

УДК 621.396.06

Д.А. Гриб¹, В.П. Голованов¹, А.Н. Артеменко²¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба²Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница

ОПОЗНАВАНИЕ ОБНАРУЖЕННЫХ ЦЕЛЕЙ В КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОПОЗНАВАНИЯ

Проведен синтез оптимального обнаружителя воздушных целей в комплексной системе радиолокационного опознавания при решении вопроса об обнаружении сигналов от каждого канала радиолокационного опознавания.

система радиолокационного опознавания, показатели качества, разрешающая способность

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы. Решения задач, поставленных перед Воздушными Силами, в значительной степени определяется информационным обеспечением, которое базируется на системах первичной радиолокации и системах радиолокационного опознавания (РЛО). Система РЛО решает задачу опознавания обнаруженных воздушных объектов как в интересах определения степени их опасности, так и при непосредственном применении оружия.

При автоматической обработке информации опознавание воздушных целей основано на обнаружении воздушных целей системой радиолокационного опознавания. На этапе первичной обработки информация от первичных РЛС и системы РЛО объединяется автоматически на координатном уровне [1]. Однако, построение современных систем РЛО на принципах обслуживания сигнала активного запроса, системы массового обслуживания с отказами и несинхронной сетью взаимодействия [2] позволяет противнику использовать их в своих целях. Таким образом, можно утверждать, что современные системы РЛО могут предоставлять противнику значительно больше информации, чем потребителям. Все это очень усложняет процесс обнаружения воздушных целей системой РЛО в случаях постановки противником преднамеренных коррелированных помех.

Однако, наличие на борту самолета ответчиков системы вторичной радиолокации (ВРЛ), канала индикации ближней навигации разрешает их использовать при прямом определении государственной принадлежности воздушных целей [1]. В связи с этим очевидна актуальность рассмотрения вопросов, связанных с автоматическим обнаружением воздушных целей комплексированной системой РЛО, в состав которой может быть включенная система РЛО и система ВРЛ.

Цель работы – синтез оптимального обнаружителя воздушных целей комплексированной системы радиолокационного опознавания.

Основная часть

Современные тенденции в развитии любых систем наблюдения состоят в комплексировании информации, получаемой разнородными средствами, работающими в различных спектральных диапазонах и на различных физических принципах [3]. Примером может служить комплексирование информации, поступающей от радио-, лазерных локационных, телевизионных, тепловизионных и тепловизионных средств в бортовых прицельно-навигационных системах, системах сбора и обработки информации различного назначения и т.д. Комплексирование информации в этих системах позволяет повысить качество принимаемых решений и соответствующие характеристики (вероятности обнаружения, распознавания, идентификации, точность измерения координат объектов и т.д.)

Особое значение комплексирование информации приобретает в условиях информационного конфликта, когда системе разведки одной стороны противостоит система разведки противоборствующей стороны и каждая из сторон имеет средства, препятствующие получению информации другой стороной. В этих условиях путем комплексирования различных средств разведки, с одной стороны, сохраняется возможность получения необходимой информации в том случае, когда часть средств подавлена противоположной стороной, а с другой – сокращается время, необходимое на получение информации с заданным качеством, чем обеспечивается упреждение противоборствующей стороны и выигрыш в информационном конфликте [4]. В связи с этим при исследовании эффективности комплексированных систем разведки, а также при определении стратегий противоборства с подобными системами целесообразно опираться на показатели, характеризующие не только качество (достоверность) получаемой информации, но и время, необходимое для получения информации с заданным качеством. С точки зрения сокращения времени, необходимого для решения задач разведки, стоящих перед теми или иными системами в информационном конфлик-

те, особое значение имеет этап поиска и обнаружения, поскольку подавляющее большинство систем разведки как в радио, так и в оптическом диапазонах длин волн в настоящее время являются сканирующими, а поиск объектов должен вестись в достаточно широком секторе (зоне неопределенности). В качестве показателей, характеризующих эффективность комплексированной системы разведки на этом этапе целесообразно использовать финальную вероятность успешного завершения поиска (правильного обнаружения цели).

