

УДК 539.16.07, 539.122.164.074.3, 539.121.6/.7.07

Е.Г. Ярощук

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ АКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕННОГО
ИСТОЧНИКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГАММА-СКАНЕРА КРУГОВОГО ОБЗОРА**

Анотація. Запропонована методика оцінки активності при виявленні джерела гама-випромінювання в польових умовах з використанням гама-сканера кругового огляду. Розроблений алгоритм точкової оцінки активності джерела по зареєстрованому спектру з напрямку, проводилося дослідження теоретичних та методичних передумов до формування інтервальної оцінки.

Введение

Долгое время системы визуализации гамма-излучения на базе кодированных апертур использовались в астрономии в качестве гамма-телескопов, однако в последнее время за счет разработки новых методов и технических средств они получили широкое распространение для решения задач экологического мониторинга, обнаружения и идентификации источников ионизирующего излучения (ИИИ). Одним из таких приборов, является гамма-сканер кругового обзора, разработанный в НИПКИ «Искра» [1]. Он может применяться в составе автоматизированных систем контроля радиоэкологической безопасности для обследования окружающей среды на предмет ИИИ. С помощью этого прибора можно обнаружить, локализовать и идентифицировать радионуклидный состав обнаруженных источников, а также посчитать активности найденных источников. В результате по полученной информации можно составить двумерную карту местности с нанесенными на нее источниками и дозными полями. Поскольку обнаружение и локализация источника производится по данным с нескольких точек измерений, в каждом из которых заложены ошибки позиционирования, различная фоновая загрузка регистрируемого спектра, и возможные преграды между источником и прибором, создают ситуации, когда регистрируемая плотность потока от источника не соответствует условию проведения эксперимента(при

© Ярощук Е.Г., 2010

одном и том же расстоянии между источником и прибором получается разная плотность потока), что в свою очередь ведет к погрешностям в результатах определения местоположения источника и его активности. Вследствие чего, в частности, возникает задача оценки достоверности результатов определения активности обнаруженного источника.

Целью данной статьи является разработка методики оценки активности локализованного на местности источника с помощью гамма - сканера кругового обзора. Для достижения этой цели решаются следующие задачи: формирование алгоритма точечной оценки активности источника по зарегистрированному спектру с направления, исследование теоретических и методических предпосылок к формированию интервальной оценки.

Методика оценки активности гамма - сканером кругового обзора

Алгоритм точечной оценки активности источника

Гамма-сканер конструктивно представляет собой единичный детектор с кристаллом CsI(Tl) размером 50×100 мм и постоянно вращающуюся свинцовую круговую маску состоящих из $m = 31$ элемента, часть которых свободно пропускает гамма-кванты (открытые элементы), а остальная поглощает (закрытые элементы). Данный прибор работает в диапазоне энергий от 0 до 3 МэВ. Прибор позволяет получать круговую диаграмму направленностей плотностей потока гамма-излучения, по которым можно определить направление на источник, а по спектру с выбранного направления идентифицировать радионуклидный состав источника ионизирующего излучения. Истинное угловое разрешение данного прибора, при котором два рядом стоящих точечных источника можно четко различить составляет $360/31=11.6$, при этом результатом работы прибора является матрица спектров в положениях маски размерностью 31×1024, где 31-количество позиций маски, а 1024 — количество энергетических каналов. Однако вследствие постоянства вращения маски можно увеличить количество позиций маски за счет уменьшения времени экспозиции детектора при формировании очередного спектра позиций, в результате чего угловое разрешение прибора может быть несколько улучшено. При работе с гониометром может быть использована дискретизация с коэффициентом $k =$

1,3,5,7, соответственно результатом работы будет матрица спектров позиций размерностью $k \times 31 \times 1024$ [2].

Расчет активности источника и ее оценка производится после выполнения операций по обнаружению, идентификации и локализации источника (определение координат источника при известной привязке гамма - сканера к местности).

