

УДК 59.43

СИСТЕМА ГАММА-ВИДЕНИЯ НА БАЗЕ ГАММА-ТЕЛЕСКОПА С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ И ЛИНЕЙНЫМ ПОЗИЦИОННО ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ДЕТЕКТОРОМ

Кочергин А. В., зав. лаб.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Искра",

г. Луганск

91033, Луганск, ул. Звейнека, 145с

E-mail: official@iskra.lugansk.ua

Описаний гамма-телескоп із кодовою апертурою на основі лінійного дискретного позиційно чутливого детектора. Надана методика розрахунку геометричних параметрів системи і алгоритми побудови зображення і обробки даних. Наведено результати випробувань і досягнуті технічні характеристики гамма-телескопа "Фредерік"

Ключові слова: гамма-телескоп, позиційно чутливий детектор, візуалізація гамма-випромінювання, кодовані апертури

Coded aperture gamma telescope on the basis of linear discrete position sensitive detector is described in the article. The calculation method of geometrical parameters of the system and algorithms of image construction and data processing are presented. The tests results and technical performances of the gamma telescope "Frederic" are described too.

Key words: gamma telescope, position-sensitive detector, gamma-ray imaging, coded apertures.

Введение. Под системами гамма-видения понимается комплекс аппаратных и программных средств для получения карты распределения интенсивности поля гамма-излучения, локализации его неоднородностей и привязки их к объектам, находящимся в поле обзора.

Диапазон задач, в которых необходимо получение изображений в гамма-лучах, чрезвычайно широк и не нуждается в детализации.

Цель работы. Описана разработанная в НИПКИ «Искра» по заказу Французского государства реализация системы гамма-видения на базе гамма-телескопа с кодированной апертурой и линейным позиционно-чувствительным детектором, предназначенная для решения оперативных задач разведки местности, загрязненной радиоактивными материалами и продуктами их распада при возникновении экстремальных экологических ситуаций

Физические принципы реализации гамма телескопа.

Системы гамма-видения с кодированной апертурой представляют собой приборы, реализующие мультиплексную логику измерений и, поэтому, обладающие существенными преимуществами перед сканирующими системами [1]. В частности, чувствительность системы с кодированной апертурой существенно выше из-за значительной доли (~ 0,5) открытой поверхности детектора. Особенно значительно преимущество системы с кодированной апертурой при необходимости получения изображения большого количества пространственных элементов. Такая система обеспечивает мультиплексный выигрыш за счет того, что в процессе измерений одновременно наблюдаются все пространствен-

ные элементы поля зрения.

В общем случае прибор с кодированной апертурой для получения изображения гамма-излучающих объектов содержит узел кодирования потока гамма-квантов (кодировочную маску) и позиционно-чувствительный детектор - ПЧД. Физическая схема прибора показана рис 1.

Кодирующая маска предназначена для кодирования информации о местонахождении источника гамма-квантов и представляет собой множество элементов, часть из которых поглощает значительную долю гамма-излучения источника, а другая часть множества элементов абсолютно прозрачна для гамма-квантов. Гамма-кванты, испускаемые объектом в направлении ПЧД, создают на нем гамма-тень маски. Эта тень регистрируется ПЧД в виде числа гамма-квантов, испытавших взаимодействие в отдельных ячейках. Последующая математическая обработка зарегистрированной тени позволяет восстановить изображение объекта.

В данной реализации ПЧД был построен на базе 19 сцинтилляционных детекторов на основе сборки ФЭУ - кристалл CsI(Tl) размером Ø50×100 мм.

Маска была построена на основе квадратичного множества [2] по основанию $n = 19$ со следующими параметрами.

Базовая последовательность прозрачных и непрозрачных элементов имеет вид:

$$A_j = 0011000010101111001$$

(0 соответствует закрытому элементу, а 1 - открытому).

