

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ ГАММА-СКАНЕРА КРУГОВОГО ОБЗОРА С КОДИРУЮЩЕЙ МАСКОЙ

П.Ю. Войлов, научн. сотрудник,

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Искра», г. Луганск

В статье рассматривается программно-имитационная модель гамма-сканера – измерительного средства, предназначенного для получения двумерных изображений источников ионизирующего излучения с использованием кодированной апертуры. Описаны результаты сравнительных экспериментов, в которых восстановление изображений выполнялось модифицированным методом корреляции. В качестве количественных показателей адекватности рассчитаны погрешности по четырем статистическим моментам.

Ключевые слова: *гамма-сканер, кодированная апертура, имитационное моделирование, радиационные измерения, радиационный мониторинг.*

У статті розглянуто програмно-імітаційну модель гамма-сканера – вимірального засобу, призначеного для отримання двовимірних зображень джерел іонізуючого випромінювання з використанням кодової апертури. Описано результати порівняльних експериментів, в яких реконструкція виконувалася модифікованим методом кореляції. Як кількісні показники адекватності розраховано похибки за чотирма статистичними моментами.

Ключові слова: *гамма-сканер, кодована апертура, імітаційне моделювання, радіаційні вимірювання, радіаційний моніторинг.*

ВВЕДЕНИЕ

В связи с использованием в современной технике ядерно-технических установок (ядерные реакторы, ускорители частиц) и широким использованием в технических и диагностических целях радионуклидных источников излучений весьма актуальной в настоящее время стала проблема локализации источников ионизирующих излучений. К настоящему времени создан ряд приборов, представляющих собой системы визуализации источников гамма-излучения с пространственной модуляцией и предназначенных для работы в ближнем поле (в отличие от систем, ранее применявшихся в астрономических приложениях). Одним из таких приборов является гамма-сканер кругового обзора, разработанный в НИПКИ «Искра» [1].

Существенным препятствием при создании подобных приборов являются значительные материальные затраты, необходимые для осуществления набора экспериментов с широким диапазоном источников излучения, геометрий и вариантов конструкций самого прибора. С другой стороны, современный уровень вычислительной техники и программного обеспечения позволяет разрабатывать достаточно сложные программные имитационные модели, которые позволили бы как провести сравнительный анализ различных конструктивных решений и алгоритмов обработки накопленных данных, так и исследовать характеристики прибора и его отклик в различных типовых ситуациях.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Система визуализации с пространственной модуляцией основана на пространственном кодировании положения источника излучения с помощью кодирующей маски, состоящей из массива элементов, прозрачных для гамма-излучения и массива элементов, поглощающих его. Маска устанавливается между областью источников и позиционно-чувствительной детектирующей плоскостью (ПЧД) так, что любой

источник излучения в поле зрения проектирует тень маски на детектирующую плоскость. Таким образом, кодирующая маска расположена в апертуре системы визуализации.

Пространственное распределение плотности потока в гамма-сканере осуществляется с помощью кодирующей маски, свойства которой такие же, как и свойства масок, применяемых в методе пространственного кодирования. Сканирование пространства осуществляется путем вращения кодирующей маски. Общая схема гамма-сканера кругового обзора показана на рисунке 1. В своем составе сканер содержит цилиндрический детектор гамма-излучения 1, вращающуюся цилиндрическую кодирующую маску 2, привод вращения маски 3, датчик углового положения кодирующей маски 4, средства стабилизации спектрометрического тракта 5 и процессор обработки данных 6.

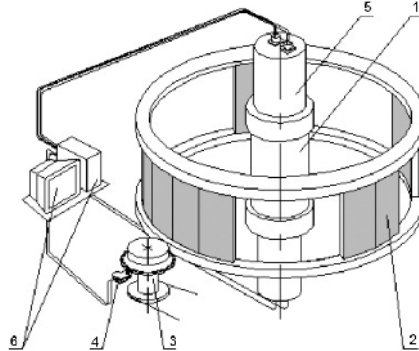


Рисунок 1 - Схема гамма-сканера кругового обзора

Цель создания имитационной модели - моделирование функции отклика измерительного прибора (гамма-сканера кругового обзора) в произвольной геометрии эксперимента для любого количества источников ионизирующего излучения произвольного состава.

