

УДК 681 883

КЛАССИФИКАЦИЯ НАДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО РАДИОЛОКАЦИОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

Е. А. Войнов,

канд. техн. наук, зам. директора научно-производственного комплекса

Ю. Ф. Подоплекин,

доктор техн. наук, зам. генерального директора, директор по науке

Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦНИИ «Гранит»»

Рассматривается возможность классификации надводных объектов, основанной на оценке информативных признаков – продольного и поперечного размеров, радиальной скорости и архитектуры объекта по его радиолокационному образу, полученному путем синтезирования апертуры РЛС ЛА в передне-боковом обзоре, и вынесения решения о классе объекта при сравнении значения статистической решающей функции информативных признаков с пороговым уровнем.

The possibility of surface objects classification based on the estimation of informative characteristics – longitudinal and transversal sizes, range rate and the architecture of the object according to its radar image received by means of synthesizing of aperture of the aircraft's radar station on forward and side surveillance is examined as well as the possibility of the decision of the class of the object on comparison of the statistical decision function of informative characteristics with the threshold level.

Одним из основных ограничений активной радиолокационной станции (РЛС) ЛА является недостаточно высокое разрешение по углу, определяемое размером антенны. Для когерентной РЛС ЛА, обеспечивающей высокое разрешение по доплеровским частотам, ограничение снимается путем реализации эффекта синтезирования апертуры антенны. Практически это происходит в условиях, когда надводный корабль (НК), движущийся со скоростью V_u , составляет некоторый постоянный угол β_c с направлением вектора скорости ЛА V и находится внутри диаграммы направленности антенны $\Delta\psi$ (рис. 1). Этот эффект эквивалентен синтезированию апертуры антенны в передне-боковом обзоре [1].

Учитывая, что $V \gg V_u$, дальность до элемента цели $R(t)$ представляется как

$$R(t) \approx R_0 \left(1 - \frac{V \cos \beta_c - V_u \cos \alpha}{R_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{Vt}{R_0} \right) \sin^2 \beta_c \right) \quad (1)$$

где α – ракурс цели (угла между V_u и направлением облучения).

Фазовый набег принимаемого сигнала выражается следующим образом:

$$\Delta\varphi(t) \approx \omega_0 t + \frac{2\omega_0}{C} (V \cos \beta_c - V_u \cos \alpha) t - R_0 \frac{\omega_0}{C} \left(\frac{Vt}{R_0} \right) \sin^2 \beta_c \quad (2)$$

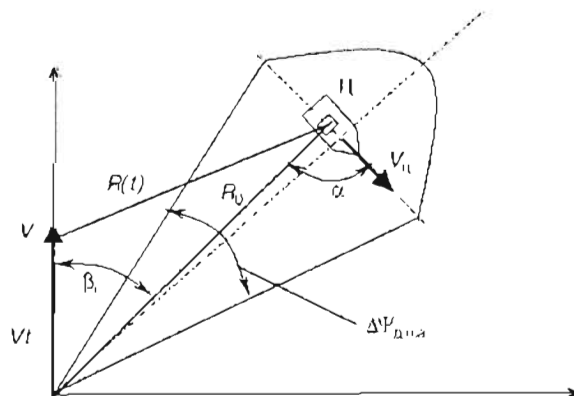
Второй член этого выражения характеризует доплеровский сдвиг частоты:

$$F_d = \frac{2(V \cos \beta_c - V_u \cos \alpha)}{\lambda} \quad (3)$$

Третий член означает линейную частотную модуляцию с девиацией

$$\omega_0 \frac{V^2 t^2}{CR_0} \sin^2 \beta_c,$$

зависящей от времени обработки, дальности до цели и направления прихода сигналов – β_c .



■ Рис. 1. Схема синтезирования апертуры антенны в передне-боковом обзоре

Полагая, что

$$\left| \frac{2V^2 t^2}{CR_0} \sin^2 \beta_c \leq \frac{\pi}{2} \right.$$

получаем выражение для предельного времени когерентной обработки

$$t_k \leq \frac{\sqrt{\lambda R_0}}{2V \sin \beta_c} \quad (4)$$

и предельной полосы пропускания одного канала обработки по доплеровской частоте

$$F_d = \frac{1}{t_k} = \frac{2V \sin \beta_c}{\sqrt{\lambda R_0}} = \frac{2V}{\lambda} \sin \beta_c \Delta \beta, \quad (5)$$

где $\Delta \beta = \sqrt{\frac{\lambda}{R_0}}$ – предельное угловое разрешение.