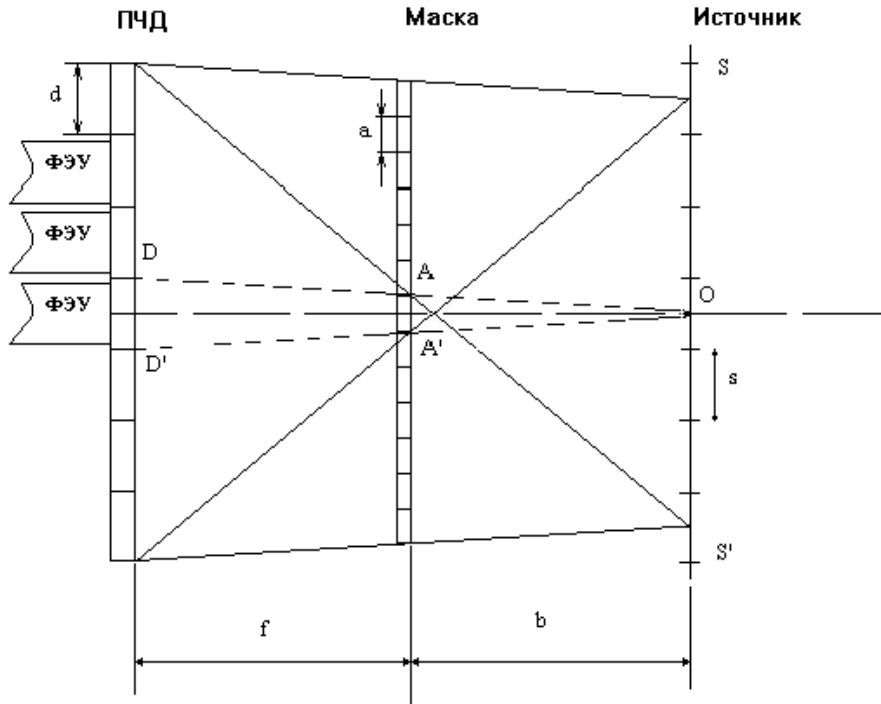


Рисунок 1 – Физическая схема системы гамма-видения с кодированной апертурой

Полная равномерно-избыточная маска содержит $(2n - 1) = 37$ элементов и образуется за счет циклического добавления базовой последовательности в обе стороны.

Материал элементов – свинец, толщиной 20 мм.

Расчет геометрии гамма-телескопа проводился по следующим исходным данным:

- угловое разрешение $\Delta\alpha$, градус;
- расстояние до фокальной плоскости b , м;
- высота ПЧД;
- размеры объекта наблюдения $D \times h$, м;
- шаг установки детекторов d ;

минимальная плотность потока источника, изображение которого нужно получить Φ_m , $c^{-1}cm^{-2}$ за время T , с.

Расчетными параметрами являлись:

- расстояние от маски до ПЧД f ;
- размеры элемента маски a и h ;
- поле зрения и позиционное разрешение s .

Угловое разрешение системы связано с позиционным разрешением s выражением

$$s = 2 \cdot f \cdot \operatorname{tg} \frac{\Delta\alpha}{2}. \quad (1)$$

Под позиционным (угловым) разрешением понимается минимальное расстояние (угол) между двумя точечными источниками, при котором их изображения проектируются на чувствительные поверхности соседних блоков детектирования ПЧД без перекрытия. Из геометрических соображений легко получить формулу для расчета ширины элемента кодирующей маски:

$$a = \frac{s \cdot d}{s + d}. \quad (2)$$

Кроме того, расстояние f - от ПЧД до маски и расстояние b - от маски до объекта связаны с шириной элемента маски соотношением:

$$\frac{b}{b + f} = \frac{a}{d}. \quad (3)$$

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Геометрические параметры гамма телескопа «Фредерик»

f, мм	a мм	α°	h мм	b _{опт} м	Рабочий диапазон, м.		Максимальная высота объекта на границах диапазона м		Поле полного кодирования на границах диапазона м		Позиционное разрешение на границах диапазона м	
					b _{бл}	b _{дал}	H _{бл}	H _{дал}	S _{бл}	S _{дал}	s _{бл}	s _{дал}
1570	55	2,07	260	25	15	150	1,59	15,35	9,93	89,3	0,525	5,25

Построение изображения и обработка данных.

Вся информация для восстановления интенсивности γ -поля содержится в матрице счетности P , элементы которой представляют собой числа событий, зарегистрированных соответствующими детекторами за время наблюдения в выбранном для измерений энергетическом диапазоне. С целью устранения влияния систематических погрешностей на результаты восстановления образа в системах с кодированной апертурой предлагается применить метод измерений "маска-антимаска". При использовании этого метода матрица счетности P формируется как разность матрицы PM , полученной при измерении с маской, и матрицы PA , полученной при измерении с антимаской:

$$P_i = P_{mi} - P_{ai}, \quad (4)$$

где i - номер детектора в ПЧД.

Необходимо отметить, что времена измерений с маской и антимаской равны и составляют половину общего времени наблюдения. Поскольку выбранная кодирующая последовательность обладает осевой симметрией относительно центрального элемента, переход в режим антимаски осуществлялся поворотом маски на 180° с реконfigurацией центрального элемента.

