

Обнаружение движущихся источников ионизирующих излучений

В. М. КИРИЛЛОВ, В. И. СУПРУНОВ

Рассмотрены основы дистанционного обнаружения неподвижных и движущихся источников ионизирующих излучений. Проанализированы основные факторы, влияющие на результат обнаружения.

При обнаружении источников ионизирующих излучений (ИИИ) могут быть реализованы как пассивные, так и активные ядерно-физические методы.

Дальность обнаружения неподвижного ИИИ, полученная на основе критерия Неймана-Пирсона, при вероятности ложной тревоги $P=10^{-3}$ [1]:

$$R_{\text{обн}} = \sqrt[4]{\frac{Y^2 \varepsilon S T}{144 \pi^2 \varphi_{\text{ф}}}}$$

где Y — интенсивность излучения ИИИ, част./с; ε — эффективность регистрации детектора, 0...1; S — площадь чувствительной поверхности детектора, см²; T — время наблюдения, с; $\varphi_{\text{ф}}$ — плотность естественного радиационного фона, см⁻²·с⁻¹.

В основе оценки лежит выражение для порога обнаружения по названному критерию [2]:

$$n_{\text{пор}} = n_{\text{ф}} + U_{1-P_{\text{л.т}}} \sqrt{n_{\text{ф}}}, \quad (1)$$

где $n_{\text{ф}}$ — количество импульсов фона на выходе детектора; $U_{1-P_{\text{л.т}}}$ — квантиль порядка $(1-P_{\text{л.т}})$ нормализованного нормального распределения.

Влияние среды при этом не учитывалось, а плотность потока излучения источника в месте расположения детектора принималась равной

$$\varphi_{\text{с}} = Y / (4\pi R^2).$$

Рассмотрим процесс обнаружения источника ионизирующих излучений в динамике, когда объект наблюдения перемещается со скоростью v по прямолинейной траектории относительно детектора, находящегося на удалении H от траектории движения ИИИ (рис. 1). Текущее расстояние между детектором и объектом

$$R = \sqrt{H^2 + (x_0 - vt)^2}.$$

Если не учитывать влияние внешней среды, то количество импульсов $n_{\text{с}}$ на выходе детектора, обусловленное излучением источника и зарегистрированное детектором за время T , определяется так:

$$n_{\text{с}} = \int_0^T \frac{Y \varepsilon S dt}{4\pi [H^2 + (x_0 - vt)^2]} = \frac{Y \varepsilon S}{2\pi v H} \arctg \frac{x_0}{H}.$$

При интегрировании считалось, что регистрация излучения начинается в точке A и заканчивается в симметричной ей точке A' , т. е. $2x_0 = vt$.

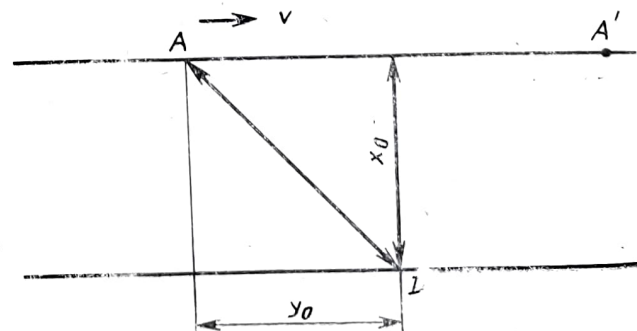


Рис. 1. Взаимное расположение детектора и источника ионизирующих излучений

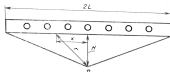


Рис. 2. Взаимное расположение детектора и источника взаимодействующих излучений

За время T количество фотонов импульсов на выходе детектора

$$n_p = \nu \Phi_0 \frac{2L}{v}$$

где $\eta = \alpha Z$ — чувствительность детектора, см².