Задачи при создании имитационной модели: моделирование произвольного числа источников излучения в лабораторном пространстве, моделирование конструктивных особенностей гамма-сканера, имитация взаимодействия гамма-квантов с элементами конструкции гамма-сканера и с материалом детектора, имитация физико-химических свойств и спектрометрических характеристик первичного измерительного преобразователя (сцинтилляционного детектора) гамма-сканера, моделирование вторичного измерительного преобразователя (ФЭУ) и спектрометрического тракта, имитация алгоритмов обработки измерительных данных (алгоритмы восстановления спектров с направлений и локализации источников ионизирующего излучения).

Цель данной работы - оценить адекватность имитации моделью углового разрешения прибора на примере решения задачи восстановления плотности потока с направлений от множественных источников, расположенных на малом удалении друг от друга. Оценка адекватности будет выполнена сравнением статистических параметров распределения угловой плотности потока в полном энергетическом окне в реальном эксперименте с имитационным.

СТРУКТУРА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Для реализации комплексного информационно-аналитического обеспечения работы с гамма-сканером был разработан имитационно-аналитический программный комплекс (ИАПК) *GRIDS*, в состав которого входил модуль имитационного моделирования *GSMS*. Структурная схема ИАПК представлена ниже на рис. 2.

Как видно из схемы (рис. 1), ИАПК представлен двумя исполняемыми файлами и четырьмя динамически подключаемыми библиотеками. Исполняемый файл *GSMS* предназначен для выполнения имитационного моделирования, исполняемый файл *GRIDS* — для получения и обработки экспериментальных данных и построения карт полей радиоактивности. Библиотека *GSCore* предоставляет все основные классы и типы данных, основные функции (восстановление спектров, изображений, активностей и дозовых полей источников), а также выполняет сериализацию данных. Библиотека *GSDecay* обеспечивает подключение к базе данных изотопов, построение цепочек распада, вычисление активностей и т.п. Библиотека *GSComm* обеспечивает прием и передачу данных от внешних устройств (гамма-сканеры, приемники GPS и пр.). Библиотека *GSMapper* обеспечивает пространственную привязку измерений к географическим данным, восстановление полей ионизирующего излучения по экспериментальным данным, растеризацию и отображение этих полей. На схеме также показаны внешние библиотеки сторонних разработчиков, используемые в проекте.

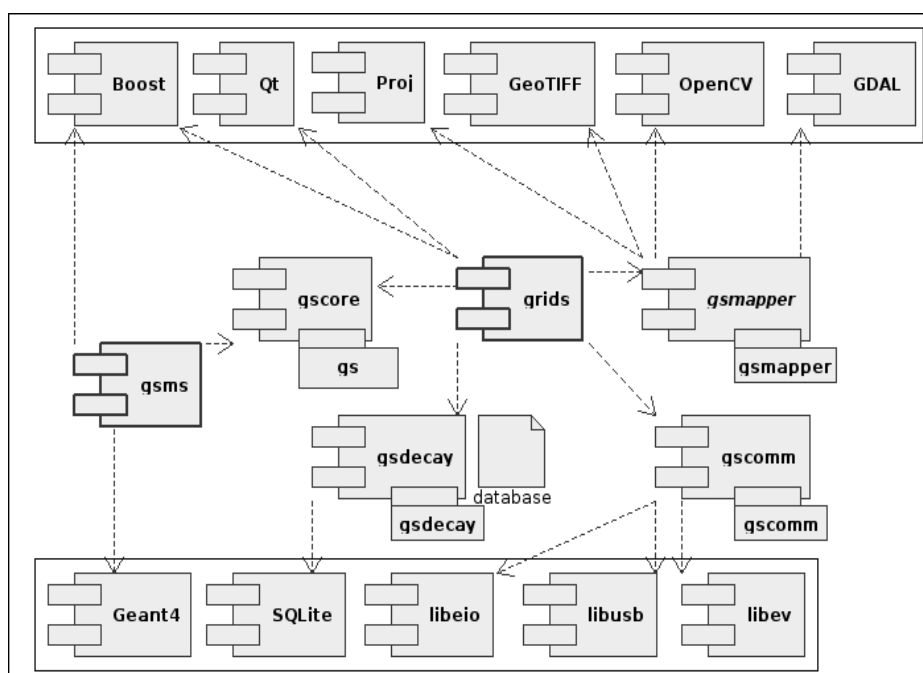


Рисунок 2 – Структурная схема ИАПК

В части имитационной модели *GSMS* используются библиотеки *Boost* [2], утилитарная библиотека для обеспечения ряда служебных функций и промежуточных типов данных и библиотека *Geant4* [3], разработанная Европейским институтом ядерных исследований CERN (Женева, Швейцария) и используемая для моделирования методами Монте-Карло переноса излучения и его взаимодействия с веществом. Программная реализация модели в целом является развитием подхода, изложенного в [4-5], выполнена на языке C++, компилятор GCC 4.4.2, компиляция и выполнение экспериментов производились в ОС Gentoo Linux (2.6.32), общая длительность проведенных имитационных экспериментов на апрель 2010 года составила свыше 400 часов машинного времени.

