

УДК 621.396.96

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ

А.А. АНТОНЕНКО, В.А. КОНДРАТЁНОК, В.В. МОИСЕЕВ

Военная академия Республики Беларусь  
Минск–57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 1 июля 2011

Рассмотрена методика расчета характеристик обнаружения современных радиолокационных станций с синтезом апертуры антенны (РСА) в условиях воздействия на них активных шумовых помех. Методика позволяет оценить помехозащищенность РСА и обосновать в дальнейшем требования к средствам противодействия РСА.

*Ключевые слова:* РСА, помехозащищенность, обнаружение.

### Введение

Сегодня радиолокационным станциям с синтезированной апертурой антенны (РСА) по праву отводится лидирующее место среди средств информационной подсистемы высокоточного оружия, что обусловлено следующими факторами:

- высокой достигаемой разрешающей способностью в картинной плоскости, которая для РСА космического и воздушного базирования приблизилась к аналогичным показателям, достигаемым в оптическом диапазоне [1, 2];
- большими возможностями по проникающей способности и устойчивости к естественным помехам в сравнении с оптоэлектронными средствами, работающими как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне;
- высокой информативностью получаемых радиолокационных изображений (РЛИ) участков местности (при формировании поляриметрических, интерферометрических РЛИ, а также в различных диапазонах длин волн).

Ввиду высокой разрешающей способности современных РСА наблюдаемые объекты могут занимать на РЛИ десятки элементов разрешения, при этом отражения от объекта и окружающей его земной поверхности попадают в разные пространственные элементы разрешения (за исключением граничных элементов – «кромки» объекта, число которых значительно меньше общего числа элементов разрешения, занимаемых объектом). Такая особенность РСА снижает требования к мощностным характеристикам отраженного сигнала, т.к. его обнаружение проводится только лишь на фоне внутренних шумов приемника, а не их смеси с мешающими отражениями. В то же время при поиске распределенного наземного объекта, расположенного на фоне земной поверхности, говорить о его обнаружении представляется не совсем корректным. Более правильным видится назвать такой процесс различием (двухальтернативным распознаванием), т.к. в ходе него принимается решение в пользу одной из двух гипотез: 1) наблюдается сигнал на фоне внутренних шумов; 2) наблюдаются мешающие отражения на фоне внутренних шумов. В свою очередь, различение возможно и в случае отрицательной контрастности объекта по сравнению с окружающим фоном [1, 3].

Названные факторы приводят к необходимости рассматривать РСА как наиболее опасные из существующих средств радиолокационной разведки с точки зрения маскировки вооружения и военной техники в радиодиапазоне. В то же время названные отличия не позволяют оценить помехоустойчивость таких систем к преднамеренным активным помехам с использо-

ванием существующих методик [3–7] в которых цели рассматриваются как точечные объекты, а принимаемый сигнал представляется аддитивной смесью отраженного сигнала, мешающих отражений и внутренних шумов (при отсутствии помехи).

В настоящей статье приводится методика оценки устойчивости современных РСА к активным шумовым помехам, учитывающая пространственное разделение сигнала и мешающих отражений, а также возможную квазиоптимальную обработку формируемых РЛИ.

### Обнаружение объектов в РСА

Основная цель постановки активной помехи РСА – снизить отношение сигнал/шум получаемого РЛИ до значений, при которых их интерпретация будет невозможной (см. рис. 1). Однако следует учесть, что, как указано в [1], даже когда визуальная интерпретация РЛИ невозможна (в виду низкого отношения сигнал/шум), по ним можно обнаружить наземные объекты путем квазиоптимальной обработки РЛИ.