Следовательно, при рассмотрении комплексированной системы РЛО в качестве показателя качества необходимо рассматривать вероятность обнаружения воздушного объекта системой в целом.

Обнаружитель воздушного объекта в обзорных системах наблюдения, к которым относится и система РЛО, состоит из обнаружителя сигналов, и собственно обнаружителя воздушного объекта, заключающегося в обнаружении пачки, предварительно обнаруженных сигналов.

В связи с этим обнаружитель воздушного объекта комплексированной системой РЛО может быть построен по следующим схемам:

- раздельное обнаружение воздушных объектов каждым из каналов опознавания, входящих в комплексированную систему РЛО и, в дальнейшем объединение предварительных решений;

- обнаружение сигналов каждым из каналов опознавания, входящих в комплексированную систему РЛО, объединение решений об обнаружении сигналов и, в дальнейшем обнаружение воздушных объектов.

Первый принцип построения несколько известен из существующей литературы. Второй же принцип, заключающийся в объединении решений обнаружения сигналов, недостаточно изучен. Остановимся на нем более подробно.

Будем рассматривать комплексированную систему РЛО, являющуюся, в общем случае, многоканальной. Каждый из каналов построен по принципу прямого опознавания и, следовательно, в состав их входит инерционный элемент – самолетный ответчик (СО), характеризующийся коэффициентом готовности СО (P_0).

В каждом из каналов комплексированной системы РЛО принимаемые сигналы после оптимальной линейной обработки и детектирования сравниваются в ПУ с порогом. После ПУ на дальнейшую обработку поступает реализация $x_i = 1$, если в элементе временного разрешения ($i = \overline{1, m}$), соответствующем анализируемому пространственному разрешению, произошло превышение порога; если же не произошло, то $x_i = 0$. Для принятия решения о наличии или отсутствии цели при совместной межканальной обработке подвергается совокупность нулей и единиц x_i . Очевидно, что x_i – случайная величина, подчиняющаяся распределению Бернулли

$$P(x_i) = (P_i P_{0i})^{x_i} (1 - P_i P_{0i})^{1-x_i}, \quad (1)$$

где P_i – вероятность превышения порога в i -м канале обработки; P_{0i} – коэффициент готовности самолетного ответчика в i -м канале. В отсутствие сигнала $P_i = F_i$ – вероятность ложной тревоги, а при воздействии сигнала $P_i = D_i$ – вероятность обнаружения.

Задачу оптимальной обработки сигналов можно рассматривать в различных постановках. Действительно в рассматриваемом обнаружителе возможно управление напряжением порога срабатывания выходного ПУ, а также напряжением порога канальных ПУ. Рассмотрим характеристики обнаружителя при управлении величиной порога только на выходном ПУ.

Предположим, что на вход устройства совместной обработки принимаемых сигналов поступает совокупность случайных величин x_i . Совместные распределения вероятностей всех возможных комбинаций x_i как в отсутствие, так и при наличии сигнала (гипотезы H_0 и H_1), т.е. $P(x_i|H_0)$ и $P(x_i|H_1)$ произвольны, но известны. Для каждой конкретной совокупности x_i сформируем отношение правдоподобия

$$\Lambda = P(x_i|H_1) / P(x_i|H_0). \quad (2)$$

Сравнение Λ с порогом, определенным по допустимой вероятности ложной тревоги, обеспечивает оптимальное по критерию Неймана-Пирсона решение о наличии или отсутствии сигнала.

Из-за независимости шумов в каналах обработки можно записать:

$$P(x_1, \dots, x_m | H_0) = \prod_{i=1}^m P(x_i | H_0) = \prod_{i=1}^m F_i^{x_i} (1 - F_i)^{1-x_i}. \quad (3)$$

Легко видеть, что при воздействии сигнала превышение порогов в каналах обработки – независимые события. Тогда можно записать

$$\begin{aligned} P(x_1, \dots, x_m | H_1) &= \prod_{i=1}^m P(x_i | H_1) = \\ &= \prod_{i=1}^m (P_{0i} D_i)^{x_i} [1 - (P_{0i} D_i)]^{1-x_i}. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) выражение (2) можно записать как

$$\Lambda = \frac{\prod_{i=1}^m (P_{0i} D_i)^{x_i} [1 - (P_{0i} D_i)]^{1-x_i}}{\prod_{i=1}^m F_i^{x_i} (1 - F_i)^{1-x_i}}. \quad (5)$$

