

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ В СИНХРОННОЙ СЕТИ СИСТЕМ ПЕРВИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ С ТЕЛЕВИЗИОННЫМ ПОДСВЕТОМ

А.Д. Флоров, И.И. Обод, О.В. Гаврентюк, И.В. Коваль
(Харьковский университет Воздушных Сил)

Приводится сравнительный анализ потенциальных показателей качества обнаружения воздушных целей при двух подходах к построению автоматических обнаружителей воздушных целей в синхронной сети с телевизионным подсветом.

потенциальные показатели качества, воздушные цели, синхронная сеть

Постановка проблемы. Информационное обеспечение, базирующееся на системах первичной и вторичной радиолокации, в значительной степени определяет решение задач, стоящих перед Воздушными Силами. Однако последние военные конфликты показали, что первичный совмещенный радиолокатор превратился из информационного средства в источник опасности. Действительно, радиоразведка местоположения радиолокатора, как источника излучения зондирующих сигналов, из-за пределов его зоны видимости и нанесение огневого удара не оставляет шансов для радиолокатора. Основными методами защиты от огневого воздействия являются: снижение импульсной мощности излучаемых сигналов, путем перехода к сигналам с большой временной базой; использование методов разнесенной радиолокации.

Первый из методов не всегда применим в обзорных радиолокаторах, из-за требования значительного увеличения временной базы излучаемых сигналов. Во втором методе в качестве излучающего пункта можно использовать как отдельный передающий пункта, а также использовать сигналы внешнего подсвета, в качестве которых можно использовать излучения телевизионных передатчиков, передатчиков навигационных систем наземного и космического базирования и т.д.

Объединение ведомственных информационных средств в единую информационную сеть (ЕИС), как показано в [1], позволяет разрешить некоторые проблемы раздельного существования информационного обеспечения. Создание ЕИС немыслимо без рассмотрения вопросов автоматического обнаружения воздушных целей. Это касается и синхронных сетей систем первичной радиолокации с телевизионным подсветом.

Цель статьи – сравнительный анализ показателей качества обнаружения воздушных целей в синхронной сети систем первичной радиолокации с телевизионным подсветом при различной реализации автоматических обнаружителей-измерителей координат воздушных целей.

Основная часть. Рассмотрим синхронную сеть систем первичной радиолокации с телевизионным подсветом, состоящую из N телевизионных передатчиков, каждый из которых излучает m сигналов. На приемном пункте синхронной сети систем первичной радиолокации осуществляется синхронный прием возможных эхо-сигналов, вызванных каждым из $z = mN$ сигналов подсвета. Структура обнаружителя воздушных целей может быть двоякой. Первая: в каждом из каналов обработки осуществляется обнаружение воздушных целей, и затем межканальное объединение (первый вариант). Вторая: объединение сигналов каждого из каналов обработки и затем обнаружение воздушной цели по результатам межканального объединения сигналов (второй вариант).

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

$$P(x_{ij}) = P_{ij}^{x_{ij}} (1 - P_{ij})^{1-x_{ij}}, \quad (1)$$

где P_{ij} – вероятность превышения порога в i -м канале обработки. В отсутствие сигнала $P_{ij} = F_{ij}$ – вероятность ложной тревоги, а при воздействии сигнала $P_{ij} = D_{ij}$ – вероятность обнаружения.

Задачу 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_{ij} . Совместные распределения вероятностей всех возможных комбинаций x_{ij} как в отсутствие, так и при наличии сигнала (гипотезы H_0 и H_1), т.е.

$P(x_{ij}|H_0)$ и $P(x_{ij}|H_1)$ произвольны, но известны. Для каждой конкретной совокупности x_{ij} сформируем отношение правдоподобия

$$\Lambda = P(x_{ij}|H_1)/P(x_{ij}|H_0). \quad (1)$$

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

$$P(x_{11}, \dots, x_{mN}|H_0) = \prod_{i=1, j=1}^{m, N} P(x_{ij}|H_0) = \prod_{i=1, j=1}^{m, N} F_{ij}^{x_{ij}} (1 - F_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (2)$$

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

$$P(x_{11}, \dots, x_{mN}|H_1) = \prod_{i=1, j=1}^{m, N} P(x_{ij}|H_1) = \prod_{i=1, j=1}^{m, N} D_{ij}^{x_{ij}} (1 - D_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) выражение (1) можно записать как

$$\Lambda = \prod_{i=1, j=1}^{m, N} D_{ij}^{x_{ij}} (1 - D_{ij})^{1-x_{ij}} / \prod_{i=1, j=1}^{m, N} F_{ij}^{x_{ij}} (1 - F_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (4)$$

