

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ МЕТОДА ПОПАРНОГО КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В. Т. МИНЛИГАРЕЕВ

32 Государственный научно-исследовательский испытательный институт
МО РФ, Мытищи, Россия, e-mail: 32gnii@mail.ru

Рассмотрен вопрос экспериментальной проверки комплексирования технических средств обнаружения источников ионизирующих излучений при возникновении необходимости анализа измерительной информации параметров полей различной физической природы.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, попарное комплексирование, эксперимент, обнаружение источников.

The question of experimental verification of the aggregation of technical means of detecting sources of ionizing radiation, when the need arises analysis of measurement data field parameters of various physical nature.

Key words: ionizing radiation, pair aggregation, experiment, identify the source.

В настоящее время важной является новая измерительная задача радиационного контроля смешанных радиационных полей. Как отмечалось в [1 – 6], с ростом и совершенствованием высокотехнологичных производств актуальней становится проблема поиска, обнаружения, локализации и идентификации источников ионизирующих излучений (ИИИ) в промышленности, медицине, криминалистике, радиационном мониторинге окружающей среды и др.

Для повышения точности и достоверности измерения параметров комбинированных ИИИ, обладающих двумя и более видами излучений, целесообразно проводить обнаружение по нескольким идентифицирующим признакам. В целях обеспечения заданных требований к вероят-

ности обнаружения ИИИ измеряют число импульсов по двум каналам – гамма (N_y) и нейтронному (N_x), обладающим разными спектральными диапазонами, с последующей совместной обработкой информации. Такой подход назван методом попарного комплексирования радиометрических средств обнаружения ИИИ [1 – 3].

Известно, что функция плотности вероятности системы двух случайных величин – нейтронов x и гамма-квантов y – описывается двумерным нормальным законом распределения [1 – 5, 7, 8] при определении значений характеристик типа:

«сигнал»

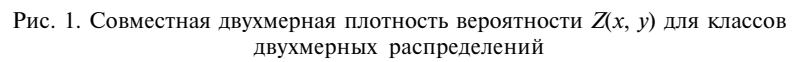
$$Z(x_1, y_1) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_1}\sigma_{y_1}\sqrt{1-r_{11}^2}} \times \left\{ -\frac{1}{2\sqrt{1-r_{11}^2}} \left[\frac{(x-m_{x_1})^2}{\sigma_{x_1}^2} - \frac{2r_{11}(x-m_{x_1})(y-m_{y_1})}{\sigma_{x_1}\sigma_{y_1}} + \frac{(y-m_{y_1})^2}{\sigma_{y_1}^2} \right] \right\}; \quad (1)$$

«фон»

$$Z(x_2, y_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_2}\sigma_{y_2}\sqrt{1-r_{22}^2}} \times \left\{ -\frac{1}{2\sqrt{1-r_{22}^2}} \left[\frac{(x-m_{x_2})^2}{\sigma_{x_2}^2} - \frac{2r_{22}(x-m_{x_2})(y-m_{y_2})}{\sigma_{x_2}\sigma_{y_2}} + \frac{(y-m_{y_2})^2}{\sigma_{y_2}^2} \right] \right\}; \quad (2)$$

где $m_{x_1}, m_{x_2}, m_{y_1}, m_{y_2}$ – математические ожидания; $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{y_1}, \sigma_{y_2}$ – средние квадратические отклонения (СКО); r_{11}, r_{22} – коэффициенты корреляции случайных величин «сигнала» и «фона», соответственно.

В геометрической интерпретации совместная двумерная плотность вероятности $Z(x, y)$ выражений (1), (2) представляет собой холмообразную поверхность, вершина которой находится над точкой (m_x, m_y) плоскости XOY (рис. 1) [1 – 3, 7, 8]. Известно, что сечение поверхности $Z(x, y)$ плоскостью, параллельной XOY , представляет собой эллипс. Уравнения эллипсов равной плотности вероятности с одинаковыми вероятностями попаданий в них точек с координатами (x_i, y_i) для


$$(x - m_{x1})^2 \sigma_{y1}^2 + (y - m_{y1})^2 \sigma_{x1}^2 = K^2 \sigma_{x1}^2 \sigma_{y1}^2; \quad (3)$$

Геометрическая интерпретация сечения холмообразных поверхностей представлена на рис. 2; взаимная ориентация эллипсов соответствует некоррелированным, а значит, – и независимым для принятого нор-

Рис. 2. Взаимное положение эллипсов классов «фон» и «сигнал»

мального распределения измерениям параметров полей сигнала и фона [4, 5].