Обнаружение источника производится следующим образом: по окончании проведения сканером замера фона получаем матрицу спектров позиций, после чего необходимо выполнить восстановление углового распределения плотностей потока гамма-излучения, для этого выбирается диапазон каналов(энергий), для которых будет производиться восстановление распределения и рассчитывается матрица счетности P , элементы которой представляют собой сумму чисел событий, зарегистрированных детектором за время наблюдения в выбранном для измерений энергетическом диапазоне для каждой позиции маски. При этом следует отметить, что каждый элемент матрицы счетности представляет собой корреляцию функции O распределения источников гамма-излучения в поле зрения с функцией маски M и счета событий фона, не зависящего от источников:

$$P = O \otimes M + B \quad (1)$$

Затем для восстановления распределения источников производится операция корреляции по формуле[3]:

$$O_j^* = \sum_{j=0}^{k \cdot m - 1} \sum_i^{m-1} P_{(i * k + k * m - j) \bmod k \cdot m} \cdot G_i \quad (2)$$

Здесь O_j^* – элемент матрицы восстановленного пространственного распределения источников гамма-излучения,

P_i – элемент матрицы счетов событий, зарегистрированных детектором,

G – элемент матрицы обработки. Матрица G определяется соответствующим образом, исходя из выбранной кодирующей последовательности и размера маски [3].

Далее определяется с.к.о. восстановленного углового распределения плотностей потоков гамма - квантов, как корень квадратный из матрицы счетности P :

$$\sigma^{*2} = \sum_{k=0}^{N-1} P_k \quad (3)$$

После расчета с.к.о. производим поиск источников. Источниками считаются участки массива плотностей потока, удовлетворяющих следующим требованиям: максимальная плотность потока источника должна быть не ниже уровня “пяти сигм” (поскольку начиная с этого уровня мы имеем возможность восстановить спектр с направления и оценив его форму, идентифицировать нуклид; при обнаружении источника на уровне ниже “пяти сигм” восстановленный спектр представляет собой флуктуацию шумов на уровне, которых невозможно определить принадлежность спектра), ширина распределения плотностей потока от предполагаемого точечного источника должна в допустимых пределах соответствовать ширине распределения идеального точечного источника аппаратурной функции [4,5].

После того как источник обнаружен, производится восстановление суммарного спектра для диапазона направлений, в которых он был зафиксирован. Расчет спектра d_i -го направления выполняется по следующей формуле [3]:

$$S_j^{(d_i)} = \sum_{j=0}^{1023} \sum_i^{m-1} P_{(i*k+k*m-d_i) \bmod k \cdot m} \cdot G_i \quad (4)$$

где d_i – индексы выбранного направления;

$S_j^{(d_i)}$ – количество зарегистрированных событий в j -ом спектральном канале от направления с индексом d_i ;

j – индекс спектрального канала, пробегающий значения по всему спектральному окну регистрации;

m – размеры основной последовательности кодирующего массива;

G – обрабатываемый массив, применяемый при получении углового распределения плотностей потока;

P – матрица счетности, для всего диапазона энергетических каналов.

По полученному спектру с направления выполняется операция идентификации, заключающаяся в определении соответствия данного спектра к одному или нескольким известным спектрам из библиотеки нуклидов. Зачастую, уже на стадии выбора энергетического диапазона для расчета матрицы счетности формируется диапазон поиска определенных нуклидов. Что в дальнейшем упрощает идентификацию спектра.

После выполнения операций обнаружения и идентификации мы имеем следующую информацию, которая может быть

использована для определения координат источника и расчета активности: направление на источник, плотность потока от источника и его нуклидный состав.

Вслед за идентификацией источника, в случае, если его местоположение известно и известны координаты прибора(то есть либо известно расстояние между источником и гамма - сканером либо его можно вычислить), можно вычислить активность источника по следующим двум формулам: первая определяет активность по пикам полного поглощения, а вторая по полному спектру нуклида.