Наличие конечного углового разрешения $\Delta \beta$, которому соответствует линейное разрешение $\Delta Z = R_0 \Delta \beta = \sqrt{\lambda R_0}$, характеризует обзор с приведенной обработкой по доплеровской частоте как нефокусированный обзор в том смысле, что антенна с синтезированием апертуры «сфокусирована» на бесконечной дальности. Например, при $V = 800$ м/с, $\lambda = 3$ см, $\beta_c = 15^\circ$, $R_0 = 15$ км линейное разрешение составит 20 м при $t_k = 50$ мс, что существенно лучше разрешения, определяемого размером луча антенны $\Delta \Psi$ (так при $\Delta \Psi = 0,1$ рад и $R_0 = 15$ км – $\Delta Z = 1500$ м)

Высокое угловое разрешение $\Delta \beta (\Delta Z)$ в совокупности с высоким разрешением по дальности ΔR , достигаемым за счет использования широкополосного зондирующего сигнала, позволяет получить двумерное радиолокационное изображение (РЛИ) НК (рис. 2).

Размеры корабля в радиальном направлении определяются по числу каналов дальностей, а в поперечном направлении – по числу частотных каналов, в которых присутствуют отраженные сигналы. В случае подвижной цели, какой является надводный корабль, анализ РЛИ позволяет определить его дли-

ну, угол между направлением наибольшей протяженности РЛИ и направлением облучения – ракурс цели α , с точностью до 180° , а также определить собственную скорость цели, т. е. $V_u \cos \alpha$, для чего

$$\bar{F}_{d_u} = \bar{F}_d - \frac{2V}{\lambda} \cos \beta_c.$$

Если $\bar{F}_{d_u} < 0$, то НК удаляется, в противном случае – наоборот. При этом

$$V_u = \left| \frac{\lambda \bar{F}_{d_u}}{2 \cos \alpha} \right|.$$

Суть определения геометрических размеров цели состоит в том, что в каждом элементе разрешения по дальности – ΔR в диапазоне дальностей (границы зоны обзора по дальности) – $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$ и линейного разрешения по углу – ΔZ в частотных доплеровских каналах – $r = 1, 2, \dots, m$ для каждого значения q осуществляется когерентное накопление сигналов

$$S(r, q) = \sum_{i=1}^m S_i r q \quad (6)$$

и определяются координаты $r_1(q)$ и $r_2(q)$ контура радиолокационного изображения цели из условия

$$\begin{aligned} S(r_1 - 1, q) < C_0, S(r_1, q) \geq C_0; \\ S(r_2, q) \geq C_0, S(r_2 + 1, q) \leq C_0, \end{aligned} \quad (7)$$

а также граничные – минимальное q_1 и максимальное q_2 – значения q , при которых эти условия выполняются (где $C_0 \geq 0$ – пороговый уровень, определяемый допустимой вероятностью ложного срабатывания в условиях шумов и помех).

По координатам $r_1(q)$ и $r_2(q)$ можно определить параметры a, d отрезка прямой $r(q) = aq + d$, $q_1 \leq q \leq q_2$ на плоскости r, q из условия:

$$\min_{(a,d)} \left[\frac{\sum_{q=q_1}^{q_2} [r(q) - r_{cp}(q)]^2}{q_2 - q_1 + 1} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

где $r_{cp}(q) = 0,5(r_1(q) + r_2(q))$.

Найденное положение прямой $r_1(q)$ позволяет вычислить оценку ракурса цели α по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(r(q_2) - r(q_1) + 1) \Delta Z}{(q_2 - q_1 + 1) \Delta R} \quad (9)$$

и максимальные продольные (L) и поперечный (B) ее размеры по формулам

$$L = \frac{q_2 - q_1 + 1}{|\cos \hat{\alpha}|} \Delta R;$$

$$B = \max_{q_1 \leq q \leq q_2} (r_2 - r_1 + 1) \Delta Z |\cos \hat{\alpha}|. \quad (10)$$

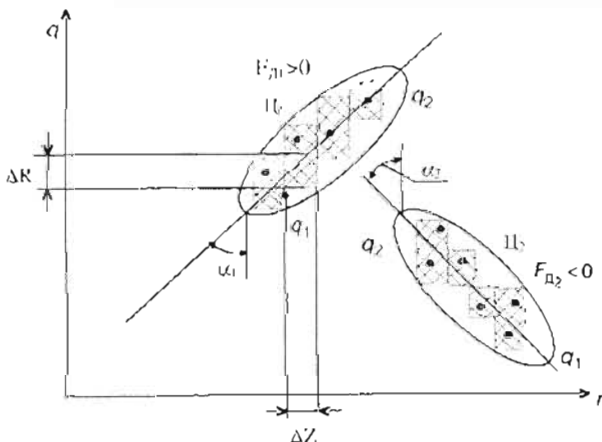


Рис. 2. Двумерное радиолокационное изображение НК

Затем проверяется выполнение условия $q_2 - q_1 \geq r(q_2) - r(q_1)$ и, если оно не выполняется, то повторяются операции от нахождения координат контура до оценки размеров цели после перестановки:

$$q \leftrightarrow r, \Delta R \leftrightarrow \Delta Z, \alpha \rightarrow \frac{\pi}{2} - \alpha.$$

Такая перестановка повышает точность оценок по приведенным формулам в ситуациях, когда радиальный размер цели оказывается меньше поперечного (см. рис. 2, цель Ц₂).

