

УДК 621.391

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОБНАРУЖИТЕЛЯ ДВИЖУЩИХСЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

А.Е. ВИНОГРАДОВ, П.И. КОЗЕКА*, Н.Г. КУХАЛЬСКИЙ

Институт пограничной службы Республики Беларусь
Калиновского, 4, Минск, 220103, Беларусь

*Войсковая часть 01549
Бобруйская, 3, Минск, 220600, Беларусь

Поступила в редакцию 31 октября 2011

Рассмотрена методика расчета показателей качества функционирования корреляционного сейсмического обнаружителя движущихся наземных объектов в одном и нескольких элементах разрешения выборки принятого сигнала без и с учетом критерийной обработки « k из n » соответственно.

Ключевые слова: сейсмический обнаружитель, показатели качества обнаружения.

Введение

Для оценки качества функционирования обнаружителей различных технических средств охраны используются вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги. В данной работе рассмотрена методика расчета показателей качества обнаружения одноканального корреляционного сейсмического обнаружителя, структурная схема которого представлена на рис. 1.

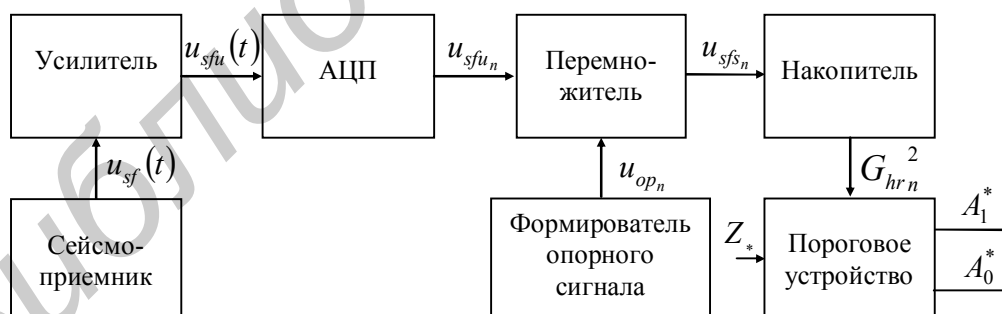


Рис. 1. Структурная схема одноканального корреляционного обнаружителя

Под воздействием сейсмической волны на выходе сейсмоприемника формируется сейсмический сигнал $u_{sf}(t)$, представляющий собой аддитивную смесь сейсмического сигнала движущегося наземного объекта и фона. С выхода сейсмоприемника сигнал поступает на вход усилителя, затем на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), с выхода которого на перемножитель и далее на когерентный накопитель. Когерентный накопитель формирует энергетический спектр принятого сигнала. Решение о наличии или отсутствии движущегося наземного объекта принимается в пороговом устройстве согласно критерию Немана-Пирсона по одному элементу разрешения по частоте и (или) по нескольким элементам разрешения по частоте выборки принятого сигнала с учетом критерийной обработки « k из n » в скользящем окне.

Методика расчета показателей качества функционирования сейсмического обнаружителя

Рассмотрим распределение комплексной амплитуды после образования квадрата модуля когерентно накопленного сигнала на примере одномерного распределения. Аналогичный подход использовался в [1, 2].

Пусть X_r и Y_m – две нормально распределенные независимые случайные величины, имеющие одинаковые дисперсии $\sigma_{x_r}^2 = \sigma_{y_m}^2 = \sigma^2$, но разные средние значения математического ожидания m_{x_r} и m_{y_m} . Найдем плотность вероятности случайной величины:

$$Z_k = X_r^2 + Y_m^2.$$

Совместная плотность вероятности случайных величин X_r и Y_m равна

$$\omega_2(X_r, Y_m) = \omega_1(X_r)\omega_1(Y_m) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(X_r - m_{x_r})^2 + (Y_m - m_{y_m})^2}{2\sigma^2}\right).$$

Перейдем от X_r и Y_m к новым переменным Z_k и φ_k :

$$X_r = \sqrt{Z_k} \cos \varphi_k, \quad Y_m = \sqrt{Z_k} \sin \varphi_k,$$

где $\varphi_k = (-\pi, \pi)$.

Якобиан преобразования переменных равен:

$$D_2 = \frac{\partial(X_r, Y_m)}{\partial(Z_k, \varphi_k)} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\sqrt{Z_k}} \cos \varphi_k & -\sqrt{Z_k} \sin \varphi_k \\ \frac{1}{2\sqrt{Z_k}} \sin \varphi_k & \sqrt{Z_k} \cos \varphi_k \end{vmatrix} = \frac{1}{2}.$$

Совместная плотность вероятности для случайных величин Z_k и φ_k

$$W_2(Z_k, \varphi_k) = \frac{1}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(\sqrt{Z_k} \cos \varphi_k - m_{x_r})^2 + (\sqrt{Z_k} \sin \varphi_k - m_{y_m})^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