На рис. 3 показана схема геометрии гамма-сканера в имитационной модели.

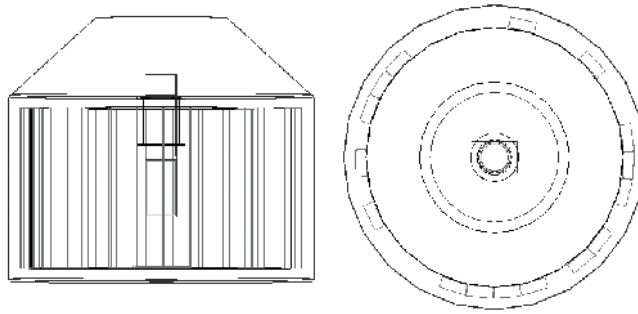


Рисунок 3 – Элементы гамма-сканера в программно-имитационной модели

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

Для восстановления пространственных распределений источников гамма-излучения в имитационной модели реализован модифицированный метод корреляции [6]. 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.

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 -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.

Для случая двумерной апертуры процесс получения изображения

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

где $O_{i,j}^*$ – 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; n, m – размерности базового фрагмента кодирующей маски.

G

$$a * G = \delta, \quad (2)$$

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

$$G_{i,j} = \begin{cases} 1, & a_{i,j} = 1, \\ -1, & a_{i,j} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В случае наличия в поле зрения нескольких источников матрица P представляет собой суперпозицию теней маски, создаваемых потоками γ -квантов от различных источников.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-СКАНЕРОМ МНОЖЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ

В рамках имитационного эксперимента и физического эксперимента моделировались семь геометрий, во всех использовались источники Ba^{133} ($5,4 \pm 0,5 \dots 5,5 \pm 0,5$) $\times 10^5$ Бк. В каждой геометрии устанавливались три источника вдоль по прямой, перпендикулярной направлению на кристалл сцинтиллятора гамма-сканера (расстояние по нормали до оси сцинтиллятора 2,9 м), и коллимировались в направлении на кристалл сцинтиллятора. Расстояние между источниками составляло от 1,1 до 0,5 угловых дискрет (1 у.д. = $2 / 31$) с шагом 0,1 у.д.

Совмещенные диаграммы плотностей потоков в полярной системе координат, восстановленные по (1), (2) и (3) для имитационного и физического экспериментов, представлены на рис. 4-7. Ниже под главным лепестком будем понимать максимальный (по амплитуде) пик диаграммы плотности потока, соответствующий изображению источников в поле зрения гамма-сканера.

В таблице 1 представлены ряд величин, характеризующих близость полученного модельного распределения физическому эксперименту. Эти величины исчислены для всех семи геометрий по главным лепесткам диаграмм плотностей.

Таблица 1

у.д.	угл. дискрет, °	коэффициент асимметрии, %	коэффициент эксцесса, %	коэффициент дисперсии, %
0,5	0,82°	0,5	10,5	3,8
0,6	1,2°	0,2	51	2,7
0,7	1,0°	6,4	>100	21,6
0,8	0,9°	7,5	>100	12,5
0,9	0,3°	3,5	53	4,6
1,0	0,1°	0,6	>100	2,2
1,1	0,1°	0,3	58	3,2

Шумы малой интенсивности (см. центры диаграмм) не учитывались, поскольку их происхождение связано с фоновой загрузкой и прочими факторами; в реальных задачах эти шумы могут быть отсеяны по статистическим критериям.

По результатам, приведенным в таблице 1, хорошо видно близкое совпадение по моментам 1-го, 2-го и частично, 4-го порядков, что свидетельствует о том, что адекватность моделирования углового разрешения гамма-сканера удовлетворительная. Существенные различия в коэффициенте асимметрии и двух значениях эксцесса говорят о невыдерживании заданной плотности потока в коллимированном пучке, что связано с невозможностью на таком расстоянии сохранять в реальном эксперименте постоянную плотность потока в апертуре гамма-сканера от опыта к опыту для всех трех источников. В результате ошибок в ориентировании оси коллиматора плотность потока в реальном эксперименте меняется от опыта к опыту, что и приводит к изменению счетностей (эквивалентному искажению формы) в центральных каналах лепестка. Это же видно и на рис.4-7.

