

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ ЗАПРОСНОЙ СИСТЕМОЙ ВТОРИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ**

И.И. Обод, П.В. Овсянников, А.Н. Булай  
(Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

*Приводится оптимизация обнаружения воздушной цели системой вторичной радиолокации.*

***запросные системы вторичной радиолокации, оптимизация обнаружения***

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Создание единого радиолокационного поля предполагает образование единой информационной сети существующих систем наблюдения, реализация которой немислима без внедрения в системы наблюдения автоматических обнаружителей и измерителей координат воздушных целей. Системы вторичной радиолокации (ВРЛ) [1], образованные запросчиком и ответчиком, находят широкое применение в Воздушных Силах и системах управления воздушного движения гражданского и военного применения. Как показано в [2], помехоустойчивость систем ВРЛ крайне низка при действии преднамеренных коррелированных (имитирующих) помех. Это обусловлено принципом построения таких систем в целом и принципом обслуживания запросных сигналов. Действительно [2], существующие системы ВРЛ построены по принципу открытой системы массового обслуживания с отказами. По принципу обслуживания запросных сигналов ответчики можно отнести к системам обслуживающим заявку. При таком способе построения системы ВРЛ воздействие имитирующих помех на ответчик приводит к парализации последнего, что затрудняет выделение ответных сигналов на запросчике и, как следствие, невозможность обнаружения воздушной цели подобной системой. Это существенным образом сказывается на помехоустойчивости ответчика и всей запросной системы ВРЛ. Именно принцип построения запросных РТС предопределил невозможность отнесения этих систем к помехоустойчивым.

Однако, системы ВРЛ является важной обеспечивающей системой Воздушных Сил и обязаны органически входить в единую информационную систему. Однако вопросам обнаружения воздушных целей системами ВРЛ, несколько отличающегося от обнаружения воздушных целей

системами первичной радиолокации, уделено незначительное внимание в существующей литературе.

**Цель работы.** Оптимизация обнаружения воздушных целей системой вторичной радиолокации.

**Основная часть.** Обнаружение воздушных целей системой ВРЛ осуществляется на запроске по результату обнаружения пачки ответных сигналов. Следовательно, обнаружение воздушных целей системой ВРЛ есть результат обнаружения запросных сигналов на ответчике и ответных сигналов на запросчике. В связи с этим представляет интерес рассмотрение вопросов оптимизации обнаружения воздушных целей системой ВРЛ, т.е. системой осуществляющей двукратное обнаружение.

Статистическая трактовка процесса обнаружения воздушных целей системой ВРЛ, как результат обнаружения каждого из пачек запросных и ответных сигналов в каналах системы ВРЛ может быть представлена в виде, приведенном на рис. 1. Точки  $x$ ,  $n$ ,  $y$  и  $r$  на данной схеме принадлежат пространствам параметров сигнала  $C$ , помех  $\Pi$ , наблюдений  $H$  и решений  $P$ , соответственно. Индексы 1 и 2 обозначают принадлежность к запросному каналу и ответному каналу системы ВРЛ. Преобразователь ответчика ( $\Pi$ ) осуществляет однозначное преобразование всех точек пространства решений ответчика в пространство параметров ответного сигнала, передаваемого запросчику системы ВРЛ.

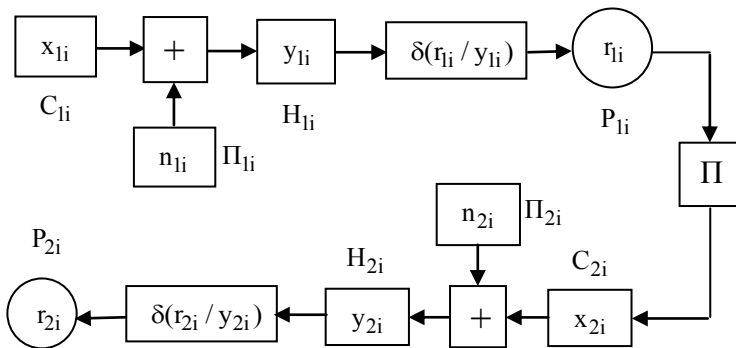


Рис. 1. Статистическая модель обнаружения целей системой ВРЛ

Будем рассматривать задачу обнаружения воздушной цели в системе ВРЛ как проверку двух гипотез и попытаемся найти оптимальные правила принятия решений на ответчике и запросчике.

