

PACS numbers: 29.40.Mc, 29.30.Kv

КОМПЛЕКС ДИСТАНЦИОННОГО ПОИСКА, ЛОКАЛИЗАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Кочергин

Научно – исследовательский и проектно-конструкторский
институт «Искра»
ул. Звейнека, 145, 91033 Луганск, Украина
E-mail: official@iskra.lugansk.ua

В работе описан принцип действия и представлены результаты исследований технических характеристик комплекса дистанционного поиска и локализации источников гамма излучения на базе гамма-сканера кругового обзора, реализованного на принципе пространственно-временного кодирования потока.

***Ключевые слова:* ИСТОЧНИКИ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ, ДИСТАНЦИОННАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ, КОДИРОВАННАЯ АПЕРТУРА.**

(Получено 29.06.2011, опубликовано online 30.12.2011)

1. ВВЕДЕНИЕ

Существует определенный круг задач, в которых необходим оперативный дистанционный поиск и локализация источников гамма излучения в режиме реального времени. Приборы и системы для получения пространственного распределения источников гамма излучения условно можно разделить на несколько классов. Это, в частности, сканирующие системы с временной модуляцией потока излучения. Обычно они представляют собой детектор, заключенный в коллиматор, и отличаются простотой выполнения. Их ограничение состоит в том, что только малая площадь области интереса может наблюдаться в каждый конкретный промежуток времени. Это означает, что время, необходимое для сканирования области интереса может быть очень длительным, особенно при необходимости высокого пространственного разрешения. Другой класс – это системы пространственной модуляции потока, к которым относят в частности системы с кодированными апертурами. Они обеспечивают более высокую чувствительность за счет мультиплексной логики измерений, при которой в процессе измерения наблюдается не отдельный элемент поля зрения, а одновременно все элементы. В общем случае прибор с кодированной апертурой содержит кодирующую маску и позиционно-чувствительный детектор дискретного или непрерывного типа. Реализация позиционно-чувствительного детектора всегда представляет значительные технические трудности. Эти трудности особенно растут при необходимости увеличения дискретности поля зрения. В том числе и по этой причине стоимость и массогабаритные характеристики таких систем весьма существенны.

В данной работе представлена разработанная в НИПКИ «Искра» система, предназначенная для дистанционного поиска, угловой и двумерной локализации, идентификации и оценки активности источников гамма излучения с последующей привязкой их к местности и картографированием, в какой то мере объединяющая оба эти подхода [1].

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Основой системы является гамма-сканер кругового обзора с кодирующей маской – прибор на базе единичного детектора, конструктивные особенности и принцип действия которого позволяют отказаться от позиционно чувствительного детектора, но сохранить при этом мультиплексную логику измерения (Рис. 1).

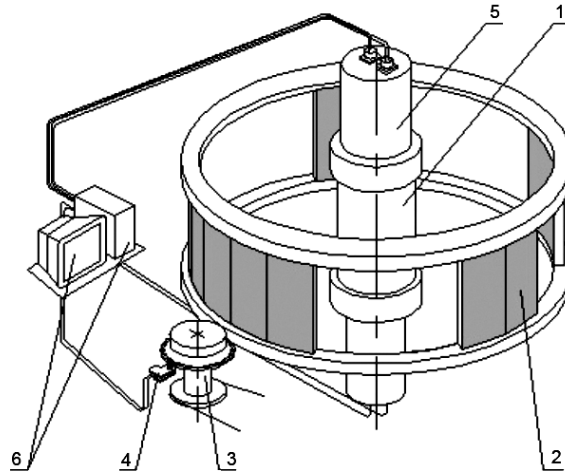


Рис. 1 – Схема гамма - сканера кругового обзора

Конструктивно он содержит цилиндрический сцинтилляционный детектор гамма излучения 1 и непрерывно вращающуюся вокруг него цилиндрическую кодирующую маску 2, представляющую собой построенную по особому закону последовательность прозрачных и непрозрачных для гамма излучения элементов. Элементы маски расположены вертикально вдоль образующей цилиндра, коаксиальной с детектором. Кроме того в состав входит привод вращения маски 3, датчик углового положения кодирующей маски 4, аппаратура для позиционирования на местности и система сбора и обработки данных.

Система сбора данных построена таким образом, что зарегистрированные детектором события однозначно привязываются к текущему положению маски. В течение процесса измерений регистрируются не только факты событий взаимодействия гамма квантов с детектором, но и выделенная энергия. Таким образом, в результате измерений регистрируется массив спектров S_i , каждый из элементов которого представляет собой спектр гамма излучения, зарегистрированного детектором со всех направлений в i -м угловом положении маски. Результатом работы является круговая диаграмма плотности потока гамма излучения в точке измерения от источников излучения в диапазоне углов $0...360^\circ$, полученная методом циклической корреляции матрицы счетов P и специального восстанавливающего массива G (1)

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

где R_j – элемент вектора угловой плотности потока с j -го направления, m – размер маски; k – коэффициент дополнительной дискретизации поля зрения, P_j – элемент вектора счетов событий, зарегистрированных детектором в выбранных энергетических окнах 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.