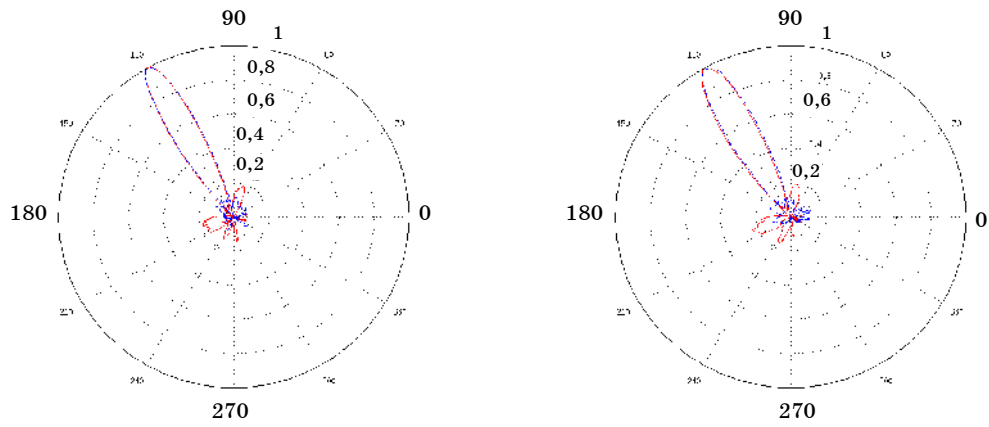


Рисунок 4 – Совмещенные модельная и экспериментальная угловые диаграммы плотности потока в окне бария-133 на расстоянии между источниками 0,5 угловых дискрет (0,29 м слева) и 0,6 угловых дискрет (0,35 м слева)

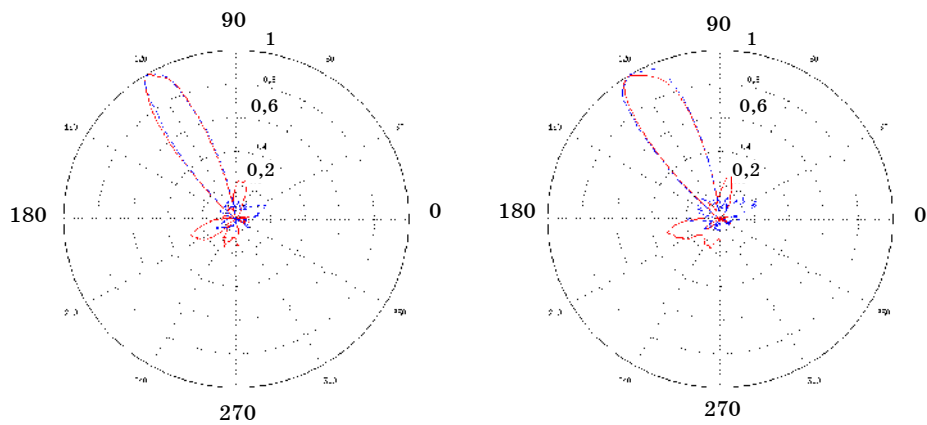


Рисунок 5 – Диаграммы плотности потока в окне бария-133 на расстоянии 0,7 угловых дискрет (0,41 м слева) и 0,8 угловых дискрет (0,47 м справа)

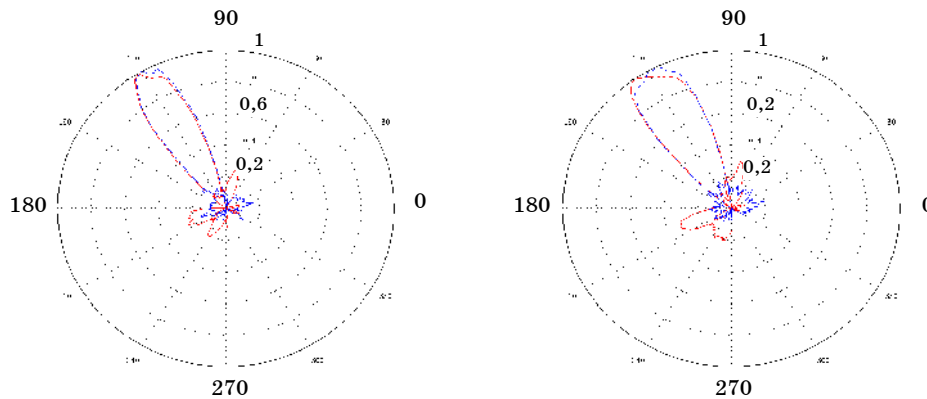


Рисунок 6 – Диаграммы плотности потока в окне бария-133 на расстоянии 0,9 угловых дискрет (0,53 м слева) и 1,0 угловых дискрет (0,59 м справа)

