

ГАММА-СКАНЕР КРУГОВОГО ОБЗОРА. УГЛОВАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ

В работе представлены исследования изображающих свойств гамма сканера кругового обзора с кодирующей маской, реализующего мультиплексную логику измерений путем пространственно-временного кодирования потоков гамма-излучения. Даны результаты экспериментальной проверки алгоритмов локализации источников гамма излучения. Показано, что применение дополнительной дискретизации данных может существенно улучшить точность локализации источника.

Ключевые слова: гамма сканер, кодирующая апертура, радионуклид, двумерная локализация.

У роботі представлено дослідження властивостей, що зображають, гамма сканера кругового огляду з кодуючою маскою, що реалізовує мультиплексну логіку вимірювань шляхом просторово-часового кодування потоків гамма-випромінювання. Дані результати експериментальної перевірки алгоритмів локалізації джерел гамма випромінювання. Показано, що застосування додаткової дискретизації даних може істотно поліпшити точність локалізації джерела.

Ключові слова: гамма сканер, кодуюча апертура, радіонуклід, двовимірна локалізація.

The work discusses the research on features of a circular gamma-ray scanner with a coded mask, which uses the multiplex logic of measurements by spatiotemporal coding of gamma fluxes. The results of experimental tests of algorithms of localization of gamma sources are given. The article shows that application of additional data discretization can substantially enhance the accuracy of source localization.

Key words: gamma-ray scanner, coded aperture, radionuclide, two-dimensional localization

Введение. Существует определенный круг задач, в которых необходим оперативный дистанционный поиск и локализация источников гамма-излучения на местности в режиме реального времени. К ним, в частности, относятся задачи экологического мониторинга ядерно-технических объектов и сооружений, обследование зон радиоактивного загрязнения, оценка аварий и планирование выведения ядерных установок из эксплуатации и. т. п.

Известно применение для решения таких задач приборов на основе сканирующих коллиматоров, пинхольных камер, систем получения изображений на основе кодирующих апертур [1].

В данной работе представлены исследования изображающих свойств разработанного и изготовленного в НИПКИ «Искра» гамма сканера кругового обзора с кодирующей маской, предназначенного для дистанционного детектирования, локализации, идентификации и оценки активности радиоактивных материалов в полевых условиях [2].

Постановка задачи. Гамма сканер является поисковым радиометрическим прибором, реализующим мультиплексную логику измерений путем пространственно-временного кодирования потоков

гамма-излучения. Конструктивно он содержит цилиндрический сцинтилляционный детектор гамма-излучения и непрерывно вращающуюся вокруг него цилиндрическую кодирующую маску, представляющую собой построенную по особому закону последовательность прозрачных и непрозрачных для гамма излучения элементов. Система сбора информации построена таким образом, что зарегистрированные детектором события однозначно привязываются к текущему положению маски. Результатом работы прибора является круговая диаграмма плотности потока гамма-излучения в точке измерения от источников излучения в диапазоне углов $0 \dots 360^\circ$.

Объектом исследования данной работы являются алгоритмы угловой локализации точечных и распределенных источников гамма излучения.

Теоретическая часть.

В системах с кодирующей апертурой для восстановления пространственных распределений источников гамма-излучения чаще всего используется метод корреляции или его модификации [3].

В данном случае угловое распределение плотности потока гамма-излучения восстанавливается методом

циклической корреляции матрицы счетов P и специального восстанавливающего массива G (1).

$$R_j = \sum_{j=0}^{k \cdot m - 1} \sum_{i=0}^{m-1} P_{(i+k \cdot m - j) \bmod (k \cdot m)} \cdot G_i \quad (1)$$

Где R_j элемент вектора угловой плотности потока с j -го направления, m – размер маски; k коэффициент дискретизации P_j элемент вектора счетов событий, зарегистрированных детектором при положении нулевого элемента маски в диапазоне углов $2\pi(k \cdot m) \cdot j \div 2\pi(k \cdot m) \cdot (j+1)$ G - матрица обработки, однозначно определяемая кодирующей последовательностью.

Минимальный размер векторов R и P совпадает с размерностью маски m , которая также однозначно определяет угловое разрешение системы $\alpha = 2 \cdot \pi / m$. В то же время принцип непрерывности вращения маски позволяет увеличить степень дискретизации углового распределения плотности потока гамма-излучения за счет регистрации спектрометрических данных в её промежуточных положениях.

