика ^{137}Cs искажена интерференцией с компонентами естественного фона.

Затем для обработки спектральных данных был применен алгоритм восстановления распределения источников в соответствии с (1), модифицированный для одномерной цилиндрической маски [7] и имеющий вид:

$$O_j^* = \sum_{i=0}^{k \cdot m - 1} P_i \cdot G_{(i+j) \bmod k \cdot m},$$

где m – размерность кодирующей маски, в данном случае $m=31$; k – заданный коэффициент дискретности угловых положений.

Для повышения точности определения направления на источник гамма-излучения была реализована кодирующая маска, которая вращается постоянно, а не дискретно, что позволило разбить каждый из m элементов кодирующей последовательности еще на k положений. В итоге вместо кодирующей последовательности из m элементов получаем последовательность в $k \times m$ элементов, что позволяет уточнить положение обнаруженного источника внутри элемента разрешения и улучшить визуальную картину распределения источников [7]. В этом опыте использовалось значение $k=7, j=0, 1, \dots, k \cdot m - 1$.

Для восстановления распределения было выбрано спектральное окно с 200 по 250 канал. В этом диапазоне и находится линия 662 кэВ, соответствующая пику полного поглощения ^{137}Cs .

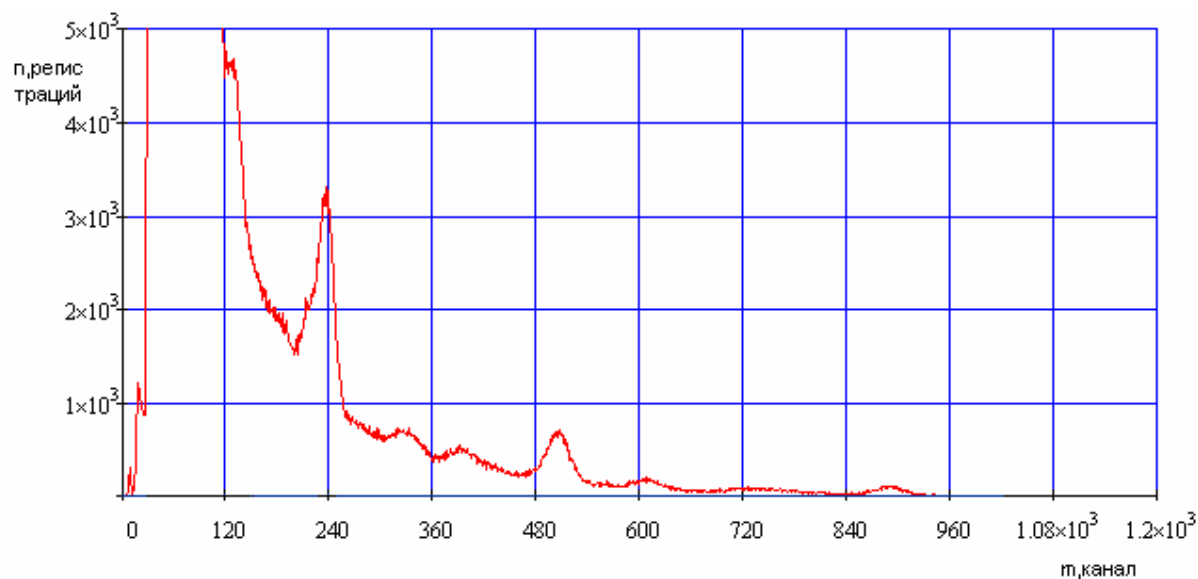


Рисунок 1 – Суммарный спектр

Далее для этого диапазона была составлена матрица счетности P_j , каждый элемент которой представляет собой сумму значений счетности гамма квантов в спектральном окне при j -ом положении маски. Затем была проведена корреляция с обрабатываемым массивом G_j и получена матрица восстановленного распределения источников O^*_j , каждый элемент которой представляет собой количество γ -квантов, пришедших к детектору с j -го направления за время наблюдения (рисунок 2, рисунок 3).