$$Aq = \frac{N_{\text{php}}}{\sum_{i=0}^{n-1} (P(E_i) \cdot e^{-(\mu_{\text{air}}(E_i) \cdot L)} \cdot T \cdot 0.5 \cdot (1 + e^{-(\mu_{\text{Pb}}(E_i) \cdot a)}) \cdot \varepsilon_{\text{php}}(E_i) \cdot H \cdot D / (4 \cdot \pi \cdot L^2))} \quad (5)$$

$$Aq = \frac{N_{\text{full}}}{\sum_{i=0}^{n-1} (P(E_i) \cdot e^{-(\mu_{\text{air}}(E_i) \cdot L)} \cdot T \cdot 0.5 \cdot (1 + e^{-(\mu_{\text{Pb}}(E_i) \cdot a)}) \cdot \varepsilon_{\text{full}}(E_i) \cdot H \cdot D / (4 \cdot \pi \cdot L^2))} \quad (6)$$

где Aq – активность;

N_{php} – сумма событий в фотопиках нуклида;

N_{full} – сумма событий в полном спектре нуклида;

E_i – энергетическая линия нуклида;

$P(E_i)$ – вероятность вылета гамма - кванта с энергией E ;

$\mu_{\text{air}}(E_i)$ – коэффициент ослабления в воздухе гамма - кванта с энергией E ;

$\mu_{\text{Pb}}(E_i)$ – коэффициент ослабления в свинце гамма - кванта с энергией E ;

$\varepsilon_{\text{php}}(E_i)$ – усредненная эффективность регистрации в фотопике с энергией E ;

$\varepsilon_{\text{full}}(E_i)$ – эффективность регистрации в полном спектре нуклида;

T – время накопления данных;

L – расстояние между источником и гамма - сканером;

a – толщина элемента маски;

H – высота кристалла;

D – диаметр кристалла.

Интервальная оценка активности источника

Если же местоположение найденного источника не известно, то есть производится поиск источников на местности, тогда для

определения местоположения источника необходимо провести минимум еще один опыт, но в другой точке с целью обнаружения источника под другим углом относительно сканера, чтобы по пересечению известных направлений на источник определить его координаты. Дополнительные опыты позволяют лишь уточнить его местоположение и спектрометрические характеристики. Поскольку каждая пара направлений рождает свою точку координат источника, то производится уточнение значений координат либо простым усреднением, либо усреднением, с учетом степени доверия к полученным данным, учитывающие в качестве весовых коэффициентов существующие погрешности при проведении замера спектрометрических данных в каждой точке (ошибки позиционирования прибора на местности: определения координат и углового направления; учет статистической обеспеченности спектрометрических данных об источнике, учет углового разрешения прибора и т.д.) [6]. Аналогичная ситуация возникает и с расчетом активности. В случае нескольких экспериментов, каждая координата, образованная пересечением двух направлений на источник, рождает для каждой точки опыта свое значение активности и усредненное значение можно рассчитывать, как простым усреднением, так и с учетом весовых коэффициентов. Естественно, значение рассчитанной активности сильно зависит от времени и количества замеров, от преград, лежащих на линии между источником и прибором, которые влияют на статистику спектрометрических данных, от работы аппаратуры при различных условиях эксплуатации, от ошибок позиционирования и расчета координат источника. В связи с этим, определение аналитической зависимости между значением активности и всеми значимыми аппаратурными, субъективными и методологическими погрешностями представляют большую сложность, вместо этого целесообразней оценивать значение активности некоторым доверительным интервалом для заданной вероятности. Ширина доверительного интервала сильно зависит от количества данных в выборке результатов опытов, однако на практике количество экспериментов мало и сделаны они в разных условиях, что в случае существования преград в некоторых опытах между прибором и источником, не позволит использовать рассчитанные значения активности для определения доверительного

интервала, поскольку эти данные в разных случаях будут подчиняться разным законам распределения. По этим причинам целесообразней всего пользоваться следующим способом определения доверительного интервала: для каждого значения активности, рассчитанного по спектрометрическим данным эксперимента с использованием расстояния между точкой позиционирования прибора и вычисленными координатами источника, образованными каждой парой пересечений направлений на источник, рассчитывать свой доверительный интервал, а результирующий интервал всех значений активности находить пересечением полученных интервалов. Поскольку в таком случае в выборке будет находиться лишь одно значение активности, то подсчитать матожидание и с.к.о. выборки не представляется возможным, однако выходом из этой ситуации будет построение доверительного интервала для неизвестного среднего, которое в данном случае будем считать приближенным к истинному значению активности источника.