Прологарифмировав (4), получаем

$$L = \ln \Lambda = \sum_{i=1, j=1}^{m, N} x_{ij} (\ln D_{ij} - \ln F_{ij}) + (1 - x_{ij}) [\ln(1 - D_{ij}) - \ln(1 - F_{ij})]. \quad (5)$$

Если обозначить множители при x_{ij}

$$Q_{ij} = \ln D_{ij} - \ln F_{ij} - \ln(1 - D_{ij}) + \ln(1 - F_{ij}) = \ln(D_{ij}(1 - F_{ij}) / (1 - D_{ij})F_{ij}) \quad (6)$$

и отбросить слагаемые, не зависящие от x_{ij} , получаем оптимальный по критерию Неймана-Пирсона алгоритм обнаружения при объединении предварительных решений всех каналов обработки посадочного радиолокатора

$$L = \sum_{i=1, j=1}^{m, N} Q_{ij} x_{ij} \stackrel{>}{<} z_0, \quad (7)$$

где z_0 – порог, определяемый вероятностью F .

Следовательно, совместная обработка сигналов сводится к весовому суммированию единиц и нулей x_{ij} , отражающих принятые в пассивном и активном каналах обработки предварительные решения. Весовые коэффициенты (6) повышают роль того канала обработки, где выше вероятность D_{ij} и ниже вероятность F . Вышеизложенное позволяет изобразить структуру обнаружителя в виде, представленном на рис. 1.

Поскольку x_{ij} равны 0 или 1, то левая часть (7) представляет собой сумму $n < mN$ весовых коэффициентов Q_{ij} , а значит, может принимать лишь определенные дискретные значения. Значение порога z_0 в этом случае может лежать в пределах $0 < z_0 < \sum_{i=1, j=1}^{m, N} Q_{ij}$, чтобы, с одной стороны, не принималось всегда тривиальное решение об обнаружении, а с другой – тривиальное решение о необнаружении. Если все Q_{ij} различны и сумма любой группы Q_{ij} не совпадает с суммой любой другой их группы, то при различных комбинациях значений x_{ij} для рассматриваемого случая возможны три различных правила обнаружения.

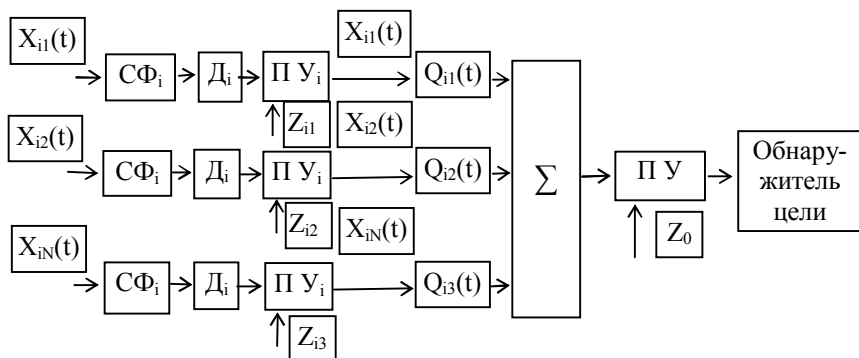


Рис. 1. Структура обнаружителя

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 (7), получим выражения для вероятностей ложной тревоги F и обнаружения D . Так как x_{ij} подчиняются распределению Бернулли (1) с плотностью $W(x_{ij}) = P_{ij}\delta(x_{ij} - 1) + (1 - P_{ij})\delta(x_{ij})$, то для случайной величины $z_{ij} = Q_{ij}x_{ij}$ получим плотность вероятности и характеристическую функцию в виде $W(z_{ij}) = P_{ij}\delta(z_{ij} - Q_{ij}) + (1 - P_{ij})\delta(z_{ij})$; $\Theta(u) = P_{ij} \exp(juQ_{ij}) + (1 - P_{ij})$.