Кодирующая маска построена на основе базового фрагмента равномерно-избыточной последовательности и представляет собой линейную одномерную маску, свернутую в кольцо [2], сочетая свойства высокой трансмиссии с преимуществом плоских боковых лепестков. Высокая трансмиссия обеспечивает способность изображать источники с низкой интенсивностью, а плоские боковые лепестки означают, что не будет внутреннего шума, скрывающего низко контрастные источники.

Изображающие свойства системы визуализации можно описать с помощью функции рассеяния точки (ФРТ), отражающей рассчитанный по формуле (1) отклик системы на точечный источник, находящийся в поле зрения. Минимальный размер векторов R и P совпадает с размерностью маски 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.

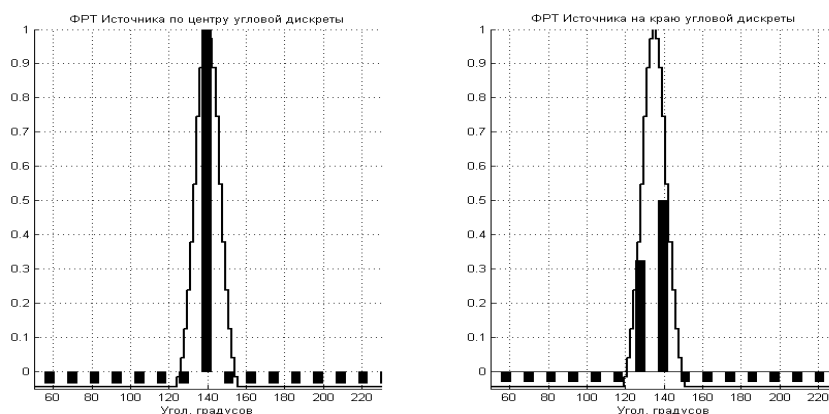


Рис. 2 – ФРТ гамма-сканера кругового обзора

На Рис. 2 представлены ФРТ гамма-сканера, рассчитанные для степеней дискретизации $k = 1$ и 7 для источника расположенного по центру угловой дискреты (слева) и смещенного k от центра (справа).

Очевидно, что для источника, расположенного по центру j -ой дискреты и $k = 1$ ФРТ представляет собой идеальную δ функцию. При смещении источника от центра ФРТ распределяется между соседними дискретами пропорционально смещению. При увеличении k ФРТ размывается в диапазоне $j \pm k$, что позволяет более точно локализовать источник. Отображающие свойства системы таковы, что любая комбинация источников может рассматриваться как суперпозиция точечных.

3. УГЛОВОЕ РАЗРЕШЕНИЕ И УГЛОВАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

Следует разделять угловую локализацию, как задачу определения угловой координаты отдельного точечного источника в поле зрения и угловое разрешение, как задачу разделения двух и более источников, расположенных в пределах нескольких угловых дискрет. Угловое разрешение гамма-сканера однозначно определяется угловым размером элемента маски вытекающим из его геометрических параметров и длины m кодовой последовательности, применяемой для построения маски.

Экспериментальные исследования угловой локализации источника в поле зрения, проведенные на макете гамма-сканера, реализованного на базе сцинтилляционного детектора CsI(Tl) $\varnothing 50 \times 100$ мм и цилиндрической свинцовой маски из 31 элемента, показали, что для хорошо статистически обеспеченных источников максимальная ошибка угловой локализации точечного источника составила 0.29° , или $\approx 20\%$ шага угловой диаграммы R.

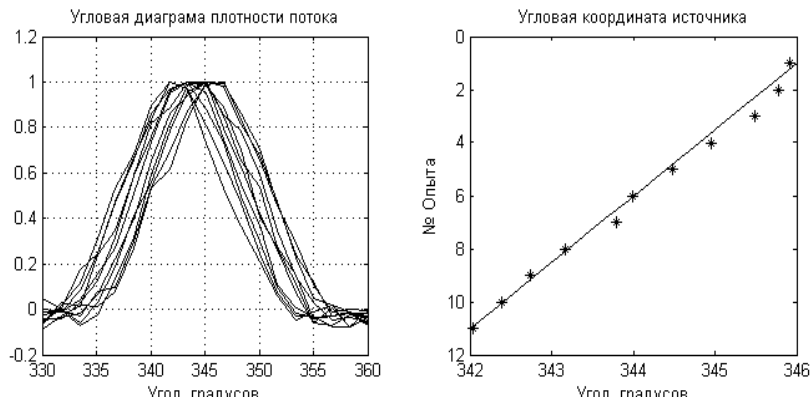


Рис. 3 – Угловая локализация точечного источника ^{137}Cs (* – расчетная координата)

На Рис. 3 показана полученные угловые диаграммы плотностей потока R для степени дискретизации $k = 7$ (217 элементов поля зрения с шагом 1.69°), а также реальные и расчетные угловые координаты источника.