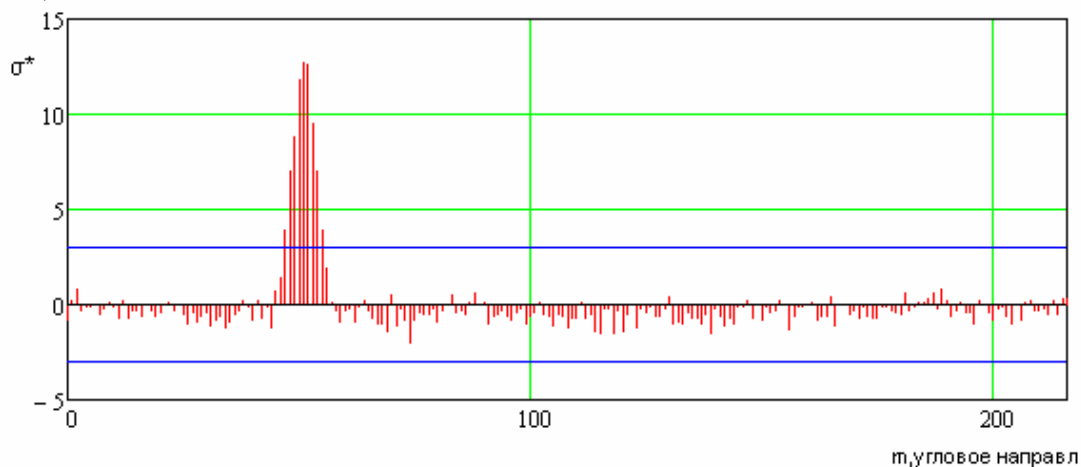


Рисунок 2 – Восстановленное распределение источников

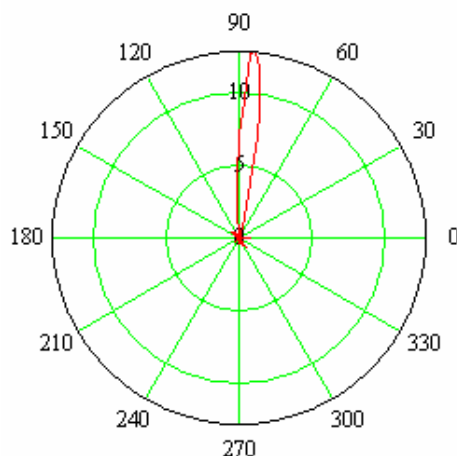


Рисунок 3 – Угловое направление на источник

В практике визуализации гамма-излучения с помощью СКА оценка статистической значимости элемента изображения производится по соотношению:

$$O_i^* / \sigma^* \geq k.$$

Здесь k – уровень статистической значимости элемента, σ^* – выборочная оценка дисперсии одного элемента изображения. Полагая, что статистика счетов событий регистрации гамма квантов подчиняется распределению Пуассона, можно показать, что выборочная оценка дисперсии одного элемента изображения равна:

$$\sigma_i^{*2} = \sigma^{*2} = \sum_{i=0}^{n-1} P_i.$$

На рисунке 2 и рисунке 3 восстановленные изображения показаны в значениях σ^* , определяющих статистическую значимость элементов изображения.

Для восстановления спектра с направления был выбран диапазон угловых положений с 45 по 57. В этом диапазоне статистическая значимость источника превышает значение 3σ , т.е. с вероятностью более 0,99 можно предполагать наличие источника излучения. Восстановление спектра производилось в соответствии с формулой (2), модифицированной для одномерной маски и имеющей вид:

$$S_j^{(z)} = \sum_{i=0}^{k \cdot m - 1} P_i^{(z)} \cdot G_{(i+j) \bmod k \cdot m}.$$

В результате был получен восстановленный спектр с диапазона направлений, показанный на рисунке 4. В спектре отчетливо наблюдается пик полного поглощения излучения ^{137}Cs . Следует также отметить, что в восстановленном спектре с направления отсутствуют как пики полного поглощения естественного фона, так и непрерывное распределение. Этот эффект объясняется свойством метода корреляции, который обеспечивает сведение фоновых (не кодированных) событий к среднему нулю.

