

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ИНТРОСКОПОВ С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И СМЕШАННОГО НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Прокуронов М.В., С.Ю. Александрин¹

⁽¹⁾Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия)

Интроскоп с кодированной апертурой измеряет направление прихода гамма-кванта, энергию, момент времени регистрации, регистрирует изображения рентгеновских и гамма-источников. А это, наиболее полная информация о поле ионизирующего излучения, она задается распределением пространственно-временной, энергетической и угловой плотности потока частиц $f(r, t, e, v)$ [1].

Интроскоп с кодированной апертурой состоит из коллиматора с кодированной апертурой и координатно-чувствительного детектора (КЧД). В коллиматоре имеются отверстия, определенным образом расположенные, каждая из которых строит изображение на поверхности КЧД, подобно камере обскуры, и таким образом формируется теневое изображение. По массиву токов разрешающих элементов КЧД декодируется и восстанавливается изображение гамма-источников. Технические характеристики гамма-интроскопа с кодированной апертурой, определяются характеристиками ионизирующего излучения, для измерения которых предназначен интроскоп с кодированной апертурой. А он позволяет решать широкий спектр задач, связанных с регистрацией изображения источников ионизирующего излучения, и измерением спектральных, временных и дозовых характеристик ионизирующего излучения. Следовательно, характеристики гамма-интроскопа отражают физические параметры измеряемого ионизирующего гамма-излучения. Это амплитудные, временные, спектральные, пространственно-угловые характеристики. Гамма-кванты невозможно фокусировать, так же как оптические или инфракрасные в небольшое пятно в фокальной плоскости телескопа, поэтому для получения изображения гамма-источников существует единственный метод – формирование изображения источника (S, рис.1) камерой–обскурой (К, рис.1) и регистрация этого теневого изображения КЧД (D, рис.1). Геометрические параметры интроскопа с камерой-обскурой определяют две его основных характеристики-угловое разрешение и поле зрения. L_0 – расстояние между коллиматором и входным окном координатно-чувствительного детектора; d – диаметр отверстия камеры-обскуры.; L_D – диаметр входного окна координатно-чувствительного детектора. Угловое разрешение – γ и поле зрения – α , определяются по формулам:

$$\gamma = \arctg(d / L_0) \quad ; \quad \alpha = 2 \times \arctg(L_D / (2 \times L_0)) \quad (1)$$

L_0 – расстояние между коллиматором и входным окном координатно-чувствительного детектора.; d – диаметр отверстия камеры-обскуры.; L_D – диаметр входного окна координатно-чувствительного детектора.

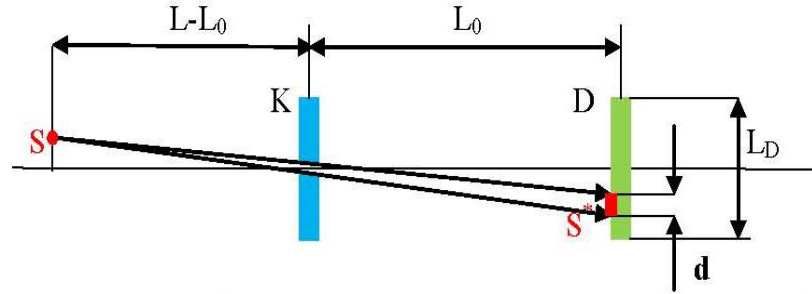


Рис.1. Формирование изображения гамма-источника (S) камерой–обскурой(K) и регистрация этого изображения КЧД (D)

Регистрация изображения источников ионизирующего излучения камерой обскурой характеризуется определенным и четким свойством взаимно-однозначного соответствия между положением источника в поле зрения и положением источника на изображении. При смещении источника будет меняться теневое изображение. Но камера обскуры имеет малую чувствительность, излучение падает на КЧД только через одно отверстие камеры-обскуры. В методе кодированной апертуры [2] изображение формируется кодированной маской-коллиматором, половину площади которой занимают отверстия, соответственно резко повышается чувствительность и соотношение сигнал/фон. При этом, что существенно важно, сохраняется взаимно-однозначное соответствие между положением источника в поле зрения и теневым изображением, формируемым в КЧД гамма-квантами, проходящими через коллиматор с кодированной апертурой.