Разложим выражение, находящееся в числителе под знаком экспоненты в (1):

$$\begin{aligned} & (\sqrt{Z_k} \cos \varphi_k - m_{x_r})^2 + (\sqrt{Z_k} \sin \varphi_k - m_{y_m})^2 = \\ & = Z_k \cos^2 \varphi_k - 2\sqrt{Z_k} m_{x_r} \cos \varphi_k + m_{x_r}^2 + Z_k \sin^2 \varphi_k - 2\sqrt{Z_k} m_{y_m} \sin \varphi_k + m_{y_m}^2 = \\ & = Z_k (\cos^2 \varphi_k + \sin^2 \varphi_k) - 2\sqrt{Z_k} (m_{x_r} \cos \varphi_k + m_{y_m} \sin \varphi_k) + m_{x_r}^2 + m_{y_m}^2. \end{aligned}$$

Тогда (1) примет вид:

$$W_2(Z_k, \varphi_k) = \frac{1}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{Z_k - 2\sqrt{Z_k} (m_{x_r} \cos \varphi_k + m_{y_m} \sin \varphi_k) + m_{x_r}^2 + m_{y_m}^2}{2\sigma^2}\right).$$

Введем обозначения

$$m_{x_r} \cos \varphi_k + m_{y_m} \sin \varphi_k = m_k \cos(\varphi_k - \psi_k),$$

$$\text{где } m_k = \sqrt{m_{x_r}^2 + m_{y_m}^2}, \quad \text{tg } \psi_k = \frac{m_{x_r}}{m_{y_m}}.$$

Получим

$$W_2(Z_k, \varphi_k) = \frac{1}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{Z_k - 2\sqrt{Z_k}m_k \cos(\varphi_k - \psi_k)m_k^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

Найдем одномерную плотность вероятности для Z_k , интегрируя (2) по всем возможным значениям φ_k :

$$\begin{aligned} W_1(Z_k) &= \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{Z_k + m_k^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\left(\frac{\sqrt{Z_k}m_k \cos(\varphi_k - \psi_k)}{\sigma^2}\right) d\varphi_k = \\ &= \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{Z_k + m_k^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{Z_k}m_k}{\sigma^2}\right), \end{aligned}$$

где $I_0(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(\alpha \cos(\varphi_k - \psi_k)) d\varphi_k$ – функция Бесселя нулевого порядка.

Полагая $m_{x_r} = m_{y_m} = 0$, выражение одномерной плотности вероятности для Z_k примет вид

$$W_1(Z_k) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{Z_k}{2\sigma^2}\right),$$

где $Z_k \geq 0$.

При отсутствии сигнала плотность вероятности величины Z_k равна

$$W_f(Z_k) = \frac{1}{\sigma_f^2} \exp\left(-\frac{Z_k}{\sigma_f^2}\right),$$

а при наличии сигнала

$$W_{sf}(Z_k) = \frac{1}{(\sigma_s^2 + \sigma_f^2)} \exp\left(-\frac{Z_k}{(\sigma_s^2 + \sigma_f^2)}\right).$$

Вероятность ложной тревоги и правильного обнаружения соответственно равны:

$$F = \int_{Z_{k_0}}^{\infty} \frac{1}{\sigma_f^2} \exp\left(-\frac{Z_k}{\sigma_f^2}\right) dZ_k, \quad (3)$$

$$D = \int_{Z_{k_0}}^{\infty} \frac{1}{(\sigma_s^2 + \sigma_f^2)} \exp\left(-\frac{Z_k}{(\sigma_s^2 + \sigma_f^2)}\right) dZ_k. \quad (4)$$

Интегрируя (3) и (4), соответственно получим:

$$F = \exp\left(-\frac{Z_{k_0}}{Z_{k_0}}\right); \quad D = \exp\left(-\frac{Z_{k_0}}{Z_{k_1}}\right),$$

где Z_{k_0} – пороговое значение случайной величины Z_k ; $\overline{Z_{k_0}} = \sigma_f^2$ – среднее значение шумовой составляющей квадрата модуля накопленного шума; $\overline{Z_{k_1}} = (\sigma_s^2 + \sigma_f^2)$ – среднее значение сигнальной составляющей квадрата модуля накопленной смеси сигнала и шума.

Потенцируя выражения для расчета вероятности ложной тревоги, определим пороговое значение случайной величины $Z_{k_0} = -\ln(F)\overline{Z}_{k_0}$.

Вероятности правильного обнаружения D и ложной тревоги F характеризуют качество решения о наличии цели или ложной тревоги в определенном элементе разрешения по частоте N_{FT} выборки. Условная вероятность ложной тревоги для совокупности из N_{FT} элементов, т.е. вероятность хотя бы одной ложной тревоги по всей выборке, равна $F_m = 1 - (1 - F)^{N_{FT}}$. Вероятность ложной тревоги для одной выборки с учетом критерийной обработки « k из n » определяется биномиальной формулой [3, с.330, 4, с. 286]:

$$F_{k/n} = \sum_{j=k}^n C_n^j F^j (1-F)^{n-j},$$

где C_n^j – число сочетаний из n по j .