Прологарифмировав (5) получаем

$$L = \ln \Lambda = \sum_{i=1}^m x_i \cdot A_i + (1 - x_i) \cdot B_i, \quad (6)$$

где $A_i = \ln(P_{0i} D_i) - \ln F_i$; $B_i = \ln[1 - (P_{0i} D_i)] - \ln(1 - F_i)$.

Если обозначить множители при x_i

$$Q_i = \ln(P_{0i} D_i) - \ln F_i - \ln[1 - (P_{0i} D_i)] +$$

$$+ \ln(1 - F_i) = \ln \left(\frac{(P_{0i} D_i)(1 - F_i)}{[1 - (P_{0i} D_i)] F_i} \right) \quad (7)$$

и относить слагаемые, не зависящие от X_i , получаем оптимальный по критерию Неймана-Пирсона алгоритм обнаружения при объединении предварительных решений всех каналов обработки комплексированной системы РЛО

$$L = \sum_{i=1}^m Q_i X_i \stackrel{?}{>} z_0, \quad (8)$$

где z_0 – порог, определяемый выходной вероятностью F .

Структурная схема обнаружителя сигналов в двухканальной комплексированной системе РЛО показана на рис. 1.

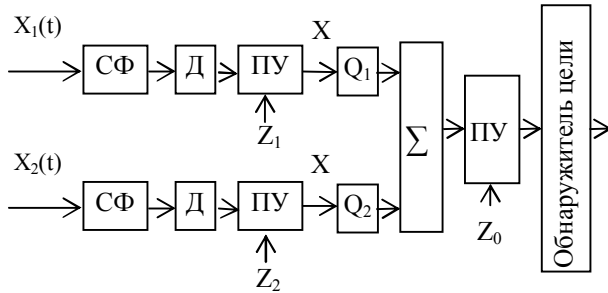


Рис. 1. Структура обнаружителя

Следовательно, оптимальная совместная обработка сигналов сводится к весовому суммированию единиц и нулей x_i , отражающих принятые в пассивном и активном каналах обработки предварительные решения. Весовые коэффициенты (7) повышают роль того канала, где выше вероятность D_i и ниже вероятность F .

Поскольку x_i , равны 0 или 1, то левая часть (8) представляет собой сумму $n < m$ весовых коэффициентов Q_i , а значит, может принимать лишь определенные дискретные значения. Значение порога z_0 в этом случае может лежать в пределах

$$0 < z_0 < \sum_{i=1}^m Q_i, \text{ чтобы, с одной стороны, не прини-}$$

малось всегда тривиальное решение об обнаружении, а с другой – тривиальное решение о необнаружении. Если все Q_i , различны и сумма любой группы Q_i не совпадает с суммой любой другой их группы, то при различных комбинациях значений x_i для рассматриваемого нами случая возможны три различных правила обнаружения.

При фиксированных вероятностях предварительных решений в каналах обработки F_i и D_i , разные решающие правила дают разные значения вероятностей F и D . Чтобы выбрать оптимальное правило, т.е. порог z_0 в (8), получим выражение для вероятностей ложной тревоги F и обнаружения D . Так как x_i подчиняются распределению Бернулли (1) с плотностью $W(x_i) = P_i \delta(x_i - 1) + (1 - P_i) \delta(x_i)$, то для случайной величины $z_i = Q_i x_i$ получим плотность вероятности и характеристическую функцию в виде

$$W(z_i) = P_i \delta(z_i - Q_i) + (1 - P_i) \delta(z_i); \\ \Theta(u) = P_i \exp(juQ_i) + (1 - P_i).$$

Характеристическая функция L – суммы независимых величин (8)

$$\Theta_L(u) = \prod_{i=1}^m \Theta_i(u) = \prod_{i=1}^m [P_i \exp(juQ_i) + (1 - P_i)]. \quad (9)$$