Определим оптимальные параметры средства обнаружения, при которых обеспечивается максимум отношения K [9]:

$$K = \frac{n_p}{\nu^2 n_0} = \frac{Y}{2\pi} \sqrt{\frac{\eta}{2\Phi_0 v}} \frac{1}{H\alpha} \operatorname{arctg} \frac{x_0}{H}$$

Про дифференцируем последнее выражение по аргументу x_0 и приравняем его нулю, получим

$$\frac{dK}{dx_0} = A \left(\frac{2Z}{1+Z^2} - \operatorname{arctg} Z \right), \quad (2)$$

где

$$A = \frac{Y}{2\pi H} \sqrt{\frac{\eta}{2\Phi_0 v}} = \cos \alpha; \quad Z = \frac{x_0}{H}$$

Корень уравнения $Z \approx 1,4$, т. е. необходимо относительно зарегистрированного полезного излучения к флуктуации фона обеспечивается при условии:

$$T \geq 2,8H/v$$

С помощью полученных соотношений была оценена минимальная автономность НИИ, обнаруживаемого с $P_{\text{обн}} = 10^{-2}$:

$$Y_{\text{обн}} \approx \sqrt{\frac{v H K \Phi_0}{\eta}}$$

Рассмотрим группу точечных источников, расположенных симметрично относительно детектора вдоль одной линии на удалении H (рис. 3). Такая ситуация может возникнуть при обнаружении антивозвратной волны транспортных средств, содержащих N источников с выходом Y каждый. В первом приближении можно считать, что волнами транспортных средств представляет собой линейный источник излучения протяженностью $2L$. В этом случае детектор зарегистрирует n_0 импульсов, обусловленных излучением источника, равное без учета влияния внешней среды:

$$n_0 = 2 \int_0^L \frac{NY}{L} \operatorname{arctg} \frac{x dx}{\sqrt{x^2 + H^2}} = \frac{\sqrt{T}}{2\pi H} \operatorname{arctg} \frac{L}{H}$$

где N — количество источников излучения в волне.

С учетом условия обнаружения (1) получим

$$\frac{NY\sqrt{T}}{2\pi H L} \operatorname{arctg} \frac{L}{H} = U_{\text{обн}} P_{\text{обн}} \sqrt{v \Phi_0} Y$$

из которого можно оценить дальность обнаружения H известной волной транспортных средств длиной $2L$.

Задано несколько условий, если волна из источника излучения перемещается со скоростью v относительно детектора. В этом случае можно предположить, что волна движется, а детектор перемещается со скоростью α (см. рис. 2), причем регистрация излучения начинается в точке O и заканчивается в точке O' (на границах линейного источника). Выделим произвольный момент времени t , к которому детектор находится в точке D , пройдя расстояние vt . Тогда элементарный отрезок времени dt на выходе детектора является количеством импульсов dx , обусловленных излучением линейного источника:

$$dx dt = \frac{NYv}{4\pi L} \frac{dx dt}{H^2 + (vt - x_0)^2}$$

После интегрирования данного выражения получим общее число отсчетов полезного излучения:

$$n_p = \frac{NYv}{4\pi L} \int_0^L dt \int_0^L \frac{dx}{H^2 + (vt - x_0)^2} = \frac{NYv}{4\pi L} \frac{2}{H} \operatorname{arctg} \frac{L}{H} - \frac{1}{L} \ln \left(1 + \frac{L^2}{H^2} \right)$$

При $L \gg H$ (длина волны значительно превосходит расстояние до детектора) выражение упрощается:

$$n_p = \frac{NYv}{4\pi L} \left[\frac{\pi}{H} - \frac{2}{L} \ln \frac{L}{H} \right]$$

Воспользовавшись условием обнаружения (2) из transcendентного уравнения можно оценить дальность обнаружения движущихся волнами транспортных средств.

При исследовании параметров процесса обнаружения предполагалось, что отсутствует влияние внешней среды на пространство взаимодействующих излучений. Этим же влиянием можно считать в значительной мере для расчета количества отсчетов от излучения источника коэффициент взаимодействия $K_{\text{взаим}} = \operatorname{arctg} \frac{Z}{\sqrt{1+Z^2}}$. Σ_0 — полное микроскопическое сечение взаимодействия взаимодействующих частиц с импульсом x_0 — среднее расстояние между источником и детектором.

Таким образом, получим приближенные зависимости дальности обнаружения неподвижных и движущихся источников взаимодействующих излучений, позволяющие проанализировать влияние основных факторов на процесс обнаружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карлаев В. И. Физические основы радиационной и ядерной безопасности. — М.: МО РФ, 1993.
2. Бурьян В. И., Гаврилов В. И., Матвеев В. В. Основы теории ядерной. — М.: Атомиздат, 1977.
3. Шереметьев А. Г. Статистическая теория ядерной связи. — М.: Связь, 1979.