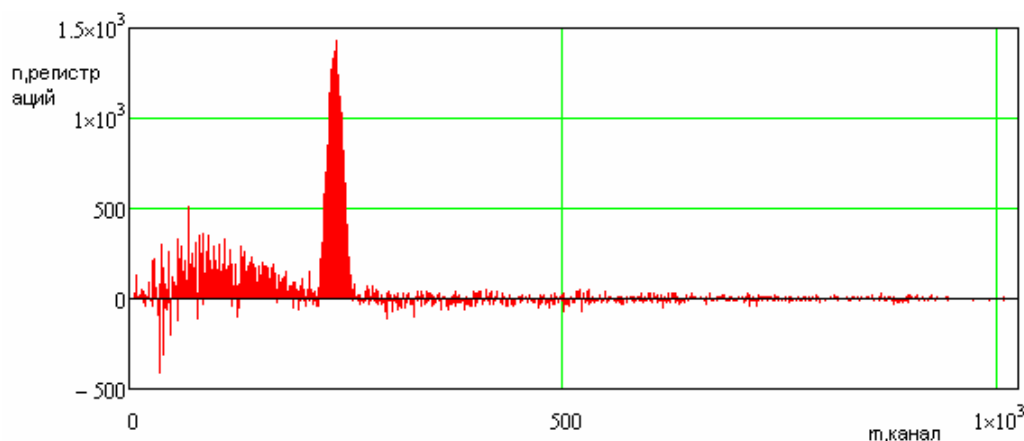


Рисунок 4 – Восстановленный спектр с направления

В полученном восстановленном спектре пик полного поглощения легко локализуется и может быть обработан стандартными спектрометрическими методами с целью идентификации гамма-излучающего нуклида и вычисления его радиометрических характеристик. Однако, при проведении таких расчетов необходимо принять во внимание статистические особенности восстановленного спектра. Очевидно, что статистика счетов в спектрометрических каналах отличается от традиционной Пуассоновской. По-видимому, это связано с применением метода корреляции для восстановления спектра.

Заключение

В данной работе были предложены методы обработки спектрометрических данных, полученных с помощью СКА, для восстановления распределения источников, находящихся в поле зрения прибора, а также для восстановления спектрального состава излучения интересующей нас области поля зрения. По результатам экспериментальной части можно сделать вывод о работоспособности рассмотренных выше методик, а также о целесообразности применения данных алгоритмов для обработки спектральных данных, полученных СКА с целью определения местоположения источников, оценки их радиометрических характеристик, то есть идентификации гамма-излучающих нуклидов, определения их активности. Данные методы позволяют определять направление на источники, точнее выделять пики полного поглощения нуклидов источников в спектре, что соответственно позволяет точнее вычислять их

спектральные характеристики. Это возможно благодаря восстановлению и использованию статистически более надежных спектральных данных, где в силу особенностей алгоритмов отсутствуют искажения, вносимые компонентами естественного фона, или же в случае фиксирования нескольких источников в поле зрения, уменьшается их взаимное влияние, что выражается в уменьшении доли искажения в статистике распределения счетностей гамма-квантов по энергетическим каналам.

В дальнейших исследованиях будет проводиться работа по применению выше изложенных алгоритмов на практике для обработки спектральных сигналов регистрируемых приборами на базе СКА от ИИИ, в частности, исследование статистики регистрируемого спектра и информации на различных этапах обработки с целью возможной выработки критериев оценки данных, позволяющих обнаружить и идентифицировать ИИИ с определенной вероятностью.

Бібліографічний список

1. Сороко Л.М. Мультиплексные системы измерений в физике / Л.М. Сороко. — М.: Атомиздат, 1980. — 120 с.
2. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннелл. — М.: Мир, 1989. — 336 с.
3. Fenimore E.E. Coded Aperture Imaging with Uniformly Redundant Array / E.E. Fenimore, T.M. Cannon // *Applied Optics*. — 1978. — V. 17. — No. 3, February. — P. 37–347.
4. Dunphy P.P. Balloon-borne Coded Aperture Telescope for Low-Energy Gamma-Ray Astronomy / P.P. Dunphy, M.L. McConnell, A. Owens [and ect.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. — 1989. — V. A274. — P. 362–379.
5. Беликов А.С. Системы гамма-видения для радиационного мониторинга и дистанционной локализации радиоактивных загрязнений / А.С. Беликов, В.А. Бигвава, А.В. Кочергин. // *Будівництво, матеріалознавство, машинобудівництво: наук.-техн. зб.* — К., 2007. — Вип. 42. — С. 117–121.
6. Плахотник В.Ю. "ГОНИОМЕТР" – гамма-сканер кругового обзора с кодирующей маской / В.Ю. Плахотник, А. В. Кочергин // *Приладобудування: стан і перспективи: зб. тез доповідей VII міжнар. наук.-техн. конф.*; Київ, 22-23 квітня 2008 р. — Київ, 2008. — С. 166–167.
7. Плахотник В.Ю. Угловое разрешение гамма-сканера кругового обзора с кодирующей маской. / В.Ю. Плахотник, Е.Г. Ярошук // *Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського: зб. наук. пр.* — К., 2008. — Вип. 5/2008 (52). Частина 2. — С. 32–34.

Поступила в редакцию 27.04.2009 г.