Рассмотрим случай бинарной классификации целей по совокупности признаков $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$, значения которых будем предполагать статически независимыми и с нормально распределенными параметрами $\gamma_{11}, \gamma_{21}, \dots, \gamma_{n1}, \sigma_{11}, \sigma_{21}, \dots, \sigma_{n1}$ и $\gamma_{12}, \gamma_{22}, \dots, \gamma_{n2}, \sigma_{12}, \sigma_{22}, \dots, \sigma_{n2}$ – для первого и второго классов соответственно.

Тогда, составляя отношение правдоподобия [2] по отношению к совокупности информативных признаков,

$$\frac{W_1(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)}{W_2(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)} = I(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n), \quad (11)$$

получим после его логарифмирования и простых преобразований правило решения:

$$\text{если} \quad \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i(\gamma_{i1} - \gamma_{i2})}{\sigma_i^2} \geq A, \quad (12)$$

то цель относится к классу 1 ($i = 1$), в противном случае – к классу 2 ($i = 2$).

Пороговое значение A статистической решающей функции выбирается в зависимости от желаемого соотношения между вероятностями ошибок классификации (и их стоимостями). В важном для практики частном случае, когда ошибки (ошибочная классификация цели класса 1 как цель класса 2 и наоборот) равноценны, получаем выражение

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{(\gamma_{i1}^2 - \gamma_{i2}^2)}{2\sigma_i^2}, \quad (13)$$

Тогда класс цели определяется в результате выполнения условия

$$\frac{L(L_1 - L_2)}{\sigma_L^2} + \frac{B(B_1 - B_2)}{\sigma_B^2} \geq A_0, \quad (14)$$

где L_1, L_2, B_1, B_2 – априорно известные значения длины и ширины радиолокационного изображения двух классов целей, например, главных и неглавных, σ_L, σ_B – априорно известные усредненные среднеквадратические отклонения; A_0 – пороговое значение, выбираемое в зависимости от желаемого соотношения между вероятностями (и стоимостями) ошибок классификации.

В качестве дополнительных информативных признаков целесообразно использовать координаты

наиболее интенсивно отражающих точек цели в системе координат, связанной с целью. Для этого необходимо измерить доплеровскую частоту $F_{дв}$ отраженных сигналов, присутствующих по направлению β , оси диаграммы направленности антенны относительно направления вектора V скорости ЛА, при $|F_{дв}| \geq F_0$, где F_0 – пороговое значение

Координаты носа (или кормы) наблюдаемой цели определяются по правилам вида:

$$\text{при} \quad |F_{дв}| > 0 \quad q_H = q_1, r_H = aq_2 + d(\text{нос}),$$

$$\text{при} \quad |F_{дв}| < 0 \quad q_H = q_2, r_H = aq_2 + d(\text{нос}). \quad (15)$$

Затем сравниваются между собой накопленные значения $S(r, q)$ и определяются координаты r_{i1}, q_{i1} максимальных значений, где $i = 1, 2, \dots, n, n > 1$. Расстояния этих точек от носа находят по правилам:

$l_{0i} = (q_i - q_H)\Delta R \cos \hat{\alpha}_i + (r_i - r_H)\Delta Z \sin \hat{\alpha}_i$ – по продольной оси;

$b_{0i} = (r_i - r_H)\Delta Z \cos \hat{\alpha}_i + (q_i - q_H)\Delta R \sin \hat{\alpha}_i$ – в поперечном направлении.

Решение о классе наблюдаемой цели определяется по правилу, если

$$\frac{L(L_1 - L_2)}{\sigma_L^2} + \frac{B(B_1 - B_2)}{\sigma_B^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{l_{0i}(l_{01} - l_{02})}{\sigma_{li}^2} + \frac{b(b_1 - b_2)}{\sigma_{bi}^2} \right] \geq A_1, \quad (16)$$

то цель – главная.

При этом $l_{01i}, l_{02i}, b_{01i}, b_{02i}$ – априорно известные усредненные внутри классов расстояния наиболее отражающих точек от носа в продольном и поперечном направлениях для классов «главных» и «неглавных» целей соответственно; σ_{li}, σ_{bi} – соответствующие усредненные среднеквадратические отклонения; A_1 – пороговое значение, выбираемое в зависимости от желаемого соотношения между вероятностями (и стоимостями) ошибок классификации.

Выводы

Проведенное математическое моделирование рассматриваемой классификации НК (при разрешении $\Delta R = \Delta Z = 20$ м) показало возможность получения вероятности правильной классификации на уровне $P \geq 0,9$ при вероятности ложной классификации $F \leq 0,1$. При этом классификации подвергались НК, условно разделенные по их геометрическим размерам на три класса: малые – до 50 м, средние – до 100 м и большие – более 150 м.

Литература

1. Толстов Е. Ф., Шаповалов А. В. Разрешающая способность РЛС с синтезированной апертурой антенны при произвольном угле наблюдения // Радиотехника. – 1983. – № 3. – С. 3–18.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2. – М.: Сов. радио, 1968. – 65 с.