Функция $F(x, y)=0$ делит плоскость XOY на две области, в которых преобладают результаты измерений, принадлежащих классам «сигнал» и «фон». Максимальная вероятность ошибки различения излучения источника и фона (вероятность неопадания сигнала ИИИ за пределы эллипса) при $r_{22}=0$ определяется по формуле [1, 7]:

$$P_{\text{ош}} = \exp(-K^2/2). \quad (5)$$

Вероятностной мерой информативности (критерием информативности) пары сигналов (x, y) от двух видов излучений целесообразно считать то наименьшее значение коэффициента K , при котором постоянно расширяющиеся по главным осям (в K раз) гомотетичные эллипсы, заданные уравнениями (3), (4), коснутся друг друга [1, 2].

Был поставлен эксперимент с целью проверки применимости метода попарного комплексирования. Измерения значений характеристик гамма-нейтронных полей классов «фон» и «сигнал» проводили на вторичном эталоне плотности потока нейтронов на расстояниях 1,5 – 5 м и в помещениях, где располагался эталон, на расстояниях 10 – 13 м до ИИИ при времени экспозиции $T_{\text{э}} = 10 \dots 200$ с. Естественный гамма-нейтронный фон измеряли в помещениях и на открытом пространстве. Объектом обнаружения служил ИИИ ^{252}Cf типа ИНК-4, средством измерений – гамма-нейтронный радиометр СРПС22, его чувствительность к нейтронам (по изотопу ^{252}Cf) 10^{-3} имп·м²/нейтр., к гамма-квантам (по изотопу ^{137}Cs) 10^3 имп·с на 1 мкЗв/ч [5].

Экспериментальные исследования были проведены в два этапа. Первый этап состоял в определении границ и условий применения метода попарного комплексирования [4, 5]. На втором этапе оценивали преимущество двумерного обнаружения ИИИ (методом попарного комплексирования) по отношению к одномерному.

По результатам, полученным на первом этапе, сделан вывод о возможности аппроксимации закона Пуассона нормальным законом распределения интегрального счета импульсов для нейтронных сигналов при времени экспозиции $T_{\text{э}} \geq 100$ с и для измерения гамма-сигналов при $T_{\text{э}} \geq 10$ с применительно к ИИИ ^{252}Cf . Также показано, что на практике фоновая составляющая может быть нестабильной (в помещении и на открытом пространстве) и неблагоприятной (при превышении

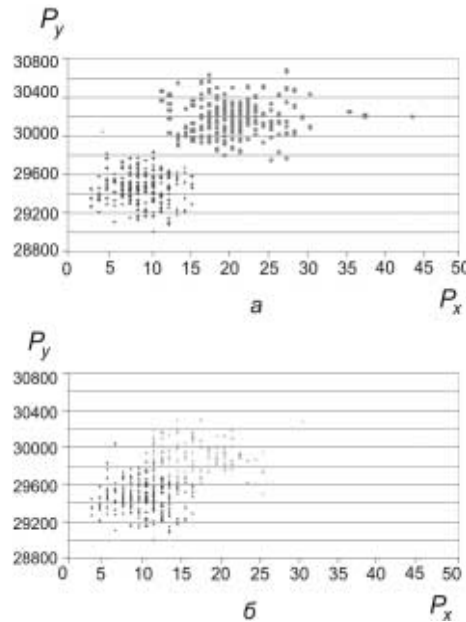


Рис. 3. Положение эллипсов классов «фон» и «сигнал» гамма-нейтронных импульсов от ИНК-4 при $T_g=100$ с на расстоянии R 10 м (а) и 13 м (б)

гамма-составляющей фона значения $0,25$ мкЗв/ч), что может существенно искажать результаты обнаружения ИИИ [4, 5].