Для исследования углового разрешения была проведена серия экспериментов, в которой исследовалась возможность разделения двух рядом стоящих точечных источников ^{133}Ba активностью 1 МБк. Источники последовательно располагались на расстоянии 2, 1.75, 1.5 и 1.25 и 1 угловые дискреты друг относительно друга.

Из полученных данных следует, что уже начиная с расстояния 1.5 угловых дискреты между источниками их можно считать разделенными. При этом, хотя и при изменении степени дискретизации от 1 до 7 и увеличении размерности диаграммы плотности углового распределения с 31 до 217 элементов угловое разрешение прибора, очевидно, не изменяется, все же увеличение размерности диаграммы позволяет более точно судить о характере распределения источников гамма-излучения в поле зрения.

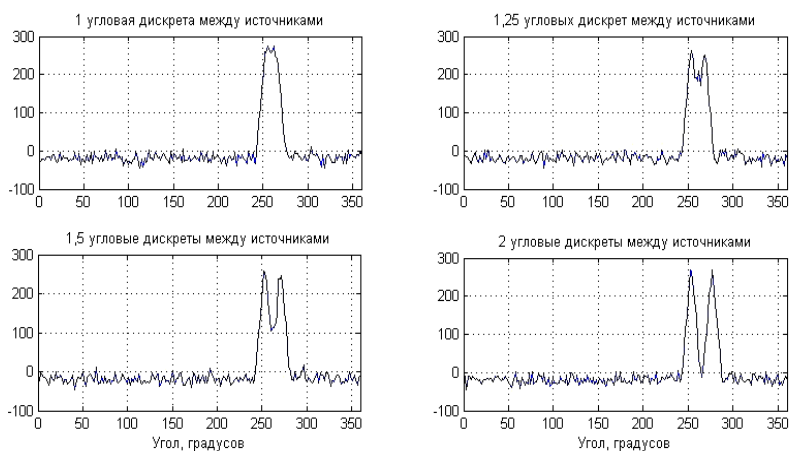


Рис. 4 – Угловое разрешение точечных источников ^{133}Ba

4. КРИТЕРИЙ РАЗДЕЛЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Из базовых свойств ФРТ системы очевидно, что точечный и распределенный источник различаются по функции отклика, поэтому логично разработать критерий, дающий возможность различать протяженные и точечные источники. Такой статистический критерий точечного источника имеет вид:

$$m \in [\bar{V}_0 - n_p \cdot \sigma(V_0); \bar{V}_0 + n_p \cdot \sigma(V_0)] \quad (2)$$

где \bar{V}_0 – выборочное среднее значений вторых центральных моментов лепестков точечных источников для некоторой выборки V_0 , $\sigma(V_0)$ – несмещенная оценка с.к.о. этих значений, n_p – квантиль нормального распределения для вероятности p .

Экспериментальная проверка критерия на серии из 140 экспериментов, в которых регистрировалось положение точечных и протяженных источников ^{133}Ba близких активностей, показала, что при работе в энергетических окнах по критерию (2) возможно различать протяженные источники, истинный угол видимости которых из точки измерения при $k = 7$ более 6 угловых элементов поля зрения, т.е. св. 10.1° .

5. ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Принято считать, что система с кодирующей апертурой в идеале позволяет обнаружить бесконечно малый источник, но за бесконечно большое время измерения. Реальная чувствительность определяется параметрами детектирующей аппаратуры и условиями измерения.

В таблице 1 представлены оценки чувствительности гамма-сканера по линии 661 кэВ для разных типов детектора при времени измерения 0.5 часа и нормальном фоне в точке измерения.

Таблица 1 – Оценка чувствительности гамма - сканера для разных типов детектора

Детектор			Расстояние до ИИИ, м	Обнаруживаемая активность ^{137}Cs за 0.5 ч., Вq	Соотношение сигнал/фон в окне регистрации
Тип	Диаметр, см	Высота, см			
CsI(Tl)	5	10	5	3.7·10 ⁵	0.058
			10	1.5·10 ⁶	
			100	3.7·10 ⁸	
CsI(Tl)	8	16	5	1.5·10 ⁵	0.03
			10	6·10 ⁵	
			100	1.5·10 ⁸	
CsI(Tl)	10	25	5	8·10 ⁴	0.019
			10	3,5·10 ⁵	
			100	8.5·10 ⁷	
NaI(Tl)	10	25	5	1,0·10 ⁵	0.025
			10	4.5·10 ⁵	
			100	1.1·10 ⁸	

6. ДВУМЕРНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ

Встроенная аппаратура и программное обеспечение позволяют произвести пространственную привязку гамма-сканера на местности. Оригинальные уравнительные и метрологические методы и алгоритмы, основанные на выделении значимых секторов по статистически обоснованным критериями и построении пересечений этих секторов, обеспечивают двумерную локализацию обнаруженных и идентифицированных источников по нескольким независимым измерениям и дистанционное оценивание их активности [3].