На рис. 1 представлены идеализированные вектора счетов и функции рассеяния точки (ФРТ) гама сканера, рассчитанные для степеней дискретизации $k=1$ (верхний рисунок) и 7.

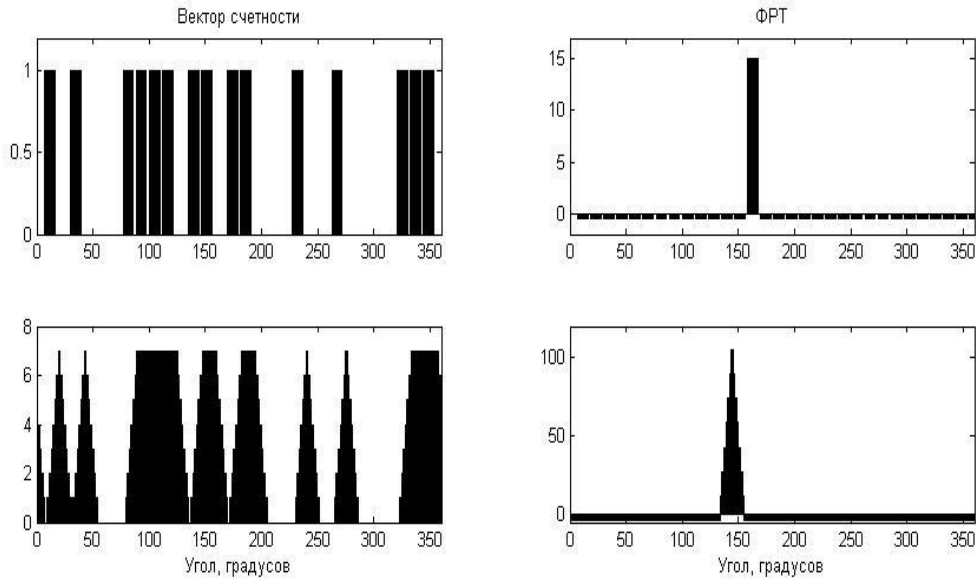


Рис. 1 Вектор счетов и ФРТ системы для разных степеней дискретизации

Очевидно, что если для источника, расположенного по центру j -ой дискреты, ФРТ представляет собой идеальную δ функцию, то при увеличении k она размывается в диапазоне $j \pm k$. Отображающие свойства системы таковы, что любая комбинация источников может рассматриваться как суперпозиция точечных. В то же время, если для степени дискретизации $k = 1$ ФРТ любого точечного источника, расположенного не по центру угловой дискреты, аналогична суперпозиции двух источников, расположенных в соседних дискретах,

то увеличение степени дискретизации позволяет более точно локализовать источник (Рис 2).

В рамках данной работы исследовались следующие вопросы:

- вычисление угловой координаты точечного источника;
- критерий идентификации типа источника как точечного.

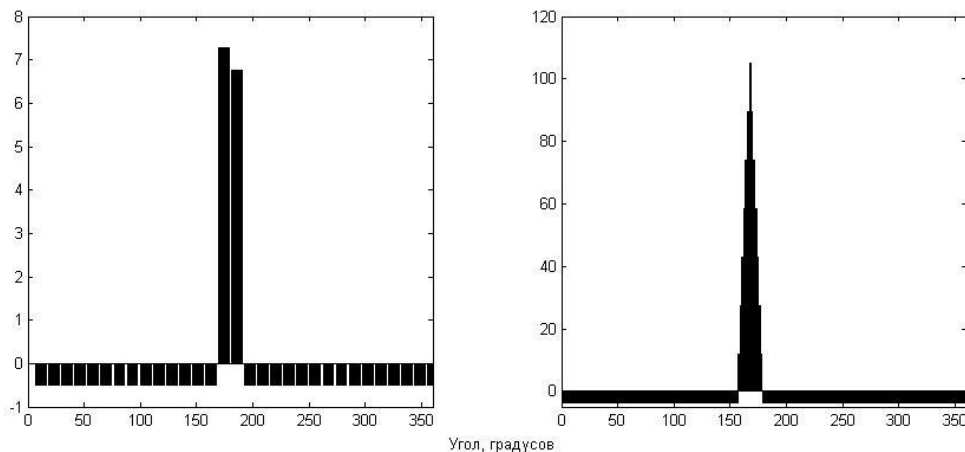
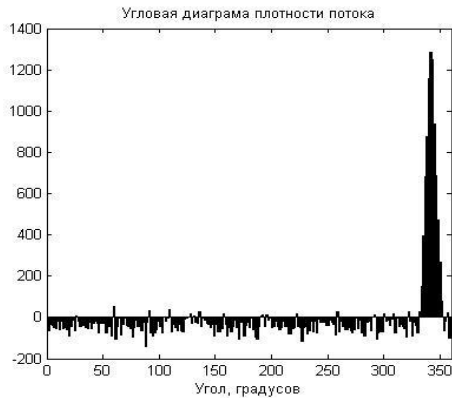