Далее матрица счетности P подвергается математической обработке в соответствии с выражением, представляющим собой дискретную свертку:

$$O_k = \sum_{i=0}^{18} P_i \cdot G_{i+k}, \quad (5)$$

где массив обработки G с целью расширения поля зрения системы за счет области неполного кодирования дополняется соответствующим образом исходя из выбранной кодирующей последовательности до размерности $(2n - 1) + 2(n - 1) = 73$ поля предельного кодирования. При этом размерность массива O восстановленного изображения составляет $(2n - 1) + (n - 1) = 55$ элементов.

Каждый элемент матрицы образа O является оценкой числа гамма-квантов, пришедших к ПЧД из соответствующего элемента поля за время наблюдения. Удобно рассматривать карту распределения интенсивности γ -поля в терминах превышения интенсивности потока гамма-квантов от источника над фоном. С этой целью вычисляется значение стандартного (среднеквадратичного) отклонения счетности σ для всего ПЧД.

Так как процессы испускания и регистрации γ -квантов подчиняются статистике Пуассона, значение σ можно вычислить по формуле:

$$s = \sqrt{\sum_i (PM_i + PA_i)}. \quad (6)$$

Каждый элемент карты образа в величинах превышения над фоном вычисляется по формуле:

$$OS_k = \frac{O_k}{S}. \quad (7)$$

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, поскольку методика восстановления исходного изображения при помощи дискретной свертки обеспечивает выделение всех источников. Неопределенность в расшифровке карты появляется при усложнении картины γ -поля при наличии нескольких источников в поле полного и ограниченного кодирования и/или распределенных источников, занимающих существенную часть поля зрения. При этом возможно наложение ложных откликов от полностью кодируемого источника на истинное положение источника с низкой эффективностью кодирования. Суперпозиция ложных откликов в поле ограниченного кодирования также может создать определенные технические трудности при расшифровке карты. Чтобы устранить неопределенности, необходима дополнительная обработка карты восстановленного изображения.

В общем случае линейная система с кодированной апертурой описывается операторным уравнением первого рода [3].

$$O = S \cdot R, \quad (8)$$

где O – полученное изображение;
 R – распределение γ -источников в поле зрения;
 S – матрица обработки, полученная по формуле:

$$S_{m,k} = \sum_{i=0}^{n-1} G_{i+k} \cdot G_{i+m}. \quad (9)$$

Идеализированная задача конечной деконволюции такова: заданы функции S и O , требуется восстановить функцию R , для чего был применен метод, определенный нами как субтрактивная деконволюция.

Цель данного метода обработки состоит в последовательной очистке изображения от ложных откликов, связанных с надежно определяемыми источниками.

Рассматриваемый алгоритм содержит следующие этапы.

Находится наиболее яркий элемент O_m в изображении O , сравнивается с порогом деконволюции T , обычно определяемом в количествах σ , и в том случае, если $O_m \geq T$, - заносится в m -ой позиции предварительно обнуленного очищенного изображения.

Вычисляется матрица функции рассеяния точки (ФРТ) для точки с координатами m по формуле:

$$O1_k = \sum_{i=0}^{n-1} G_{i+m} \cdot G_{i+k}, \quad (10)$$

где k принимает значения от 0 до 3n-3.

Новое искаженное изображение находится с помощью операции вычитания:

$$O_s = \frac{O}{O_m} - \frac{O1}{O1_m}. \quad (11)$$

Операция повторяется до тех пор, пока в новом искаженном изображении не останется элементов с яркостью выше пороговой.

Вследствие статистического характера процесса регистрации γ -квантов и изображающих свойств кодирующей апертуры, оцениваемых с помощью функции рассеяния точки системы (SPSF), восстановление источников, расположенных у края либо за краем поля полного кодирования, может вызывать ошибки.

В этом случае очистка изображения от ложных откликов может быть улучшена с помощью вычисления коэффициентов корреляции матрицы счетности P и последовательных выборок по n элементов из матрицы G. Такие расчеты не представляют сложности и производятся по формуле для коэффициента корреляции двух рядов измерений, то есть ряда P и ряда G:

$$R_k = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} P_i \cdot G_{i+k} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=0}^{n-1} P_i \cdot \sum_{i=0}^{n-1} G_{i+k} \right)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} P_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=0}^{n-1} P_i \right)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} G_{i+k}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=0}^{n-1} G_{i+k} \right)^2}}, \quad (12)$$

Дальнейшая последовательность действий такова:

вычисляются значения матрицы индикаторов по формуле:

$$In_k = O_k \cdot R_k. \quad (13)$$

Определяется максимальное значение в матрице In и его индекс (m).

Считая, что в этой позиции находится наиболее яркий элемент Om в изображении O, последний сравнивается с порогом деконволюции T, и в том случае, если $Om \geq T$, - заносится в m-ой позиции предварительно обнуленного очищенного изображения.