Пусть каждое пространство  $C_{1i}$ ,  $i \in \overline{1, M}$  включает в себя только две точки  $x_{10}$  и  $x_{11}$  по каждому из  $i$  принятых запросных сигналов, которые соответствуют отсутствию запросного сигнала и приему запросного

сигнала с амплитудой, равной пороговому значению обнаружения. Соответственно остальные пространства также содержат по две точки для каждого из принятых сигналов, которые будем обозначать теми же индексами. Так как процесс обнаружения воздушной цели состоит из  $M$  процессов обнаружения сигналов в цепи запросчик-ответчик, то рассмотрим процесс обнаружения сигналов, обобщив его в дальнейшем на обнаружение цели. Цены принятых запросным каналом системы ВРЛ решений по каждому из сигналов в рассматриваемом случае можно описать матрицей стоимостей

$$C = \begin{vmatrix} C(r_{20}, x_{10}) & C(r_{20}, x_{11}) \\ C(r_{11}, x_{10}) & C(r_{11}, x_{11}) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_{1-\alpha} & C_{\beta} \\ C_{\alpha} & C_{1-\beta} \end{vmatrix}.$$

Общее выражение среднего риска для ситуации двукратного обнаружения [5] можно записать в следующем виде при обнаружении однократного сигнала в канале запросчик-ответчик-запросчик

$$R = \sum_{\substack{C_1, H_1, P_1, \\ H_2, P_2}} P(x_1)P(y_1 | x_1)\delta(r_1 | y_1)P(y_2 | x_2)\delta(r_2 | y_2)C(r_2; x_1), \quad (1)$$

где  $P(x_1)$  – априорное распределение вероятностей значения параметра  $x_1$ ;  $P(y_1 | x_1)$  и  $P(y_2 | x_2)$  – условные функции правдоподобия (ФП) для реализаций, принятых ответчиком и запросчиком системы ВРЛ соответственно;  $\delta(r_1 | y_1)$  и  $\delta(r_2 | y_2)$  – правила решений, описывающие алгоритм работы ответчика и запросчика системы ВРЛ.

Предположим, что преобразователь решений ответчика в ответный сигнал идеальный. В этом случае можно записать для каждого сигнала пачки

$$P(y_2 | x_2) = P(y_2 | r_1).$$

Таким образом, оптимальное правило принятия решения в ответчике можно найти путем минимизации выражения (1) как функционала от  $\delta(r_1 | y_1)$  по каждому из импульсов пачки.

Учитывая, что условная функция распределения вероятностей принятых запросчиком решений, характеризующая качество работы решающего устройства запросчика системы ВРЛ, равна

$$P(r_2 | x_2) = P(r_2 | r_1) = \sum_{P_2} \delta(r_2 | y_2)P(y_2 | r_1) = \sum_{P_2} \delta(r_2 | y_2)P(y_2 | x_2)$$

и что  $\delta(r_{11} | y_1) + \delta(r_{10} | y_1) = 1$ , выражение (1) можно записать в следующем виде

$$R = \sum_{H_1} \delta(r_{11} | y_1) \{R_1 - R_2\} + \sum_{C_1} P(x_1) \sum_{P_2} P(r_2 | r_{10}) C(r_2; x_1), \quad (2)$$

где

$$R1 = \sum_{C_1} P(y_1 | x_1) \sum_{P_1} P(r_2 | r_{11}) C(r_2; x_1); \quad R2 = \sum_{C_1} P(y_1 | x_1) P(x_1) \sum_{P_2} P(r_2 | r_{10}) C(r_2; x_1).$$

Как следует из (2), оптимальное правило, минимизирующее средний риск  $\delta(r_{11} | y_1) = 1$  при условии, если

$$\sum_{C_1} P(y_1 | x_1) P(x_1) \sum_{P_2} P(r_2 | r_{11}) C(r_2; x_1) \leq \sum_{C_1} P(y_1 | x_1) P(x_1) \sum_{P_2} P(r_2 | r_{10}) C(r_2; x_1). \quad (3)$$