После проведения второго этапа эксперимента были получены выборки результатов измерений характеристик нейтронного и гамма-полей классов «сигнал» (N_{x1}, N_{y1}) и «фон» (N_{x2}, N_{y2}). Были подтверждены наличие эллипсов рассеивания этих классов (см. рис. 2) и факт их касания при слабом сигнале источника – превышении сигнала над фоном в $1,1 - 1,3$ раза (рис. 3). На рис. 4 представлены результаты обнаружения ИИИ, заметны характерные разделения и смешивания сигнала и фона. Чем слабее сигнал и больше его слияние с фоном, тем больше вероятность пропуска источника $P_{\text{ош}}$.

Далее были рассчитаны показатели качества двумерного обнаружения (вероятность пропуска $P_{\text{ош}}$ по обоим каналам) по (5) и одномерного обнаружения (вероятности пропуска по нейтронному P_x и гамма-каналам P_y):

$$P_x = \int_{-\infty}^{N_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{x1}}} \exp\left[-\frac{(x - m_{x1})^2}{2\sigma_{x1}^2}\right] dx; \quad (6)$$

$$P_y = \int_{-\infty}^{N_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{y1}}} \exp\left[-\frac{(y - m_{y1})^2}{2\sigma_{y1}^2}\right] dy, \quad (7)$$

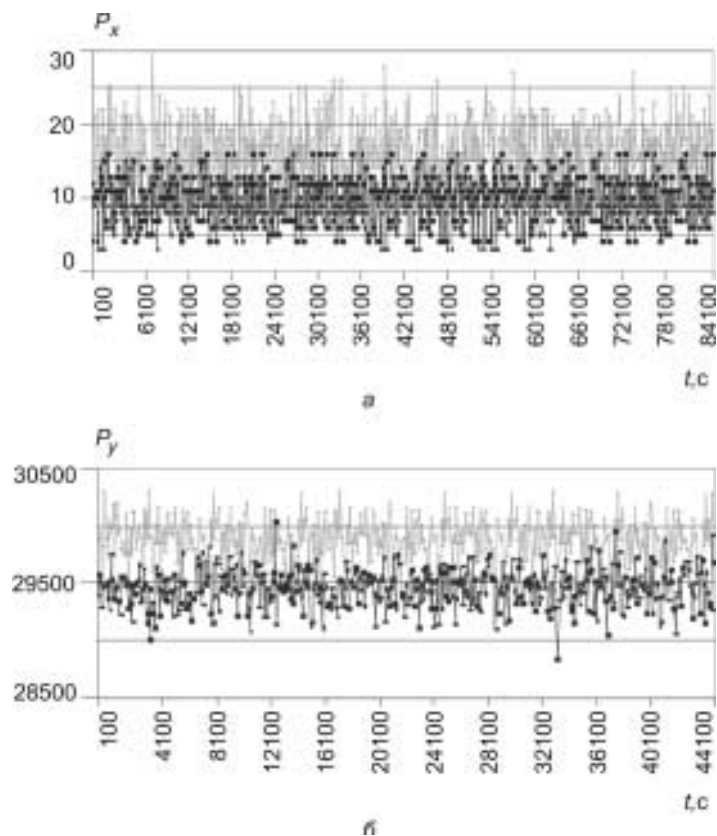


Рис. 4. Обнаружение ИНК-4 на расстоянии $R = 13$ м при $T_{\text{с}} = 100$ с по нейтронному и гамма-каналам, соответственно а, б

где N_0 – порог обнаружения для нейтронного и гамма-каналов, равный соответственно

$$N_0 = N_{0x} + \Psi_{1-P_{\text{л.т}}} \sqrt{N_{0x}}; \quad (8)$$

$$N_0 = N_{0y} + \Psi_{1-P_{\text{л.т}}} \sqrt{N_{0y}}, \quad (9)$$

$\Psi_{1-P_{\text{л.т}}}$ – квантиль порядка $(1 - P_{\text{л.т}})$ стандартного нормального распределения; $P_{\text{л.т}}$ – вероятность ложной тревоги.