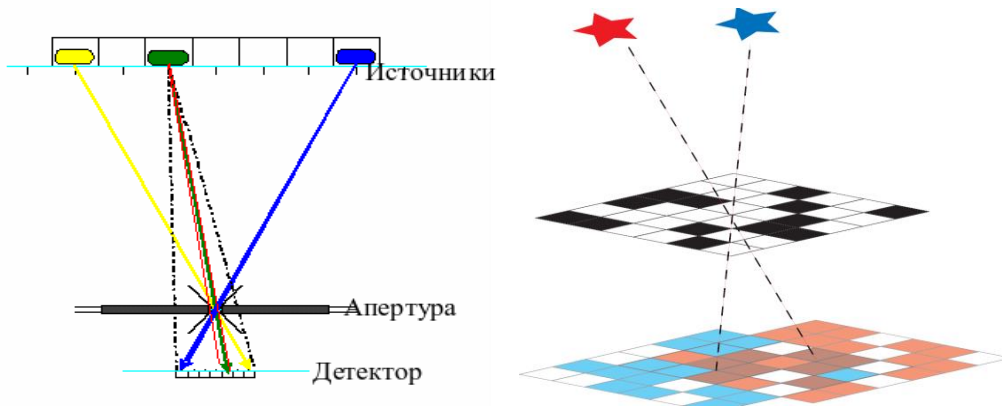


Рис. 2. Взаимно-однозначное соответствие между положением источника в поле зрения коллиматором с кодированной апертурой

Эти процессы соответствия показаны на рисунке 2. Формируемое кодированной маской изображение может быть представлено в виде [2]:

$$P = (O * A) + N ; \quad P(k, l) = \sum_i \sum_j O(i, j) A(i + k, j + l) + N(k, l) \quad (2)$$

Где A – матрица кодирующей маски, O – матрица источника O , P – матрица изображения, N – матрица помехи, $P(k, l)$ элемент изображения P , регистрируемый разрешающим детекторным модулем КЧД, с координатами k, l ; $O(i, j)$ – элемент источника O ; $A(i + k, j + l)$ элемент матрицы кодирующей маски A , описывающей распределение отверстий в маске; $N(k, l)$ элемент помехи в зарегистрированном элементе $P(k, l)$.

Для восстановления изображения гамма-источников вводится обратная матрица G такая, что ее свертка с матрицей A , близка к δ -функции т.е. $A * G = \delta$. Тогда восстанавливаемый источник $\hat{O}$ может быть найден с помощью соотношения:

$$\hat{O} = P * G = O * A * G + N * G \quad \hat{O}(i, j) = \sum_k \sum_l P(k, l) * G(k + i, l + j)$$

которое, в случае выполнения соотношения $A * G = \delta$ приводится к виду

$$\hat{O} = O + N * G,$$

где $N * G$ – некоторая матрица шума в восстановленном источнике $\hat{O}$, отличная от матрицы шума N_b изображении P .

Выбор формы расположения отверстий на маске A , т.е. типа маски A , и соответственно G определяется в первую очередь выполнением соотношения $A * G = \delta$, т.е. наилучшим совпадением зарегистрированного и восстановленного изображения с исходным, обеспечение максимальной чувствительности и соотношения сигнал/шум. Для выполнения этих требований оптимальным является такое расположение отверстий в кодированной маске коллиматора, которое строится с использованием циклических двоичных последовательностей, носящих название равномерно избыточных массивов URAs[2].

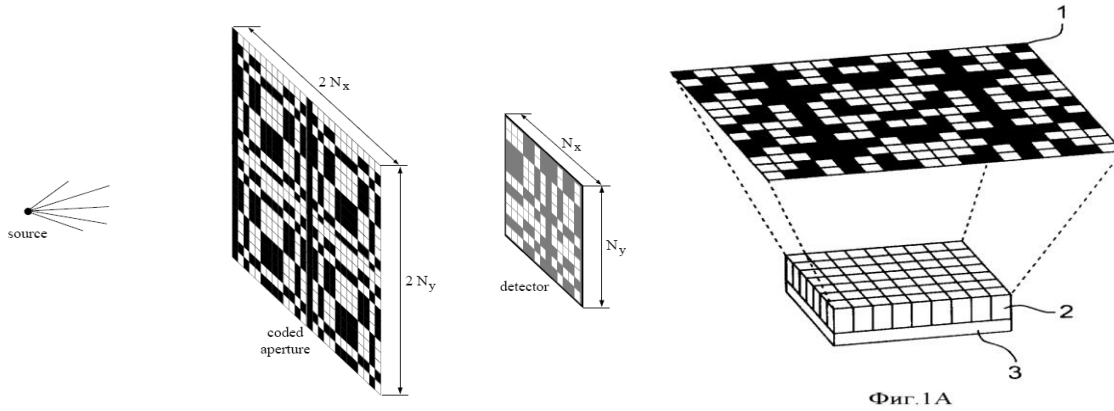


Рис. 3. Формирование изображений кодированной апертурой

Это массивы $A(x, y); x=0, 1, \dots, r-1; y=0, 1, \dots, s-1; A(x, y) \in \{0, 1\}$. Главным их свойством, да и определением являются свойства периодической автокорреляционной функции – $\varphi_{AA}(k, l)$, которая вводится для URAs [4]-