Интервальная оценка активности источника равна:

$$\beta = p(X - \varepsilon \leq \mu \leq X + \varepsilon) \quad (7)$$

β – заданная вероятность

X – рассчитанное значение активности

μ – мат. ожидание выборки

σ – с.к.о. выборки значений активности полученные при одинаковых условиях

ε – значение, задающее границы доверительного интервала, где

ε находим из соотношения $\beta = 2 \times \Phi(\varepsilon/\sigma)$, $\varepsilon = n \times \sigma$

Однако остается неизвестным значение σ . По всей видимости выборка значений активности полученная при многократном повторении экспериментов с одинаковой геометрией (одинаковым временем накопления данных, одинаковым взаимным расположением источника и гамма - сканера, одинаковой фоновой загрузкой спектра) будет подчинена нормальному закону распределения. Поскольку в реальных условиях большое количество опытов накопить затруднительно, расчет σ в явном виде не возможен; в этом случае можно использовать известную зависимость между неким параметром статистической обеспеченности источника и σ выборки.

В качестве параметра статистической обеспеченности источника может использоваться максимальное количество σ^* – с.к.о.

источника в восстановленном распределения плотностей потока гамма-квантов с направления $n(\sigma^*)$ (1).

$$n = \frac{N}{\sigma^*} \quad (8)$$

где N – плотность потока источника за время эксперимента.

Таким образом, на практике, для получения интервальной оценки, необходимо определить вид связи этих двух величин и построить регрессионную модель.

Экспериментальные исследования

Для доказательства гипотезы о нормальности распределения значений активности источника при проведении замеров спектра с одинаковой геометрией была проведена серия экспериментов по обнаружению, идентификации и расчету активности точечного источника Cs137 активностью 34105 Бк. Эксперименты проводились в закрытом помещении при известном относительно постоянном естественном фоне, источник располагался от прибора на расстоянии 1.5м при постоянном взаимном положении, время экспозиции источника в каждом опыте составляло 120с, всего было проведено 150 опытов. По полученным данным были рассчитаны значения активности для каждого опыта. Выборка значений активностей размером 150 элементов была проверена на подчинение нормальному закону распределения с использованием критерия согласия χ^2 Пирсона. В итоге было получено соответствие распределения экспериментальной выборки нормальному закону на уровне 96%.

Для установления зависимости между σ выборки серии опытов сделанных при одинаковых условиях и статистической обеспеченностью источника были проведены серии экспериментов в трех точках 1.5м, 2.5м, 3.5м относительно гамма - сканера с разным временем накопления экспериментальных данных: 120с, 300с, 600с, 900с, 1200с, 1800с. Таким образом, с изменением расстояния и времени экспозиции, изменялась статистика счетов гамма - квантов источника. Для каждой геометрии проводилось от 10 до 15 опытов. Затем рассчитывались активности и n для каждого опыта. Для каждой серии экспериментов с одинаковой геометрией рассчитывались σ и среднее значение n . Для установления существования связи между n и σ был рассчитан коэффициент корреляции $R_{n\sigma} = -0.82$, что свидетельствует о наличии обратно пропорциональной связи. Затем была построена регрессионная модель

определяющая аналитическую зависимость двух величин для чего

была выбрана обратно пропорциональная функция вида $f(x) = \frac{a \times x^m}{b + x^n}$ с рассчитанными с помощью алгоритма оптимизации Левенберга — Марквардта коэффициентами: $a = 2.56 \times 10^5$ и $b = -0.047$, $m = 0$, $n = 1$ (рис. 1).