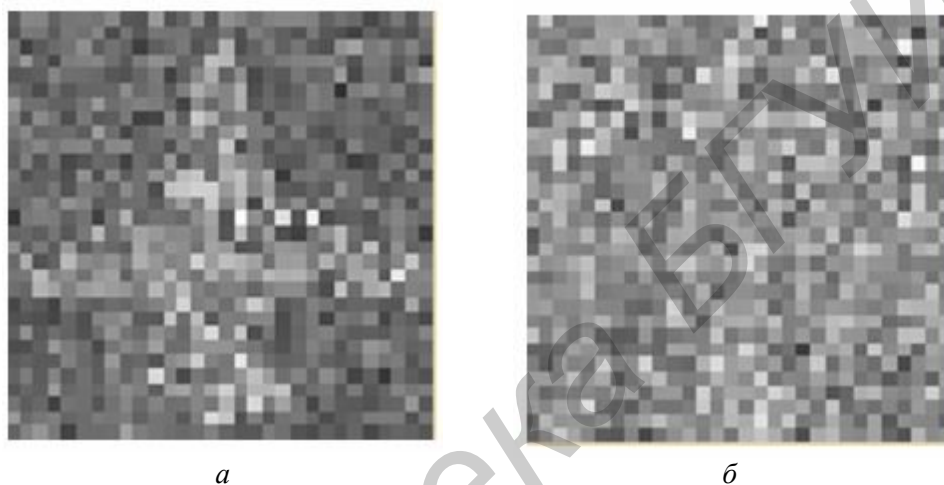


Рис. 1. РЛИ наземного объекта при отношениях сигнал/шум: а) 10 дБ, б) –5 дБ

В соответствии с [1] обзор РЛИ (с целью обнаружения наземных объектов) может осуществляться «скользящим» окном с формированием в каждом его фиксированном положении логарифма отношения правдоподобия  $Z_{\text{сп}}$  с последующим выбором его локальных максимумов, превышающих заданный порог обнаружения. При этом квазиоптимальная обработка радиолокационного портрета (РЛП) цели представляет собой некогерентное накопление сигнала в пределах его элементов разрешения с последующим взвешиванием и смещением. В результате случайная величина  $Z_{\text{сп}}$ , поступающая на вход устройства принятия решения, как указано в [1], распределена по закону хи-квадрат с  $2M$  числом степеней свободы, а условная вероятность правильного обнаружения объекта по РЛП определяется как

$$D = \int_{Z_{\text{сп}}^*}^{\infty} p_c(Z_{\text{сп}}) dZ_{\text{сп}} = \frac{\Gamma\left(M, \frac{Z_{\text{сп}}^* + M \ln(\bar{D}_{\text{сп}} + 1)}{\bar{D}_{\text{сп}}}\right)}{\Gamma(M)} \quad \text{при } \bar{D}_{\text{сп}} > 0$$

$$D = \int_0^{Z_{\text{сп}}^*} p_c(Z_{\text{сп}}) dZ_{\text{сп}} = 1 - \frac{\Gamma\left(M, \frac{Z_{\text{сп}}^* + M \ln(\bar{D}_{\text{сп}} + 1)}{\bar{D}_{\text{сп}}}\right)}{\Gamma(M)} \quad \text{при } \bar{D}_{\text{сп}} < 0,$$
(1)

где  $Z_{\text{сп}}^*$  и  $Z_{\text{сп}}^{*н}$  – пороги обнаружения: верхний (для обнаружения объекта с положительной контрастностью) и нижний (для случая наблюдения объекта с отрицательной контрастностью относительно окружающего фона);  $\bar{D}_{\text{сп}} = \frac{\bar{\rho}_c + 1}{\bar{\rho}_н + 1} - 1$  – средняя дифференциальная контрастность наземного объекта [1, 3];  $\bar{\rho}_c$  – среднее по элементам разрешения РЛП цели значение отноше-

ния сигнал/шум;  $\bar{\rho}_n$  – среднее по элементам разрешения РЛП земной поверхности, окаймляющей цель, значение отношения помеха/шум (пассивная помеха – мешающие отражения);  $M$  – число элементов разрешения в РЛП цели.

Пороги обнаружения объекта определяются заданным значением условной вероятности ложных тревог путем решения следующей совокупности уравнений:

$$F = \begin{cases} \frac{\Gamma\left(M, \frac{1+\bar{\Delta}_{\text{сп}}}{\bar{\Delta}_{\text{сп}}}(Z_{\text{сп}}^{*b} + M \ln(\bar{\Delta}_{\text{сп}} + 1))\right)}{\Gamma(M)} & \text{при } \bar{\Delta}_{\text{сп}} > 0 \\ \frac{\Gamma\left(M, \frac{1+\bar{\Delta}_{\text{сп}}}{\bar{\Delta}_{\text{сп}}}(Z_{\text{сп}}^{*n} + M \ln(\bar{\Delta}_{\text{сп}} + 1))\right)}{\Gamma(M)} & \text{при } \bar{\Delta}_{\text{сп}} < 0. \end{cases} \quad (2)$$

### Методика оценки помехоустойчивости

Предлагаемая методика оценки помехоустойчивости РСА включает следующие этапы.

