

УДК 621.396

А.М. СОТНИКОВ<sup>1</sup>, А.Б. ГАВРИЛОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил, Украина<sup>2</sup>Войсковая часть А0785, Украина

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТА РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ ПОСТАНОВКЕ МАСКИРУЮЩИХ ПОМЕХ

Для модели противодействия корреляционно-экстремальным (КЭ) радиометрическим (РМ) системам распознавания объектов оценивается вероятность распознавания при постановке маскирующих помех. Приводятся результаты теоретических исследований и математических расчетов.

**радиометрическая система, корреляционный алгоритм, противодействие, текущее изображение, эталонное изображение, аномальная ошибка, вероятность распознавания, аномальная ошибка**

### Введение

В ряде работ [1, 2] рассматривается задача противодействия радиометрическим системам обнаружения и распознавания объектов путем создания алгоритмических помех, которые могут быть организованы сглаживанием существующих контрастов и формированием искусственных ложных контрастов.

Учитывая, что такие помехи могут привести к срыву работы системы, вызывает интерес определение условий нарушения функционирования корреляционно-экстремальных радиометрических систем с целью решения задачи противодействия.

Анализ литературы [3, 4] показал, что задача исследования возможности функционирования радиометрической системы при постановке такого рода помех рассматривалась с точки зрения повышения эффективности самих систем. В данном случае предлагается новая постановка задачи определения условий нарушения функционирования алгоритма сравнения изображений при противодействии радиометрической системе путем создания ложных контрастов.

В этой связи *целью данной работы* является определение условий нарушения функционирования

радиометрических систем при создании ложных контрастов изображения.

### Определение вероятности распознавания объектов радиометрической системой

Известно, что вероятность распознавания объекта  $P_p$  в соответствии с алгоритмом сравнения текущего (ТИ) и эталонного (ЭИ) изображений связана с вероятностью аномальных ошибок  $P_a$  следующим соотношением [5]:

$$P_p = 1 - P_a. \quad (1)$$

Таким образом, задачу противодействия можно рассматривать как задачу определения вероятности  $P_a$ , при которой происходит срыв работы радиометрической системы.

Анализ литературы [5, 6] показал, что при наличии аномальных ошибок качество работы корреляционно-экстремальных систем распознавания может быть охарактеризовано отношением математического ожидания оценки взаимной корреляционной функции (ВКФ)  $M[k(\Delta x_n)]$  в точке истинного совмещения изображений к корню квадратному из дисперсии оценки этой функции  $D[k(\Delta x_0^a)]$  в области боковых выбросов, т.е.

$$r(\Delta x_\delta) = M[\hat{k}(\Delta x_n / \sqrt{D[\hat{k}(\Delta x_\delta)]}], \quad (2)$$

где  $\Delta x_n$  и  $\Delta x_\delta$  – значения аргумента оценки ВКФ, соответствующие точке истинного совмещения изображения и одной из точек области боковых выбросов.

При этом в [5] показано, что чем меньше показатель  $r(\Delta x_\delta)$ , тем выше вероятность аномальных ошибок (привязок).

Однако такой подход является приближенным и не позволяет учесть всех качественных взаимосвязей между элементами радиометрической системы распознавания, и поэтому не может быть использован для оценки эффективности противодействия.

Исходя из этого, для оценки вероятности распознавания объекта РМ системой предлагается использовать подход, применяемый в теории оценок параметров сигналов [5].

В соответствии с обобщенной моделью функционирования радиометрических систем обнаружения объектов [7], а также моделью противодействия [8], решение задачи местоопределения радиометрической системы определяется формируемой решающей функцией (РФ).

Учитывая это, и в соответствии с вышеопределенным подходом, для оценки вероятности распознавания объекта радиометрической системой будем рассматривать не саму РФ как непрерывную функцию, а лишь ее значения  $R(l_i)$  в  $M$  точках  $l_i = i\tau_k$ , где  $\tau_k$  – интервал корреляции эталонного и текущего изображений.

Таким образом, значения  $R_i = R(i\tau_k)$  будут статистически независимы, и одна из  $M$  точек будет совпадать с истинным значением параметра  $l_0$ .