Обратное преобразование Фурье дает плотность вероятности L

$$W_L(u) = \prod_{i=1}^m (1 - P_i) \delta(z) + \sum_{k=1}^m \sum_{i_1=1}^{m-k+1} \dots \\ \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^m P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \delta \left(z - \sum_{r=1}^k Q_{i_r} \right) \prod_{j=1}^m (1 - P_j). \quad (10)$$

При изменении k от 1 до m кратность суммы в (10), в общем случае, также меняется от 1 до m . Так как нас интересует случай при $m = 2$, то получаем

$$W_L(u) = \prod_{i=1}^2 (1 - P_i) \delta(z) + \sum_{i_1=1}^2 P_{i_1} \delta(z - Q_{i_1}) \times \\ \times \prod_{j=1}^2 (1 - P_j) + P_{i_1} P_{i_2} \delta[z - (Q_{i_1} + Q_{i_2})]. \quad (11)$$

При этом заметим, что в одном из каналов обработки (во втором) присутствует КГ СО (в выражении (11) не показан).

Вероятность ложной тревоги или обнаружения получим, подставив в (11) F_i или D_i , и проинтегрировав его от z_0 до ∞ . Так как $z_0 > 0$, то первый член (11) не дает вклада в вычисляемый интеграл. То же относится ко всем членам, у которых в аргументе δ -функции $\sum_{r=1}^k Q_{i_r} < z_0$. Если большее ближайшее z_0

значение суммы весовых коэффициентов содержит n слагаемых и равно $\sum_{r=1}^k Q_{i_r}$, то вероятность превышения порога z_0 можно записать в виде

$$P = \sum_{k=n}^m \sum_{i_1=1}^{m-k+1} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^m P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \prod_{j=1}^m (1 - P_j). \quad (12)$$

Например, для нами рассматриваемого случая $m = 2$ выражение (12) можно записать, как $P = P_2(1 - P_1) + P_1 P_2$. По выражению (12) при заданных значениях F_i , D_i и P_{0i} можно вычислить выходные вероятности F и D для любого значения порога z_0 и соответствующего ему решающего правила. Чем больше z_0 (т.е. чем жестче решающее правило), тем меньше F и D . В табл. 1 приведены примеры оптимального алгоритма при различных вероятностях предварительных решений и результирующие значения F и D для решающего правила «1 из 2» и выполнении условия $Q_{\min} < z_0$. Результаты расчетов показывают влияние КГ СО на результирующие показатели качества обнаружения сигналов.

Таким образом, оптимизация обнаружения совместных сигналов комплексированной системы

РЛО сводится к выбору для совместной обработки одного из решающих правил, удовлетворяющих алгоритму (8) и к установке одинаковых относительных порогов в каналах комплексированной системы РЛО, обеспечивающих такие значения F_i , которые при выбранном решающем правиле дают требуемое значение результирующей вероятности F .

Таблица 1

F_1	D_1	P_0	F_2	D_2	P_0	Опт. алгоритм	F	D
10^{-2}	0,5	0,9	10^{-4}	0,8	0,9	$L_1=4,6x_1+10,15x_2$	10^{-4}	0,72
10^{-3}	0,6	0,95	10^{-4}	0,9	0,95	$L_2=7,3x_1+10,99x_2$	10^{-4}	0,86
10^{-4}	0,7	0,9	10^{-3}	0,95	0,9	$L_3=10,1x_1+8,1x_2$	10^{-4}	0,7
10^{-5}	0,8	0,95	10^{-5}	0,8	0,95	$L_4=12,9x_1+12,9x_2$	10^{-5}	0,76

В дальнейшем обнаруженные сигналы комплексированной системы РЛО (рис. 1) поступают на вход обнаружителя воздушных объектов.