Результаты расчета P_x , P_y , $P_{\text{ош}}$ представлены в таблице и на гистограмме (рис. 5), откуда следует преимущество исследуемого метода попарного комплексирования над одномерным обнаружением. Так, вероятность пропуска двухмерного сигнала $P_{\text{ош}}$ в среднем в 4 – 10 раз ниже вероятности пропуска при обнаружении отдельно по нейтронному и гамма-каналам – P_x и P_y , соответственно.

Результаты расчета показателей качества одномерного P_x , P_y и двухмерного $P_{\text{ош}}$ обнаружения ИИИ

x	y	K	$P_{\text{ош}}$	P_x	$P_x / P_{\text{ош}}$	P_y	$P_y / P_{\text{ош}}$
27	30150	2,967	0,012	0,042	3,5	0,141	11,7
18	30182	2,456	0,049	0,500	10,2	0,104	2,1
21	30196	2,67	0,028	0,256	9,1	0,09	3,2
18	30229	2,574	0,036	0,5	13,9	0,063	1,7
22	30248	2,852	0,017	0,197	11,6	0,051	3,0
18	30229	2,574	0,036	0,500	13,9	0,063	1,7
15	30284	2,570	0,037	0,781	21,1	0,032	0,9
17	30390	2,942	0,013	0,596	45,8	0,007	0,5
30	30198	3,261	0,005	0,014	2,8	0,088	18
18	30160	2,401	0,050	0,500	8,9	0,128	2,3
23	30191	2,785	0,021	0,149	7,1	0,095	4,5
25	30214	2,964	0,012	0,081	6,7	0,074	6,1
24	30308	3,110	0,008	0,110	13,8	0,024	3,0
23	30379	3,219	0,006	0,149	26,6	0,009	1,5
21	30346	3,029	0,010	0,256	25,6	0,014	1,4

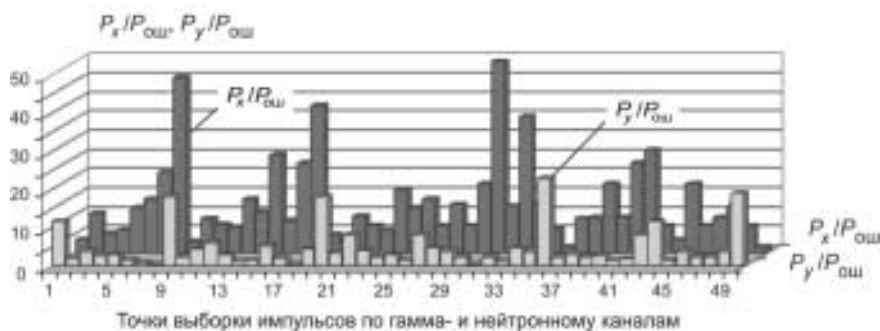


Рис. 5. Гистограмма отношения вероятностей пропуска по нейтронному и гамма-каналам (одномерное обнаружение) к двухмерному обнаружению источников ионизирующих излучений

Экспериментальная проверка метода попарного комплексирования позволила сформулировать идею комплексирования трех и более средств обнаружения ИИИ. В перспективе представляется возможным объединение двух уже рассмотренных методов: гамма-нейтронного радиометрического и, например, радиометрического методов обнаружения β -частиц или теплового метода обнаружения уже в качестве многомерного комплексирования средств обнаружения [6]. Необходимое условие реализации такого объединения – результаты предварительных фоновых измерений по каждому методу обнаружения. Все методы считают независимыми. Результат каждого измерения выражается количественно, например, числом частиц, квантов, зарегистрированных за установленное время наблюдения.