При таком представлении вероятность распознавания объекта РМ системой можно записать как

$$P_p = P[R(k) > R(i), i = 1, 2, \dots, M, i \neq k], \quad (3)$$

где  $M = \frac{L}{\Delta_L} + 1$  – число выбросов РФ;

$L$  – априорный интервал возможных значений решающей функции.

Соответственно, вероятность аномальных привязок РМ системы будет определяться следующим выражением:

$$P_a = 1 - P_p = P[R(i) > R(k) \text{ хотя бы для одного } l_i \neq l_k]. \quad (4)$$

Обозначим через  $f_{R(k)}(r)$  функцию распределения точек истинного местоположения радиометрической системы, а через  $f_{R(i)}(r)$  – функцию распределения точек в области боковых ветвей РФ. Тогда выражение (4) можно записать как

$$P_p = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^R f_{R(i)}(y) dy \right]^M f_{R(k)}(R) dR. \quad (5)$$

В этом выражении обозначим

$$\left[ \int_{-\infty}^{\infty} f_{R(i)}(y) dy \right]^M = P_N(R). \quad (6)$$

Полагая  $R(i)$  и  $R(k)$  нормальными независимыми случайными величинами (СВ), запишем, что

$$f_{R(k)}(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left[-\frac{[R - \langle R(k) \rangle]^2}{2\sigma_n^2}\right], \quad (7)$$

где  $\sigma_n^2$  – дисперсия  $R(k)$ ;

$\langle R(k) \rangle$  – математическое ожидание  $R(k)$ ;

$$P_N(R) = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^M \Phi\left[\frac{R - \langle R(i) \rangle}{\sigma_c^2}\right], \quad (8)$$

где  $\Phi(z)$  – интеграл вероятности;

$$\langle R(i) \rangle = M[R(i)];$$

$$\sigma_c^2 - \text{дисперсия } R(i).$$

Подставляя (7), (8) в (5) и произведя замену переменных, получим

$$P_p = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{[z - \sigma_c^2]^2}{2\sigma_c^2}\right\} \left[\Phi\left(\frac{z + F_{ik}}{\sigma_n^2}\right)\right]^M dz, \quad (9)$$

$$\text{где } F_{ik} = \frac{\sigma_n^2 - \sigma_c^2}{2}.$$

Обозначим в выражении (9):

$$\frac{(z - \sigma_c^2)^2}{2\sigma_c^2} = x^2,$$

а также учтем, что [9]:

$$\Phi(y) = 0,5 \left( 1 + \operatorname{erf} \frac{y}{\sqrt{2}} \right).$$

Тогда выражение (9) примет вид

$$P_p = \frac{1}{2^M \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} x + \frac{\sigma_c^2}{\sigma_n^2} \right) \right]^M dx. \quad (10)$$

Выражение (10) характеризует вероятность распознавания объекта одной радиометрической системой с известными эталонными и текущими изображениями без учета случайного характера входящих в него величин.

В этой связи вероятность распознавания объекта радиометрической системой должна характеризоваться доверительной вероятностью из интервала  $(P_{p \min}, P_{p \max})$ .

Определим доверительный интервал вероятности распознавания цели РМ системой. Для этого положим в выражении (10), что:

$$\sigma_c = \sigma_{oc} + \delta\sigma_c; \quad (11)$$

$$\sigma_n = \sigma_{on} + \delta\sigma_n. \quad (12)$$

Подставляя выражения (11), (12) в (10), разлагая  $P_{MO} = f(\sigma_c, \sigma_n)$  в ряд Тейлора и ограничиваясь членами первого порядка, получим:

$$\begin{cases} P_{p \max} = \hat{P}_p + \sigma_P; \\ P_{p \min} = \hat{P}_p - \sigma_P; \end{cases} \quad (13)$$

где

$$\hat{P}_p = \frac{1}{2^M \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\sigma_{0c}}{\sigma_{0n}} x + \frac{\sigma_{0c}^2}{\sigma_{0c}} \right) \right]^M dx; \quad (14)$$

$$\sigma_P = \sqrt{\left( \frac{dP_p}{d\sigma_c} \right)^2 \delta\sigma_c^2 + \left( \frac{dP_p}{d\sigma_n} \right)^2 \delta\sigma_n^2} - \quad (15)$$

среднеквадратическое отклонение (СКО) вероятности распознавания цели от ее среднего значения  $\hat{P}_{MO}$ .