Вычисляется матрица ФРТ для точки с координатами m по формуле (10) и новое искаженное изображение по формуле (11).

Вычисляются новые значения матрицы индикаторов по формуле:

$$In_k = Os_k \cdot R_k. \quad (14)$$

Операция повторяется до тех пор, пока в новом искаженном изображении не останется элементов с яркостью выше пороговой.

Предложенная система гамма видения была построена по заказу ядерного центра Буше Франция и прошла полный комплекс испытаний.

Внешний вид прибора и интерфейса управляющей программы Teles представлен на рис. 2.



Рисунок 2 – Гамма-телескоп "Фредерик" с линейным позиционно-чувствительным детектором

Результаты и рекомендации.
 Технические характеристики прибора, подтвержденные в результате испытаний таковы:
 Дистанция наблюдения объектов (м) 30..150
 Угловое разрешение системы

(градусы), не хуже 2
 Время измерения для обнаружения источника ^{137}Cs активностью 50 мКи (мин), не более 3
 Поле зрения прибора на дистанции

100 м:	
высота (м)	5
длина (м)	100
длина полного кодирования (м)	60
Энергетический диапазон регистрируемого гамма-излучения (МэВ)	0,1..3,0
Энергетическое разрешение по гамма-линии ^{137}Cs 662 кэВ (%), не хуже	10
Максимальная входная статистическая загрузка (с^{-1}), не более	10^4
Время реконфигурации маски (с), не более	10
Детектируемая активность на дистанции 100 м:	
минимальная (мкКи)	100
максимальная (Ки)	1
чувствительность ($\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$)	0,01
Совмещение карты поля с видеоизображением	есть
Вес прибора (кг), не более	150

Гамма-телескоп "Фредерик" выполнен в модульном варианте конструкции, где масса каждого модуля не превышает 50-ти килограмм, и может использоваться как в мобильном варианте на транспортном шасси, так и в виде стационарного прибора. Монтаж прибора в зоне наблюдения осуществляется персоналом из двух человек за 20 минут.

Управление системой осуществляется при помощи специализированного программного обеспечения Teles, позволяющего дистанционное управление оборудованием и реконструкцию изображения гамма-поля. Дружественный интерфейс ПО Teles позволяет проводить профессиональную обработку спектрометрической информации с любого элемента ПЧД и настраивать параметры реконструкции изображения.

Полное поле зрения гамма телескопа делится на 19 центральных элементов поля полного кодирования и 2×18 боковых элементов поля частичного кодирования. При этом тень маски от источника, находящегося в поле полного кодирования, охватывает все 19 элементов ПЧД, а тень маски от источника, находящегося в поле неполного кодирования, охватывает все от 1 до 18 элементов ПЧД.

Испытания показали, что в данной реализации система может достоверно обнаружить точечный

источник, если тень маски от источника охватывает не менее 8 элементов ПЧД, что сужает полное поле зрения до 39 дискретных элементов.

Следует отметить, что достигнутая чувствительность предлагаемой системы позволяет определять слабые и сверхслабые неоднородности поля гамма излучения, недоступные для других методов.

В частности, во время испытаний источник γ -излучения ^{60}Co активностью $4,43 \cdot 10^5$ Бк за время 30 минут достоверно обнаруживался с расстояния не более 21 метра, что в пересчете на плотность потока соответствует чувствительности $0,01 \text{ сек}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Реализованная в программе Teles методика, кроме того, позволяет провести реконструкцию спектра с любого выбранного направления в поле зрения системы и, следовательно, облегчить составление радиоизотопной карты загрязнения местности.

К недостаткам следует отнести факт размывания изображения источников при их расположении в ближнем поле (ближе 15 метров) и трудность локализации источников, занимающих более 30% поля зрения.

Выводы. Таким образом, применение системы с кодированной апертурой для получения изображений пространственного распределения источников излучения оправдано при измерениях слабых сигналов (потоков излучения) и/или необходимости детализации пространственного распределения источников излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dunphy P.P., McConnell M.L., Owens A., Chupp E.L., Forrest D.J., Googins J. A Ballon-borne Coded Aperture Telescope for Low-Energy Gamma-Ray Astronomy / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1989, v.A274, pp. 362-379.
2. Fenimore E.E., Cannon T.M. Coded Aperture Imaging with Uniformly Redundant Array./ Applied Optics, 1978, v.17, No.3, February, pp.337-347.
3. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. - М.: Мир, 1989. - 336с.

Рекомендовано к печати к.т.н., доц.
Мосьяном В.А.