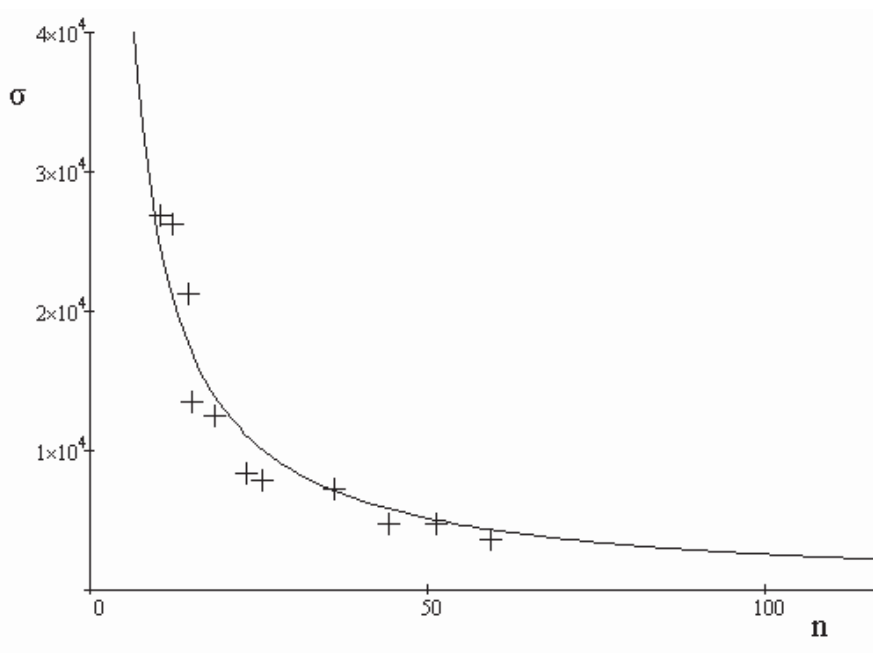


Рисунок 1 - Функция $\sigma = f(n)$

Выводы

В данной статье предложена методика оценки активности радиоактивного источника, обнаруженного с помощью гамма-сканера кругового обзора, при проведении нескольких замеров спектра в различных условиях (различное время экспозиции, различное взаимное положение источника и измерительного прибора, неоднородность спектра фона). Показано, что распределение значений активности, полученных при проведении серии экспериментов с одинаковой геометрией, подчиняется нормальному закону. Определены необходимые параметры для расчета доверительного интервала, найдена зависимость с.к.о. измеряемой активности σ от статистической обеспеченности источника n . В экспериментальной части получена зависимость между n и σ для изотопа Cs137.

Данная методика может быть использована в автоматизированных системах контроля радиозоологической безопасности. В дальнейшем планируется апробация данной методики и на других изотопах в полевых условиях в задаче обнаружения, идентификации и определения активности обнаруженных источников гамма-излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плахотник В.Ю. "ГОНИОМЕТР" - гамма-сканер кругового обзора с кодирующей маской / Плахотник В.Ю., Кочергин А.В. – К.: ПБФ, НТУУ "КПИ" – 2008. – 264 с., с.166 – 167. – (Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції "Приладобудування: стан і перспективи", 22-23 квітня 2008 р.)
2. Плахотник В.Ю. Угловое разрешение гамма-сканера кругового обзора с кодирующей маской./ Плахотник В.Ю., Ярощук Е.Г. – Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Вип. 5/2008 (52). Частина 2. с. 32-34
3. Ярощук Е.Г. Спектрометрия источников гамма-излучения при помощи систем визуализации на основе кодированных апертур / Е.Г. Ярощук // «Вестник СевНТУ», серия «Физика, математика», вып. №99, с.100-105.
4. Плахотник В.Ю. Критерий принятия решения для системы с кодированной апертурой / Плахотник В.Ю.; НИПКИ «Искра». - Луганск, 2007. – 9 с.: ил. - Библиогр.: 8 назв. – Рус.. - Деп. в ГНТБ Украины 17.09.07, №90 – Ук 2007.
5. Ярощук Е.Г. Исследование статистики сигнала гамма-сканера с круговой кодирующей маской / Е.Г. Ярощук // ВНУ (электрон. издание) - №5Е/2009.
6. Ярощук Е.Г. Методика локализации источников гамма излучения на местности с использованием приборов с кодированными апертурами / Ярощук Е.Г.; НИПКИ «Искра», - Луганск , 2008 – 10с. – Библиогр.: 3 назв. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 12.05.08, № 56 – Ук. 2008.

Получено 20.04.2010г.