Рис. 2 ФРТ источника сдвинутого на 3/7 от центра угловой дискреты для разных степеней дискретизации

Экспериментальные результаты. Экспериментальные исследования проводились на макете гамма сканера, реализованного на базе сцинтилляционного детектора CsI(Tl) Ø50×100 мм. и цилиндрической свинцовой маски, построенной на базе квадратично – вычетной последовательности из 31 элемента.

Для исследований угловой локализации источника в поле зрения была проведена серия из 11 опытов, в которых точечный источник ¹³⁷Cs последовательно перемещался по дуге с шагом 0.4°. На рис.3 показана типовая угловая диаграмма плотности потока *P* для степени дискретизации *k*=7 (217 элементов поля



зрения с шагом 1.69°), а также реальные и расчетные угловые координаты источника.

Расчетная координата *a* определялась по формуле (2).

$$\varphi = \frac{\sum_{j_{\max-k}}^{j_{\max+k}} P_j \cdot j}{\sum_{j_{\max-k}}^{j_{\max+k}} P_j} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{k \cdot m} \quad (2)$$

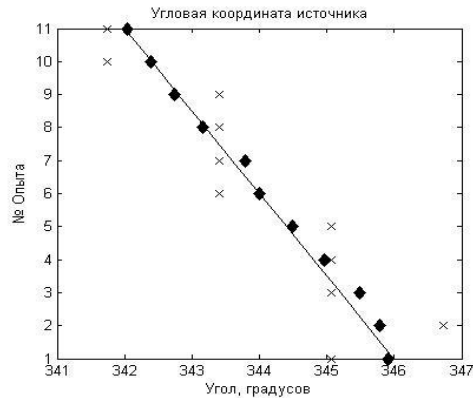


Рис. 3 Угловая локализация точечного источника ¹³⁷Cs

× - максимум распределения диаграммы плотности потока;

◆ – расчетная координата.

Расчетные данные хорошо согласуются с реальными, максимальная ошибка составила 0.29°, или ≈20 % шага угловой диаграммы *P*, а с.к.о. – 0.05°.

Критерий разделения точечных и протяженных источников

Рассмотрим участок диаграммы направленности [*C_{min}*; *C_{max}*], соответствующий направлению на источник, т.е. такой, что *R_i* ≥ 0, *i* ∈ [*C_{min}*; *C_{max}*]. Назовем параметром *V* лепестка корень второго центрального момента, вычисляемый как:

$$V = \sqrt{\frac{\sum_{i=C_{\min}}^{C_{\max}} (R_i - M)^2}{C_{\max} - C_{\min}}} \quad (3)$$

где *M* – центроида участка:

$$M = \frac{\sum_{i=C_{\min}}^{C_{\max}} R_i}{C_{\max} - C_{\min} + 1} \quad (4)$$

Тогда статистический критерий точечного источника имеет вид:

$$m \in [\bar{V}_0 - n_p \cdot \sigma(V_0); \bar{V}_0 + n_p \cdot \sigma(V_0)] \quad (5)$$

где \bar{V}_0 – выборочное среднее значений вторых центральных моментов лепестков точечных источников для некоторой обучающей выборки *V₀*, $\sigma(V_0)$ – несмещенная оценка с.к.о. этих значений, *n_p* – квантиль нормального распределения для вероятности *p*. Очевидно, для использования критерия (5) необходимо проверять гипотезу о нормальности распределения *V₀*.

Для экспериментальной проверки критерия была выполнена серия из 140 экспериментов, в которых гамма-сканером регистрировалось положение точечных и протяженных (для имитации которых использо-

вались несколько близкорасположенных точечных) источников ¹³³Ba близких активностей. Для достижения максимальной вариабельности формы лепестка, точечные источники располагались вблизи рассеивающих объектов, использовались различные коллиматоры и т. п. Гипотеза нормальности распределения *V₀* проверялась по критерию χ^2 для уровня значимости 0.05. На рис.4 показаны границы доверительных интервалов, построенных по (5) для *n_p* = 3 и отмечены эксперименты с протяженными источниками. Как видно из рис.4, работа в энергетических окнах позволяет в значительной мере уменьшить влияние рассеянного на преградах излучения и расширение за счет этого лепестков направлений. При работе в каналах по критерию (5) возможно различать протяженные источники, истинный угол видимости которых из точки измерения св. 6 угловых элементов при *k* = 7, т.е. св. 10.1°. При работе в полном окне этот показатель ухудшается до 9-10 угловых элементов при *k* = 7 (т.е. св. 17°).