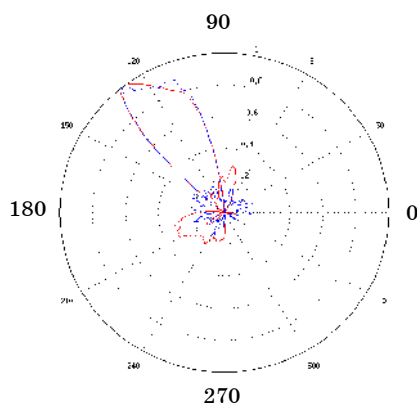


Рисунок 7 – Диаграммы плотности потока в окне бария-133 на расстоянии 1,1 угловых дискрет (0,66 м)

ВЫВОДЫ

Разработана программно математическая имитационная модель гамма-сканера кругового обзора. Результаты сравнения реальных экспериментов с модельными позволяют сделать следующие заключения:

- имитационная модель удовлетворительно моделирует получение тенеграммы от источников и близко описывает угловое разрешение кодированной апертуры;
- имеющиеся отклонения модели от эксперимента вызваны конструктивной невозможностью коллиматора обеспечить на таком расстоянии точное повторение плотности потока в нескольких опытах;
- полученная модель с учетом указанных замечаний позволяет проводить дальнейшую серию экспериментов, направленных на исследование возможности разделения единичных и протяженных источников, а также разделять наложения источников в поле зрения;
- при проведении реальных экспериментов необходимо усовершенствовать конструкцию коллиматора с тем, чтобы обеспечивать стабильную ориентацию и плотность потока на значительных расстояниях от точки измерения.

SUMMARY

THE SIMULATION OF ANGULAR RESOLUTION FOR ALL-ROUND SURVEILLANCE GAMMA-SCANNER WITH CODING MASK

P.Yu. Voylov,
SRDCI "Iskra", Lugansk

In the article there is reviewed a software simulation of the gamma-scanner – a measurement device developed to reconstruct 2D images of the ionizing radiation sources. The comparison of the software modeling and the real experiments is done, and the received images compared, using the modified correlation method for reconstruction. Errors for primary statistical moments are used as the measures of similarity.

Keywords: gamma-scanner, encoded aperture, simulation modeling, radiation measurements, radiation monitoring

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Плехотник В.Ю. «Гониометр» - гамма-сканер кругового обзора с кодирующей маской / В.Ю. Плехотник, А.В. Кочергин // Вспомогательный журнал ВСУ м. В.Даля. – 2008. - 9(127), Ч.1. - С.162-166.
2. Портюемые библиотеки C++ Boost [Электронный ресурс]. – Электронные текстовые данные (24067 bytes). –Режим доступа: <http://www.boost.org> Friday, 26 March 2010 14:11:42

3. Інструментарій для імітації проходження частиц через вещество Geant4 [Електронний ресурс]. – Електронні текстові дані (7065 bytes). – Режим доступу: <http://geant4.web.cern.ch/geant4> Friday, 26 March 2010 14:14:22
4. Математическая модель процесса взаимодействия γ -излучения с веществом. Реализация в среде GEANT 4 / П.Ю. Войлов, А.В. Калужный // Сборник тезисов докладов, VII Международная научно-техническая конференция «Приладобудування 2008: стан перспективи», Київ, 2008. - С.212.
5. Математическая модель процесса сцинтилляции в неорганических кристаллах / П.Ю. Войлов; ИДПК «Скра». – Луганськ, 2009. – 9с.: л. – Бібліогр.: 3 назв. – Укр. – Деп. в ДНТБ України. 12.10.09, 78-Ук'2009
6. Ярощук Е.Г. Спектрометрия источников гамма-излучения при помощи систем визуализации на основе кодированных апертур / Е.Г. Ярощук // Вестник СевНТУ. Серия «Физика, математика». – 2009. - №99. - С.100-105.

Поступила в редакцию 2 июня 2010 г.