Так как сигнал квантуется на два равных, то можно провести непосредственный синтез алгоритмов обнаружения воздушных объектов. Необходимые для этого статистические характеристики M -мерных выборок при наличии и отсутствии сигнала имеют следующий вид:

$$P_{cn}(x_i) = \prod_{i=1}^M P_{cn_i}^{x_i} (1 - P_{cn_i})^{(1-x_i)}; \quad (13)$$

$$P_n(x_i) = \prod_{i=1}^M P_{n_i}^{x_i} (1 - P_{n_i})^{(1-x_i)}, \quad (14)$$

где $P_{cn_i} = \int_{u_0}^{\infty} P_{cn}(u_i) du_i$; $P_{n_i} = \int_{u_0}^{\infty} P_n(u_i) du_i$;

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если } u_i \geq u_0; \\ 0, & \text{если } u_i < u_0. \end{cases}$$

Задача обнаружителя объекта состоит в том, чтобы на основе анализа последовательности нулей и единиц принять решение (оптимальным образом) о наличии или отсутствии объекта в принятой последовательности. Для решения этой задачи обнаружителем необходимо получить отношение правдоподобия и сравнить его с порогом, выбранным соответственно допустимой вероятности ложной тревоги. Используя выражение (13) и (14) функции правдоподобия для гипотез H_1 и H_0 можно записать следующим образом

$$L(x_i|H_1) = \prod_{i=1}^N P_{cn_i}^{x_i} (1 - P_{cn_i}^{x_i})^{1-x_i}; \quad (15)$$

$$L(x_i|H_0) = \prod_{i=1}^N P_{n_i}^{x_i} (1 - P_{n_i}^{x_i})^{1-x_i}, \quad (16)$$

где x_i – последовательность нулей и единиц, которые получаем с выхода ПУ обнаружителя сигналов.

Используя (15) и (16) отношения правдоподобия можно записать как

$$L(x_i) = \frac{L(x_i|H_1)}{L(x_i|H_0)}$$

$$= \prod_{i=1}^M \left(\frac{P_{cn}(x_i)}{P_n(x_i)} \right)^{x_i} \left(\frac{1 - P_{cn}(x_i)}{1 - P_n(x_i)} \right)^{1-x_i} \geq L_0. \quad (17)$$

Логарифмируя (17), преобразуя полученное выражение, получим

$$\sum_{i=1}^M x_i \eta_i \geq C, \quad (18)$$

где $\eta_i = \ln \frac{P_{cn}(x_i) [1 - P_{cn}(x_i)]}{P_n(x_i) [1 - P_n(x_i)]}$;

$$C = \ln L_0 - \sum_{i=1}^M \ln \frac{1 - P_{cn}(x_i)}{1 - P_n(x_i)}.$$

Таким образом, алгоритм оптимального обнаружения воздушной объекта (18) сводится к суммированию весовых коэффициентов η_i , обусловленных формой диаграмм направленности антенн комплексированной системы РЛО, что соответствует позициям пачки, где $x_i = 1$.

Выводы

Таким образом, характерной особенностью обнаружения воздушных объектов в комплексированной системе РЛО является наличия трех порогов. Первый порог устанавливается в пороговом устройстве обнаружения сигналов каждого из каналов комплексированной системы РЛО. Этот порог аналоговый и с помощью только его можно изменять условную вероятность ложной тревоги на выходе обнаружителя воздушного объекта. Второй порог устанавливается в пороговом устройстве при объединении сигналов, полученных от каждого канала комплексированной системы РЛО. Он может быть аналоговым, при реализации алгоритма (8) или дискретным, при реализации упрощенного алгоритма который не учитывает качество обнаружения объединенных сигналов. В первом случае удается реализовать три решающих правила, а во втором – только два. Третий порог устанавливается в пороговом устройстве обнаружителя воздушного объекта, который и является порогом обнаружения объекта. Он может быть только дискретным.

Список литературы

1. 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.
2. Обод И.И. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. – М.: ЦНТИ, 1998. – 119 с.
3. Новые средства разведки наземных целей // Иностранная печать. Сер. ТСП. – 1995. – № 8. – С. 37-41.
4. Дружинин В.В., Конторов Д.С., Конторов М.Д. Введение в теорию конфликта. – М.: Радио и связь, 1989. – 542 с.

Поступила в редколлегию 16.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.