Выводы. Проведенные исследования показали принципиальную работоспособность принципа пространственно – временного кодирования потоков гамма излучения, реализованного в гамма сканере кругового обзора с кодирующей маской, для поиска и локализации источников гамма излучения. Очевидно, что принцип непрерывного вращения маски позволяет получить дополнительную дискретизацию поля зрения, существенно превышающую размерность маски. Хотя при этом не улучшается угловое разрешение системы, однозначно определяемое размерностью маски ($\alpha=2 \cdot \pi/m$), данная методика дает возможность более точно вычислять истинную угловую координату источника и разделять точечные и протяженные источники. Теоретически степень дискретизации не ограничена, но очевидно, что оптимальная степень дискретизации зависит от ожидаемой статистической обеспеченности спектров гамма излучения в *j*-ом положении маски.

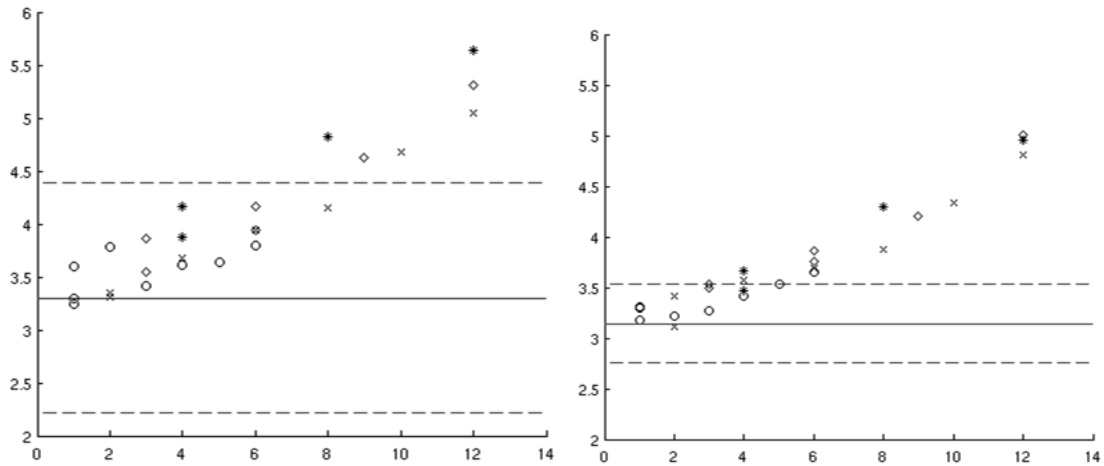


Рис. 4 Зависимость параметра V лепестка от реальной протяженности источника (по оси абсцисс, в угловых дискретах) и 99 % доверительный интервал по критерию (5) (слева – для полного спектра, справа – в окне 120..155 каналов) для протяженных источников, расстояние между компонентами которых:
 о – 1 угловая дискрета (у.д.), × – 3 у.д., \diamond – 4 у.д., * – 5 у.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатов О. П. Портативный прибор для получения изображений источников гамма-излучения с апертурой на основе кодирующих масок. / О. П. Игнатов, В. Е. Степанов, А. Н. Сударкин, Л. И. Уруцкоев // Приборы и техника эксперимента, 1998, №4, с.127 – 133.
2. Плахотник В. Ю. «Гониометр» – гамма-сканер кругового обзора с кодирующей маской / Плахотник В. Ю., Кочергин А. В. // Вісник ВНУ ім. В.Даля, № 9(127), ч.1/2008, с.162-166.
3. Fenimore E. E. Coded Aperture Imaging with Uniformly Redundant Array. /Fenimore E.E., Cannon T.M. //Applied Optics, 1978, v.17, No.3, February, pp.337-347.

Рецензенти: к.т.н. Малахов О. В.;
 к.т.н. Шаповалов В. Д.

© Войлов П. Ю., 2011
 © Кочергін А. В., 2011

Стаття надійшла до редколегії 20.09.10 р.