$$\varphi_{AA}(k, l) = \sum_{x=0}^{r-1} \sum_{y=0}^{s-1} A(x, y) A(x + \text{mod}_r k, y + \text{mod}_s l) \quad \varphi_{AA}(l, k) = \begin{cases} K & \text{если } \text{mod}_r k = 0 \text{ и } \text{mod}_s l = 0 \\ \lambda & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

$\text{mod}_r k$ и $\text{mod}_s l$ – это остаток от деления по модулю k на r и l на s . Эта периодическая автокорреляционная функция состоит из центрального пика K и боковых постоянных лепестков (значений) – λ .

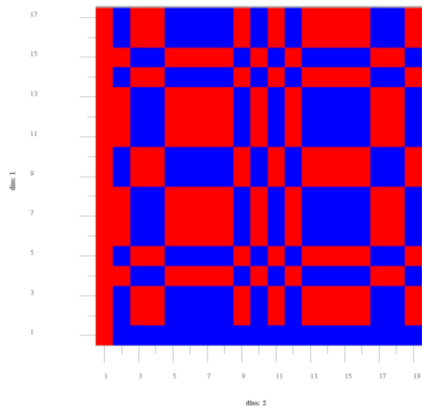


Рис.4. Базовая кодированная маска

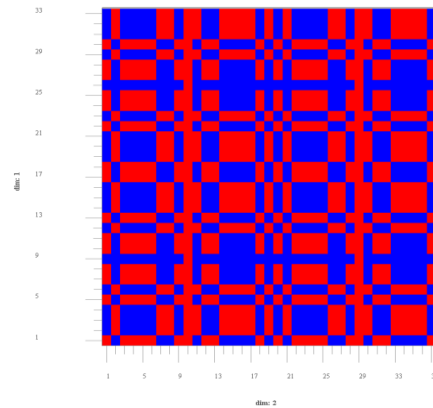


Рис.5. Кодированная маска коллиматора

К массивам URAs относятся псевдошумовые массивы нулей и единиц. Такой псевдошумовой массив $Ab(x,y)$, будет иметь размерности r по s ($r \times s$), где r и s являются простыми числами, а $r-s$ равно 2. Этот массив $Ab(x,y)$ носит название базовой маски (рис.4.) и является основой кодированной маски. Сама же кодированная маска коллиматора $A(x,y)$ (рис.5.) состоит из мозаики рисунка базовой маски и ее размеры определяются числом неповторяющихся циклических перестановок базовой маски, которое равно $r \times s$. Тогда кодированная маска коллиматора будет иметь размер $(2r-1) \times (2s-1)$ и будет содержать все циклические перестановки базовой маски. Распределение единиц и нулей в массиве $Ab(x,y)$ строится с использованием процедуры деления по модулю r и s . Вводится $Ab(i,j) = A(I,J)$, где $I = \text{mod}_r i$, и $J = \text{mod}_s j$, остаток от деления по модулю i на r и j на s . Далее.

Элементы обратной матрицы $G(x,y)$ определяются по элементам маски $A(x,y)$ - $G(k,l)=1$, если $A(k,l)=1$ и $G(k,l)=-1$, если $A(k,l)=0$. (5)