Для комплексирования трех методов обнаружения по трем осям откладывают математические ожидания: числа нейтронов фона m_{2x} (по оси X); гамма-квантов фона m_{2y} (по оси Y); числа фоновых β -частиц m_{2z} (по оси Z). Все распределения зарегистрированных частиц считают пуассоновскими. По результатам измерений излучения фона строят уравнение эллипсоида в декартовой системе координат (рис. 6).

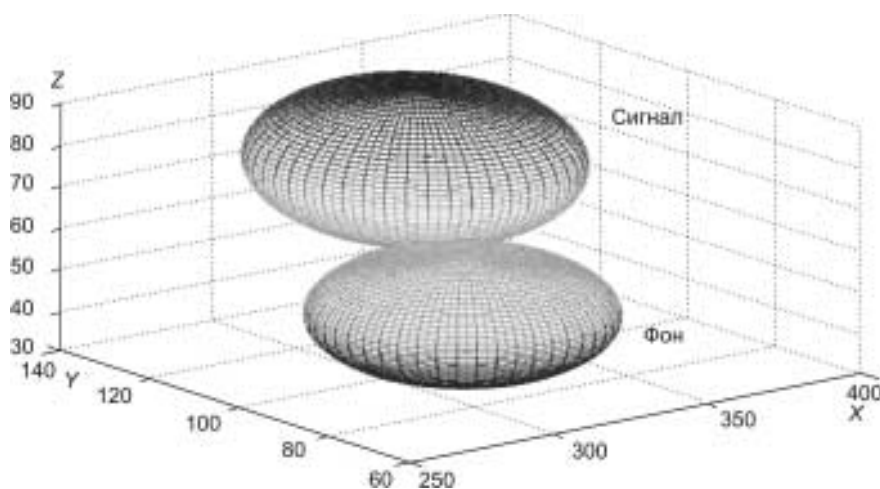


Рис. 6. Взаимное положение эллипсоидов классов «фон» и «сигнал» для трехмерных распределений

Решение об обнаружении ИИИ принимают в случае, если результат измерения в режиме обнаружения x_p, y_p, z_p выйдет за пределы эллипсоида фона.

Таким образом, представлены результаты экспериментальных исследований метода попарного комплексирования радиометрических средств обнаружения источников ионизирующих излучений; определены границы и условия применения метода; показаны преимущество двумерного обнаружения по отношению к одномерному, а также перспектива многомерного комплексирования. Последнее требует дополнительных исследований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Кириллов В. М.** Попарное комплексирование методов обнаружения источников излучений // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 68 – 73; **Kirillov V. M.** Pairwise combination of methods of detecting radiation sources // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 8. P. 913 – 921.
2. **Кириллов В. М.** Комплексирование методов обнаружения источников излучений при обеспечении информационной безопасности // Специальная техника. 2009. № 5. С. 3 – 11.
3. **Minligareev V. T., Kirillov V. M.** Experimental studies of pairwise combination of detection methods for sources of ionizing radiation // Proc. 10th Europ. conf. on non-destructive testing. Pt. 2. M., 2010. P. 179 – 180.
4. **Бачурин Д. П., Минлигареев В. Т., Яшин А. В.** Экспериментальная проверка необходимого условия применимости метода попарного комплексирования для определения параметров источников ионизирующих излучений // Метрология. 2009. № 7. С. 38 – 44.
5. **Минлигареев В. Т., Яшин А. В., Бачурин Д. П.** Экспериментальное определение границ и условий применимости метода попарного комплексирования радиометрических средств обнаружения источников ионизирующих излучений // Метрология. 2010. № 10. С. 34 – 41.
6. **Minligareev V. T., Kirillov V. M.** Complexation of three or more methods of radiant sources detection // Proc. 10th Europ. conf. on non-destructive testing. Pt. 2. M., 2010. P. 197.
7. **Онищенко А. М.** Алгоритмы работы приборов контроля качества продукции // Измерительная техника. 1992. № 11. С. 19 – 22. **Onishchenko A. M.** Algorithms for the operation of product quality control instruments // Measurement Techniques. 1992. V. 35. N 11. P. 1266 – 1269.
8. **Венцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

Дата принятия 02.12.2010 г.