Если в выражении (15) составляющие СКО вероятности  $P_p$  являются независимыми и одинаково распределенными случайными величинами, имеющими одинаковое математическое ожидание и дисперсию, то при  $n \rightarrow \infty$  закон распределения суммы этих составляющих неограниченно приближается к нормальному [9]. Следовательно,  $\sigma_{P_p}$  обладает максимальной энтропией. Это означает для (13), что  $P_{p \max}$  и  $P_{p \min}$  являются, соответственно, наибольшей и наименьшей границами доверительного интервала  $P_p$ .

В соответствии с выражениями (13 ... 15) для оценки вероятности распознавания объекта радиометрической системой необходимо располагать числовыми характеристиками РФ системы.

### Определение решающей функции корреляционно-экстремальной радиометрической системы через характеристики изображения

В линейном приближении РФ можно представить следующим образом:

$$R(\tau) = \int_L x(t) S(t + \tau) dt, \quad (16)$$

где  $S(t + \tau)$  – импульсная характеристика системы;

$x(t)$  – линейное эталонное изображение объекта;

$L$  – область интегрирования, определяемая линейным размером либо эталонного, либо текущего изображения, в зависимости от того, который из них меньше.

При построчном сканировании ТИ на выходе системы будет иметь вид

$$S(t) = \mu \varepsilon(t) x(t) + \xi(t), \quad (17)$$

где  $\mu \in 0..1$  – коэффициент идентичности ЭИ и ТИ;

$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \delta\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [1 + \dot{\varepsilon}(t)]$  – мультипликативная помеха;

$\xi(t) = n(t) + v(t)$  – аддитивная помеха изображения;

$n(t)$  – помеха, характеризующая лишнюю информацию на ТИ;

$v(t)$  – аддитивные помехи радиометрической системы.

Тогда выражение (17) можно представить в виде

$$S(t) = \mu \varepsilon_0 [1 + \dot{\varepsilon}(t)] x(t) + n(t) + v(t). \quad (18)$$

Подставляя выражение (18) в (16), получим

$$R(\tau) = \int_L \mu \varepsilon_0 [1 + \dot{\varepsilon}(t)] x(t) x(t + \tau) dt + \int_L x(t) [n(t + \tau) + v(t + \tau)] dt = R_c(\tau) + R_n(\tau), \quad (19)$$

где  $R_c(\tau)$  – сигнальная составляющая РФ;

$R_n(\tau)$  – помеховая составляющая РФ.

Выражение (19) позволяет определить числовые характеристики РФ РМ системы.

Из (19) следует:

$$\langle R_c(\tau) \rangle = L \mu \varepsilon_0 R_x(\tau) = L \mu \varepsilon_0 \rho_x(\tau) R_x; \quad (20)$$

$$\langle R_n(\tau) \rangle = 0; \quad (21)$$

$$\sigma_c^2 = \langle R_c^2(\tau) \rangle - \langle R_c(\tau) \rangle^2; \quad (22)$$

$$\sigma_n^2 = \langle R_n^2(\tau) \rangle. \quad (23)$$

В соответствии с выражениями (22, 23) были определены дисперсии сигнальной и помеховой составляющих РФ.

Можно показать, что конечные выражения для этих дисперсий будут иметь вид:

$$\sigma_c^2 = P_\varepsilon P_x \mu^2 \varepsilon_0^2 \rho_i(\tau) \rho_x(\tau) L^2 + \mu^2 \varepsilon_0^2 [1 + \rho_\varepsilon(\tau)] \cdot 2 \frac{\Delta F}{\Delta f} [1 + \rho_x(\tau)] P_\varepsilon P_x, \quad (24)$$

где  $P_{(\cdot)}$  – соответствующие значения мощностей;

$$\sigma_n^2 = 2 \frac{\Delta F}{\Delta f} (P_x P_n + P_x P_v), \quad (25)$$

где  $\Delta F$  – полоса пропускания ФНЧ радиометра;

$\Delta f$  – полоса сигнала.

Подставляя числовые характеристики решающей функции радиометрической системы, определяемые выражениями (20, 21, 24, 25) в (13 – 15), можно найти

доверительный интервал вероятности распознавания цели радиометрической системой.

На основании предложенного подхода и оценке вероятности распознавания объекта радиометрической системой в условиях противодействия были проведены расчеты и построен график зависимости вероятности распознавания объекта от отношения сигнал/шум  $q$  на выходе РМ системы для трех значений  $M$ . График зависимости  $P_{MO} = f(q)/M = = const$  приведен на рис. 1.