1. Задание и уточнение исходных технических характеристик РСА.
2. Задание значения эффективной отражающей поверхности (ЭОП) и геометрических размеров цели, а также значения удельной ЭОП окружающей ее земной поверхности.
3. Расчет средних значений отношений сигнал/шум и помеха/шум в пределах одного элемента разрешения РЛП и определение средней дифференциальной контрастности цели для заданных условий наблюдения.
4. Задание условной вероятности ложных тревог при анализе РЛП и определение порогов обнаружения цели.
5. Расчет условной вероятности правильного обнаружения цели на фоне земной поверхности по РЛП для заданной спектральной мощности активной шумовой помехи.

Этапы методики рассмотрим более подробно на примере расчета зависимости вероятности правильного обнаружения некоторых типов наземных объектов по РЛП участка местности от спектральной плотности мощности активной шумовой помехи.

На этапе 1 (задания технических характеристик РСА) уточняются: рабочая длина волны, средняя мощность передатчика, коэффициент направленного действия (КНД) антенны, коэффициент потерь, время синтеза, удаленность носителя РСА от зоны обзора и реализуемая разрешающая способность.

Различные наземные объекты обладают разной заметностью на фоне земной поверхности. Поэтому при оценке характеристик обнаружения РСА требуется конкретизировать тип обнаруживаемого объекта, а также окружающей его земной поверхности.

На этапе 2 методики задается ряд возможных типов наземных объектов наблюдения, определяются значения ЭОП для заданных объектов и их геометрические размеры в горизонтальной плоскости (для определения числа занимаемых ими элементов разрешения на РЛП). Размеры некоторых характерных малоразмерных наземных объектов и их ЭОП в X-диапазоне частот представлены в [2]. В случае применения средств, снижающих радиолокационную заметность (радиопоглощающих или рассеивающих покрытий), необходимо использовать результирующие значения ЭОП объектов. В [2] также приведены значения удельных ЭОП некоторых типов земной поверхностей в X-диапазоне частот для значений углов наблюдения (скольжения)  $25^\circ$  и  $50^\circ$  при горизонтальной и вертикальной поляризации сигнала.

В соответствии с [1, 4, 7, 8] средние значения отношений сигнал/шум и помеха/шум в элементах разрешения РЛП (этап 3) рассчитываются по следующим формулам:

$$\rho_c \approx \frac{P_{\text{ср}} D_{\text{max}}^2 \lambda^3 d_r}{128(\pi R)^3 N_{\Sigma} V_{\text{н}} L S_{\text{ц, пр}}} \frac{\sigma_{\text{ц}}}{S_{\text{ц, пр}}}; \quad (3)$$

$$\rho_n \approx \frac{P_{\text{ср}} D_{\text{max}}^2 \lambda^3 d_r}{128(\pi R)^3 N_{\Sigma} V_{\text{н}} L} \alpha_{\text{зн}}, \quad (4)$$

где  $P_{cp}$  и  $\lambda$  – средняя мощность передатчика и длина волны зондирующего сигнала;  $D_{max}$  – КНД антенны РСА в направлении ее главного лепестка диаграммы направленности;  $V_n$  и  $dl_r$  – скорость носителя и разрешающая способность РСА по поперечной координате;  $\sigma_{ц}$  и  $S_{ц,пр}$  – ЭОП объекта и площадь его проекции на плоскость, перпендикулярную линии визирования РСА;  $\alpha_{зп}$  и  $L$  – удельная ЭОП земной поверхности и коэффициент потерь;  $N_{\Sigma} = N_0 + N_{ан}$  – суммарная спектральная плотность шума, включающая внутренние шумы приемника  $N_0$  и активную шумовую помеху  $N_{ан}$ .