Используя очевидное равенство  $P(r_{21} | r_1) + P(r_{20} | r_1) = 1$ , можно упростить выражение (3). После преобразований окончательно получаем выражение для обобщенного отношения правдоподобия при обнаружении одиночных запросных сигналов

$$\frac{P(y_1 | x_{11}) P(x_{11})}{P(y_1 | x_{10}) P(x_{10})} \geq \frac{C_\alpha - C_{1-\alpha}}{C_\beta - C_{1-\beta}}.$$

Таким образом, оптимальный обнаружитель ответчика системы ВРЛ в байесовом смысле должен сравнивать с порогом обобщенное отношение правдоподобия. Величина порога не зависит от алгоритма и качества работы запросчика системы ВРЛ и полностью определяется заданными для системы ВРЛ в целом стоимостями решений.

Для определения байесова правила решений на запросчике системы ВРЛ введем модифицированную ФП для двухзвенной системы [4] при обнаружении одиночных импульсов пачки

$$P(y_2 | x_1) = \sum_{P_1} P(y_2 | r_1) P(r_1 | x_1) + \sum_{H_1} \sum_{P_1} P(y_2 | r_1) \delta(r_1 | y_1) P(y_1 | x_1). \quad (4)$$

С использованием этого выражение (1) приводится к известному [4] для однозвенной системы виду

$$R = \sum_{C_1} \sum_{H_1} \sum_{P_2} P(x_1) P(y_2 | x_1) \delta(r_2 | y_2) C(r_2; x_1). \quad (5)$$

Согласно [4], правило решений, минимизирующее средний риск (5), можно сформулировать как:  $\delta(r_{21} / y_2) = 1$  в том случае, если

$$\frac{P(y_2 | x_{11}) P(x_{11})}{P(y_2 | x_{10}) P(x_{10})} \geq \frac{C_\alpha - C_{1-\alpha}}{C_\beta - C_{1-\beta}}. \quad (6)$$

Для показа алгоритма работы запросчика системы ВРЛ, представим модифицированное отношение правдоподобия (ОП) в виде

$$\Lambda = \frac{P(x_{11}) \sum_{P_1} P(y_2 | r_1) P(r_1 | x_{11})}{P(x_{10}) \sum_{P_1} P(y_2 | r_1) P(r_1 | x_{10})} = \frac{P(x_{11}) [P(y_2 | x_{20})(1 - P_o) + P(y_2 | x_{21}) P_o]}{P(x_{10}) [P(y_2 | x_{20})(1 - F_o) + P(y_2 | x_{21}) F_o]}, \quad (7)$$

где  $P_0 = P(r_{11} | x_{11})$  – вероятность излучения ответчиком сигнала при наличии запросного сигнала, т.е. коэффициент готовности ответчика [2],  $F_0 = P(r_{11} | x_{10})$  – та же вероятность при отсутствии запросного сигнала системы ВРЛ.

Таким образом, оптимальный обнаружитель сигналов запросчика в байесовом смысле должен для каждой принятой реализации формировать статистику (7), учитывающую качество работы ответчика, и сравнивать ее с порогом, величина которого полностью определяется заданными ценами решений. В дальнейшем этот процесс при обнаружении воздушной цели повторяется  $M$  раз и результат сравнивается с цифровым порогом.

Следовательно, необходимость учета на запросчике качества работы ответчика, а в ответчике – функции цен для системы ВРЛ в целом, является специфической особенностью, оптимальной по байесову критерию процесса обнаружения воздушной цели системой ВРЛ.

**Выводы.** Приведенное исследование показало, что повышение помехоустойчивости запросных систем ВРЛ можно достичь путем повышения коэффициента готовности ответчика (выражение (7)). Повышения коэффициента готовности ответчика можно достичь за счет изменения или принципа построения и или принципа обслуживания заявок, или принципа организации сети систем ВРЛ [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов П.С., Жаворонков В.П., Кащеев Г.В. Радиолокационные системы летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1977. – 345 с.
2. Обод И.И. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. – М.: ЦИИТ, 1998. – 118 с.
3. Теоретичні основи побудови заводозахисних систем інформаційного моніторингу повітряного простору / В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 271 с.
4. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. – М.: Сов. радио, 1962. – 467 с.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1966. – 456 с.

Поступила 13.01.2006

**Рецензент:** доктор технических наук, доцент Г.В. Ермаков,  
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.