Характеристическая функция L – суммы независимых величин (7)

$$\Theta_L(u) = \prod_{i,j=1}^{m,N} \Theta_{ij}(u) = \prod_{i,j=1}^{m,N} [P_{ij} \exp(juQ_{ij}) + (1 - P_{ij})]. \quad (8)$$

Обратное преобразование Фурье дает плотность вероятности L

$$W_L(u) = \prod_{i,j=1}^{m,N} (1 - P_{ij}) \delta(z) + \sum_{k=1}^z \sum_{i_1=1}^{z-k+1} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^z P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \delta(z - \sum_{r=1}^k Q_{i_r}) \prod_{j=1}^z (1 - P_j). \quad (9)$$

При изменении k от 1 до z кратность суммы в (9), в общем случае, также меняется от 1 до z . Подставив в (9) F_i или D_i , и проинтегрировав его от z_0 до ∞ получаем вероятность ложной тревоги или обнаружения. 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

$$P = \sum_{k=n}^z \sum_{i_1=1}^{z-k+1} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^z P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \prod_{j=1}^z (1 - P_j). \quad (10)$$

Если $F_1 = \dots F_z = F_0$ и $D_1 = \dots D_z = D_0$, то $Q_1 = \dots Q_z$ и для алгоритма (10) можно записать

$$P = \sum_{n=k}^z C_m^n \tilde{P}^n (1 - \tilde{P})^{z-n}. \quad (11)$$

По выражениям (10) и (11) при заданных значениях F_i , D_i 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 . Алгоритм (11), оптимальный при $Q_1 = \dots Q_z$, несколько проще, чем (10), так как не требует анализа в каждом канале вероятностей F_i и D_i и вычисления Q_i .

Таким образом, оптимизация совместного обнаружения сигналов в ЕИС сводится к выбору для совместной обработки одного из решающих правил, удовлетворяющих алгоритму (7) и к установке одинаковых относительных порогов во всех каналах приема эхо-сигналов, обеспечивающих такие значения F_i , которые при выбранном решающем правиле дают требуемое значение результирующей вероятности F .

С выхода обнаружителя совместных сигналов последовательность нулей и единиц поступает на входы обнаружителя цели (рис. 1). Обнаружение воздушной цели осуществляется путем анализа пачки бинарно-квантованных импульсов в соответствии с алгоритмом

$$P_{ц} = \sum_{i=k}^M C_M^i P^i (1 - P)^{M-i}, \quad (12)$$

где k – порог обнаружения воздушной цели, выбираемый, как правило, равным половине числа импульсов в пачке M .

Результаты расчета условной вероятности правильного обнаружения воздушной цели при $N = 2$, $m = 2$, $M = 12$ и $F_{ц} = 10^{-6}$ представлены на рис. 2.

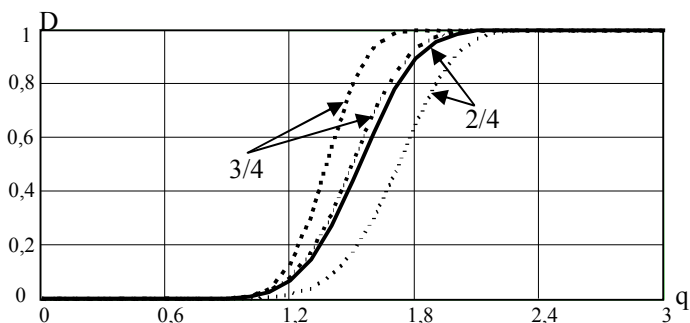


Рис. 2. Кривые вероятностей правильного обнаружения

На этом же рисунке представлены и кривые обнаружения при реализации автоматического обнаружителя воздушных целей в соответствии с первым вариантом. Сравнительный анализ представленных зависимостей показывает, что выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум предложенного обнаружителя воздушных целей (второй вариант) достигает $\approx 0,8$ дБ по сравнению с обнаружителем, выполненным в соответствии с первым вариантом.

Выводы. Сравнительный анализ показателей качества обнаружения воздушных целей позволяет сделать вывод, что при построении автоматических обнаружителей воздушных целей в многопозиционных радиолокационных системах с внешним подсветом (в том числе и телевизионным), включенных в единую информационную сеть, более предпочтительно всеобщее объединение результатов обнаружения на сигнальном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткачев В.В., Даник Ю.Г., Жуков С.А., Обод І.І., Романенко І.О. Теоретичні основи побудови заводозахисних систем інформаційного моніторингу повітряного простору. – К.: МО України, 2004. – 271 с.

Поступила 4.03.2005

Рецензент: доктор технических наук профессор Ю.Г. Даник,
Национальная академия обороны Украины, Киев.