Средняя дифференциальная контрастность объекта на фоне подстилающей поверхности в соответствии с [3], а также выражениями (3) и (4), определяется как:

$$\bar{\Delta}_{ср} = \frac{\bar{\rho}_c + 1}{\bar{\rho}_n + 1} - 1 \approx \frac{P_{cp} D_{max}^2 \lambda^3 dl_r}{P_{cp} D_{max}^2 \lambda^3 dl_r \alpha_{зп} + 128(\pi R)^3 (N_0 + N_{ан}) V_n L} \left( \frac{\sigma_{ц}}{S_{ц,пр}} - \alpha_{зп} \right). \quad (5)$$

На этапе 4 методики задается максимально допустимое число ложных обнаружений объектов  $N_{л}$  на анализируемом РЛИ и рассчитывается допустимое значение условной вероятности ложного обнаружения одного объекта  $F$ :

$$F = \frac{N_{л}}{N_{л \max}} = \frac{N_{л} \cdot M}{S_{РЛИ}}, \quad (6)$$

где  $N_{л \max}$  – максимально возможное число ложных обнаружений наземных объектов на РЛИ заданной площади;  $S_{РЛИ}$  – площадь анализируемого РЛИ.

На завершающем этапе 5 методики оценки помехоустойчивости РСА рассчитывается условная вероятность правильного обнаружения цели для заданного значения спектральной плотности активной шумовой помехи. Условная вероятность правильного обнаружения анализируемого объекта на заданном фоне земной поверхности определяется по совокупности формул (1) с использованием порогов обнаружения, рассчитываемых по формулам (2). При этом из пар названных соотношений выбираются уравнения, соответствующие знаку средней дифференциальной контрастности анализируемого объекта и земной поверхности.

При расчете зависимости условной вероятности правильного обнаружения от спектральной плотности активной шумовой помехи пятый шаг методики повторяется для разных значений второй величины.

### Заключение

В статье в общем виде раскрыты зависимости, описывающие процесс обнаружения наземного объекта по РЛИ на фоне земной поверхности в РСА, и приведена методика оценки помехоустойчивости таких систем. Полученные результаты отличаются учетом пространственного разделения сигнала и мешающих отражений, что характерно для современных РСА. Как видно из выражения (5), почти все параметры РСА, необходимые для анализа ее помехоустойчивости, относятся к числу доступных (для большинства подобных систем могут быть найдены в открытых источниках). Недостающие технические характеристики возможно определить с помощью соответствующей методики, приведенной в [3].

Полагается, что при радиоэлектронном противодействии РСА частота и ширина спектра ее зондирующего сигнала априорно известны (это справедливо в случаях противодействия РСА конкретного типа). Для оценки помехоустойчивости в качестве основного информативного параметра средства постановки активной шумовой помехи в методике используется спектральная плотность ее мощности. Положительной стороной такого подхода является универсальность методики применительно к тактике ведения радиоэлектронной борьбы (пространственной ориентации постановщика помех относительно РСА и его дальности).

В настоящее время существует целый ряд РСА воздушного и космического базирования, отличающихся как реализуемой разрешающей способностью, так и спектром функцио-

нальных возможностей (построение интерферометрических, поляриметрических РЛИ, селекция движущихся целей, дальность действия). Такие РСА предназначены для решения разных задач, ввиду чего предполагают различную обработку РЛИ, а также принимаемого сигнала в ходе формирования РЛИ. Рассмотрение и анализ конкретных систем радиолокационного мониторинга земной поверхности является объектом дальнейших исследований.

## THE METHOD OF NOISE STABILITY EVALUATION IN SYNTHETIC APERTURE RADARS

A.A. ANTONENKA, V.A. KONDRATYONOK, V.V. MOISEEV

### Abstract

In this article the technique of calculating the detection characteristics of modern synthetic aperture radars under exposure to active jamming is presented. The technique allows to assess the immunity of SAR and justify the requirements for radars to counter them.

### Литература

1. *Антоненко А.А.* Обнаружение-распознавание неподвижных наземных объектов по некоррелированным радиолокационным портретам в поляриметрических радиолокаторах с синтезом апертуры антенны: дисс. канд. техн. наук: 05.12.14. Минск, 2010.
2. *Верба В.С.* Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития. М., 2008.
3. *Охрименко А.Е.* Основы извлечения, обработки и передачи информации. М., 1995.
4. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронной борьбы. М., 1983.
5. *Ширман Я.Д.* Теоретические основы радиолокации. М., 1970.
6. *Sumting Ian G.* Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation. London, 2005.
7. *Антоненко А.А.* // Вестник УО «ВА РБ». 2010. №2 (31). С. 86–90.
8. *Кравцов В.А., Лобанов А.Д.* Теория РЭБ. Минск, 1998.