Для обеспечения необходимого значения вероятности ложной тревоги не хуже 10^{-6} , а также с учетом того, что ширина спектра полезного сигнала Δf_c и ширина полосы пропускания фильтра когерентного накопителя Δf_ϕ различны: $\Delta f_c > \Delta f_\phi$, а ширина спектра помехи $\Delta f_\Pi \approx \Delta f_\phi$, то могут использоваться критерии «2 из 3», «2 из 4», «3 из 4», «3 из 5», обеспечивающие вероятности ложной тревоги соответственно $F_{2/3} = 3 \cdot 10^{-6}$, $F_{2/4} = 6 \cdot 10^{-6}$, $F_{3/4} = 4 \cdot 10^{-9}$, $F_{3/5} = 10^{-8}$, при $F = 10^{-3}$ и $F_{2/3} = 3 \cdot 10^{-10}$, $F_{2/4} = 6 \cdot 10^{-10}$, $F_{3/4} = 4 \cdot 10^{-15}$, $F_{3/5} = 10^{-14}$, при $F = 10^{-5}$.

Вероятность правильного обнаружения в N_{FT} элементах разрешения равна вероятности правильного обнаружения объекта в одном элементе разрешения $D_{N_{FT}} = D$ [3, 4].

На рис. 2,а представлен график зависимости вероятности правильного обнаружения корреляционного обнаружителя за время анализа от заданной вероятности ложной тревоги в элементе разрешения, полученный путем аналитических расчетов при $\sigma_f = 1,2$ и $\sigma_s = 12$.

На рис. 2,б представлен график зависимости вероятности ложной тревоги корреляционного обнаружителя за время анализа при $\sigma_f = 1,2$ от заданной вероятности ложной тревоги в элементе разрешения, полученный путем аналитических расчетов по разовым оценкам.

На рис. 2,в представлен график зависимости вероятности ложной тревоги корреляционного обнаружителя за время анализа при $\sigma_f = 1,2$ от заданной вероятности ложной тревоги в элементе разрешения, полученный путем аналитических расчетов с критерийной обработкой.

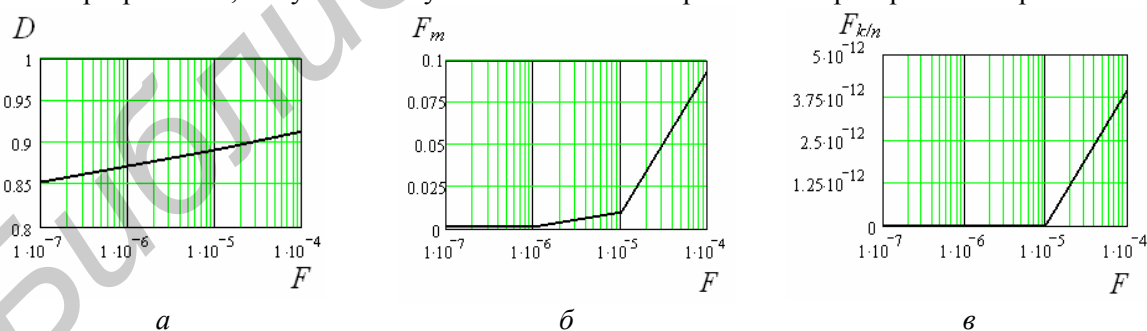


Рис. 2. Зависимости вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения корреляционного обнаружителя от заданной вероятности ложной тревоги в элементе разрешения

Заключение

Предложенная методика расчета показателей качества функционирования корреляционного сейсмического обнаружителя движущихся наземных объектов в одном и нескольких элементах разрешения выборки принятого сигнала без и с учетом критерийной обработки « k из n » соответственно позволяет аналитически оценить вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги.

Применение сейсмического обнаружителя, реализующего критерий обнаружения Неймана-Пирсона позволяет, достигая значения вероятности ложной тревоги в элементе разрешения 10^{-4} (что соответствует вероятности ложной тревоги 0,05 за время анализа 512 элементов разрешения), получить значение вероятности правильного обнаружения более 0,9, что соответствует требованиям, предъявляемым к современным техническим средствам охраны. Используя в обнаружителе обработку сигнала по критерию « k из n » можно, не снижая вероятности правильного обнаружения, снизить вероятность ложной тревоги до значения менее 10^{-6} за время анализа.

METHODS OF THE CALCULATION OF FACTORS QUALITY OPERATING THE SEISMIC DETECTOR MOVING OVERLAND OBJECT

A.E. VINOGRADOV, P.I. KOZEKA, N.G. KUKHALSKI

Abstract

The method of the calculation of factors quality operation correlation seismic detector moving overland object in one and several elements of the permit of the accepted signal sample without and with provision for the criterion of the processing « k from n » accordingly is considered.

Литература

1. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. М., 1983.
2. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М., 1966.
3. *Бакулев П.А.* Радиолокация движущихся целей. М., 1964.
4. *Финкельштейн М.И.* Основы радиолокации. М., 1983.