Идентификация гамма излучающих радионуклидов производится по их спектрам. Свойства кодированной апертуры и реализация измерений по схеме маска-антимаска дают возможность получить чистый спектр за вычетом фона и систематической погрешности от каждого отдельно пикселя или произвольного набора пикселей изображения пространственного распределения источников [4], что позволяет легко идентифицировать пространственно разделенные нуклиды и существенно облегчает процедуру идентификации сложных смесей источников.

На основе предложенных методов и алгоритмов разработаны программное обеспечение для построения карты двумерного распределения радиоактивных материалов на исследуемой территории и структура геопространственной базы данных для хранения географически привязанной информации о положении источников и конфигурации дозных полей для использования в многопользовательской системе двумерной локализации источников ионизирующего излучения.

7. ВЫВОДЫ

Проведенные имитационные и экспериментальные исследования доказали работоспособность принципа пространственно-временного кодирования потоков гамма излучения, реализованного в гамма-сканере кругового обзора с кодирующей маской, для дистанционной локализации гамма излучающих нуклидов. Принципиальная простота конструктивного исполнения гамма - сканера позволяет существенно, в 10-20 раз по сравнению с аналогами, снизить стоимость прибора. Очевидно, что ему трудно конкурировать с современными гамма телескопами с развитой поверхностью детектирования по чувствительности, однако в целом он имеет сопоставимые, а для угловой локализации источников и лучшие технические характеристики по сравнению с приборами аналогами. Алгоритмические решения, использующие принцип непрерывного вращения маски позволяют получить дополнительную дискретизацию поля зрения, существенно превышающую размерность маски. Хотя при этом не улучшается угловое разрешение системы, однозначно определяемое размерностью маски, данная методика дает возможность более точно вычислять истинную угловую координату источника и разделять точечные и протяженные источники.

Умеренные массогабаритные характеристики, мобильность, предусмотренная возможность подключения к GPS навигатору и круговое поле зрения делают перспективным его применение для картографирования зон радиоактивного загрязнения.

Предлагаемый комплекс может быть использован сотрудниками природоохранных и экологических организаций в тех случаях, когда необходимо сделать быстрый и качественный анализ ситуации на больших территориях в режиме реального времени, или когда по соображениям безопасности доступ к месту радиоактивного загрязнения затруднен или невозможен.

SYSTEM FOR REMOTE SEARCH, LOCALIZATION AND IDENTIFICATION OF GAMMA RADIATION SOURCES

A.V. Kochergin

Scientific Research and Project Designing Institute «Iskra»
145, Zveineka Str., 91033 Lugansk, Ukraine
E-mail: official@iskra.lugansk.ua

The operation principle of system for remote search, localization and identification of gamma radiation sources on the base of all-round surveillance gamma-scanner realized on the spatial-time coding principle is described in the paper. Results of performances research are presented.

Keywords: GAMMA RADIATION SOURCES, REMOTE LOCALIZATION, CODED APERTURE.

КОМПЛЕКС ДИСТАНЦІЙНОГО ПОШУКУ, ЛОКАЛІЗАЦІЇ І ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ГАММА ВИПРОМІНЮВАННЯ

О.В. Кочергін

Науково – дослідний та проектно-конструкторський інститут «Іскра»,
вул. Звейнека, 145, 91033 Луганськ, Україна
E-mail: official@iskra.lugansk.ua

У роботі описаний принцип дії і представлені результати досліджень технічних характеристик комплексу дистанційного пошуку і локалізації джерел гамма випромінювання на базі гамма-сканера кругового огляду, реалізованого на принципі просторово-часового кодування потоку.

Ключові слова: ДЖЕРЕЛА ГАММА ВИПРОМІНЮВАННЯ, ДИСТАНЦІЙНА ЛОКАЛІЗАЦІЯ, КОДОВАНА АПЕРТУРА.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. В.Ю. Плахотник, А.В. Кочергин, *Вісник ВНУ ім. В. Даля* **9(127)**, 162 (2008).
2. E.E. Fenimore, T.M. Cannon, *Appl. Opt.* **17 No3**, 337 (1978).
3. А.К. Шевченко, *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету* **4**, 31 (2009).
4. Е.Г. Ярощук, *Вестник СевНТУ, серия «Физика, математика»* **99**, 100 (2009).