Анализ этой зависимости показывает, что противодействие радиометрической системе, направленное на увеличение помеховой составляющей текущего изображения объекта, обусловленное наличием ложных контрастов в элементе разрешения диаграммы направленности антенной системы радиометрического приемника, приводящих, с одной стороны к аномальным боковым выбросам решающей функции, а с другой – уменьшению отношения сигнал/шум на выходе приемного устройства радиометрической системы, характеризуется снижением вероятности распознавания объекта.

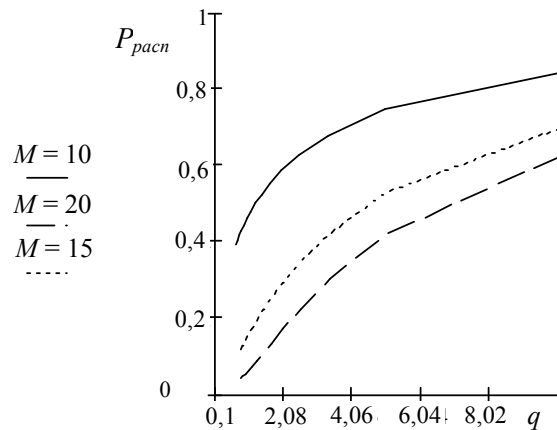


Рис. 1. График зависимости вероятности распознавания объекта радиометрической системой от соотношения сигнал/помеха на выходе радиометрического приемника и числа боковых выбросов решающей функции

Расчеты показывают, что снижение отношения сигнал/помеха ТИ до значений  $q \sim 2$  и увеличение числа аномальных выбросов РФ до 20 снижает вероятность распознавания объекта РМ системой до значения 0,16.

### Заключение

Таким образом, в результате исследований определены условия нарушения функционирования РМ систем при создании ложных контрастов на текущем изображении.

Установлено, что противодействие корреляционно-экстремальным радиометрическим системам путем создания ложных контрастов может быть достигнуто при условии, когда их наличие обеспечивает увеличение числа боковых выбросов решающей функции до 15 – 20 при одновременном снижении отношения сигнал/помеха на выходе радиоприемного устройства радиометрической системы до 1 – 2.

Реализация этого условия может быть достигнута получением максимальных значений вероятности аномальных ошибок, определяемых энергетическими характеристиками текущего изображения объекта.

### Литература

1. Сотников А.М., Арепьев С.В. Влияние помех на качество функционирования систем навигации // Информационные системы. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 1997. – Вып. 1 (5). – С. 49 – 54.
2. Пустоваров В.Е., Сотников А.М., Пустоваров В.В. Противодействие радиометрическим системам навигации // Системы обработки інформації. – Х.: ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вып. 1 (11). – С. 191 – 193.
3. Антюфеев В.И., Быков В.Н., Кубата В.Г., Кулаков В.А и др. Подавление сосредоточенных помех в широкополосных приемниках шумовых сигналов // Радиотехника. – 1990. – Вып. 93. – С. 37 – 41.
4. Антюфеев В.И., Быков В.Н., Макаренко Б.И. Применение принципов радиометрии в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов // Арсенал XXI сторіччя. – 2002. – № 1. – С. 37 – 41.
5. Куликов Е.Н., Трифонов А.Г. Оценка параметров сигналов на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.
6. Mostfavi U., Smith F.W. Image correlation with geometric distortion. – IEEE Trans., 1978. – V. HES-14. – P. 478 – 500.
7. Сотников А.М., Красношарпа И.В., Гаврилов А.Б. Метод снижения радиометрической наблюдаемости наземных малоразмерных объектов // Системы обработки інформації. – Х.: ХУ ПС. – 2005. – Вып. 1. – С. 169 – 172.
8. Сотников А.М., Гаврилов А.Б. Модель противодействия управляемым средствам поражения с радиометрическими головками самонаведения // Системы обработки інформації. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вып. 11 (39). – С. 185 – 190.
9. Справочник по теории вероятности и математической статистике / В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. – М.: Наука, 1985. – 640 с.

Поступила в редакцию 9.06.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, с.н.с. В.И. Антюфеев, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Украины, Харьков.