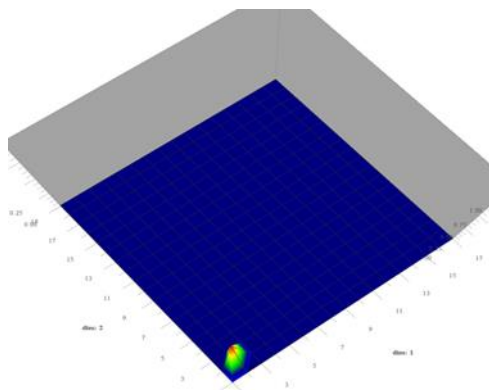


Рис. 6. Изображение источника в элементе $O(1,1)$

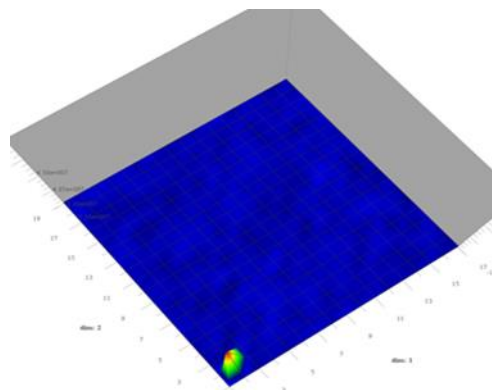


Рис. 7. Восстановленное изображение

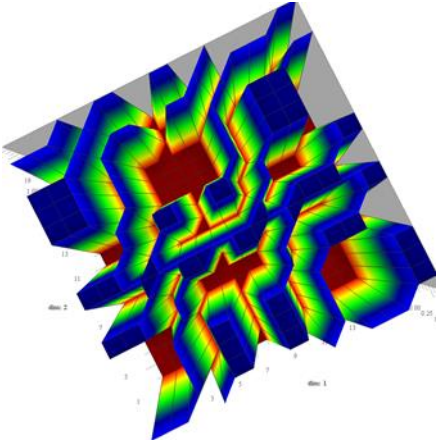


Рис.8. Циклически сдвинутая версия рисунка базовой маски $A(1+k, 1+l)$

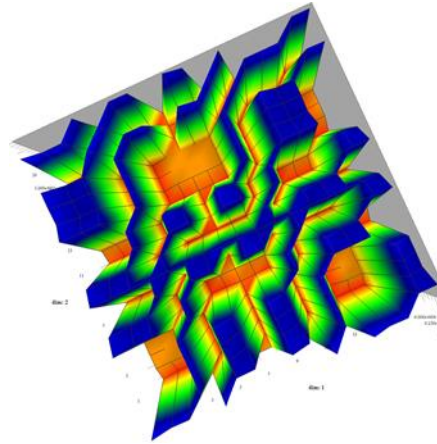


Рис. 9. Теневое изображение $P1,1(k,l)$ которое является версией рисунка базовой маски $A(1+k, 1+l)$

Для матрицы $A(k,l)$ и обратной матрицы $G(k,l)$ вводится корреляционная функция –

$$\varphi_{AG}(i,j) = \sum_{k=0}^{r-1} \sum_{l=0}^{s-1} A(k,l)G(i+k, j+l)$$
 которая равна $\varphi_{AG}(i,j) = \begin{cases} (rs-1)/2 & \text{if } \text{mod}_r i=0 \text{ и } \text{mod}_s l=0 \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$ (6)

т.е. $A * G \approx \delta$.

Излучение источника, который может находиться в каждом пикселе поля зрения $O(i,j)$, на пример $i1, j1$, проходя через кодированную маску коллиматора, создает теневое изображение на детекторе $P_{i1,j1}(k,l)$, которое представляет собой циклически сдвинутую версию рисунка базовой маски, которая задается матрицей кодированной маски коллиматора $A(i1+k, j1+l)$. Таким образом, устанавливается взаимно-однозначное соответствие между пикселем поля зрения $i1, j1$, в котором находится источник и циклически сдвинутой версией рисунка базовой маски. Было проведено статистическое моделирование по методу Монте-Карло восстановленного изображения источника, а также теневого изображения $P_{i1,j1}(k,l)$, которая является версией рисунка базовой маски - $A(1+k, 1+l)$. Исходное изображение источника показано на рис.6., восстановленное на рис.7.

Также характеристики интроскопа с кодированной апертурой существенно определяются используемым КЧД. Можно использовать сцинтилляционные детекторы, в том числе и те, которые имеют разную форму импульса от нейтронов и гамма-квантов. Это позволяет проводить разделение по форме импульса нейтронов и гамма-квантов [3]. Черенковские детекторы также можно использовать для раздельной регистрации гамма-квантов и алмазные детекторы [4]. Это все расширяет возможности использования интроскопа с кодированной апертурой.

Список литературы

1. Н.Г. Гусев, В.П. Машкович, А.П. Суворов. Физические основы защиты от излучений. М., Атомиздат, 1980.
2. Fenimore E.E. and Cannon T.M. Coded aperture imaging with redundant arrays. J. Appl. Opt., 1978, v.17, № 22, p.3562.

3. Прокуронов М.В., Голубев А.А., Демидов В.С. и др. *Цифровая идентификация частиц по форме импульса*. ПТЭ. №2. 2006. С. 7.
4. Прокуронов М.В., Севастьянов В.Д., Янушевич А.В., Шибает Р.М. Позиционно-чувствительные детекторы с идентификацией типа частиц для регистрации изображения нейтронных и гамма-источников в смешанных полях. Атомная Энергия. Том 128. N 5(2020).