

УДК 621.321.96

Д.В. Фоменко, В.В. Лукьянчук, А.А. Зверев

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ НА ФОНЕ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ ДЛЯ РЛС С ПОЛНЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВА НА ДВУХ ЧАСТОТАХ

В статье рассматривается комбинированный алгоритм обнаружения целей на фоне активных шумовых помех для РЛС с полным поляризационным зондированием пространства на двух частотах. Предложенный алгоритм синтезирован на основе поляризационно-статистического алгоритма обнаружения, последовательного алгоритма Вальда и особенностей метода полного поляризационного зондирования пространства на двух частотах.

полное поляризационное зондирование, процедура обнаружения

Введение

Постановка проблемы. Из анализа уровня развития средств радиоэлектронного подавления следует, что в зоне действия РЛС может быть создана сложная помеховая обстановка, в которой решение задач поиска, обнаружения и т.д. может быть выполнено с превышением временного баланса, отведенного на решение данных задач.

В связи с этим возникает задача повышения помехозащищенности РЛС с целью обеспечения требуемых показателей обнаружения целей в условиях воздействия мощных активных шумовых помех (АШП), в том числе и по основному лепестку диаграммы направленности антенной системы, без нарушения временной диаграммы работы РЛС.

Анализ литературы. Вопросам повышения помехозащищенности РЛС за счет использования поляризационной обработки сигналов посвящено достаточно большое количество работ [1 – 4]. В условиях отсутствия пространственных, временных и частотных различий сигналов и помех в [3, 4] показано, что для повышения качественных показателей обнаружения РЛС целесообразно применение в них метода полного поляризационного зондирования пространства (ППЗП), предполагающего излучение двух сложных ортогональных по поляризационной и внутренней структуре сигналов и прием сигналов на ортогональных поляризациях.

Разработанные для РЛС с ППЗП алгоритмы обнаружения целей на фоне активных помех не учитывают возможные временные ограничения на ее работу в сложной помеховой обстановке [3 – 6].

В данных условиях, как показали исследования, целесообразно:

- для повышения помехозащищенности РЛС поляризационного зондирования пространства (ППЗП);
- для минимизации временных затрат – двухэтапную адаптивную процедуру обнаружения целей.

Цель статьи. Разработка комбинированного алгоритма обнаружения целей на фоне АШП, реализующего двухэтапную адаптивную процедуру обнаружения для РЛС с ППЗП в условиях ограниченного временного баланса.

Основная часть

Двухэтапная адаптивная процедура обнаружения предполагает использование на каждом из этапов различных алгоритмов обнаружения целей. На первом этапе необходимо решить задачу максимально быстрого просмотра всего сектора ответственности РЛС с низким порогом обнаружения (заданная ложная тревога) и выделения направлений возможного наличия цели. На втором этапе – произвести просмотр только выделенных направлений с использованием энергоемких процедур обнаружения, обеспечивающих требуемые показатели обнаружения.

Адаптивность процедуры предполагает изменение несущей частоты зондирования пространства в зависимости от результатов предыдущего зондирования, т.е. возникает необходимость использования в РЛС ППЗП на двух частотах.

Для выбора алгоритма обнаружения каждого этапа рассмотрим известные алгоритмы обнаружения целей на фоне АШП при использовании метода полного поляризационного зондирования пространства, обладающие данными характеристиками.

В качестве таких алгоритмов обнаружения целесообразно использовать в РЛС с ППЗП на двух частотах следующие:

- поляризационно-статистический алгоритм;
- последовательный алгоритм Вальда.

Рассмотрим особенности реализации последовательного алгоритма Вальда в РЛС с ППЗП на двух частотах. Задачу обнаружения цели сформулируем как задачу проверки двух гипотез. В качестве гипотезы H_1 будем полагать наличие в элементе разре-

шения цели, АШП и шума, а для гипотезы H_0 – только АШП и шума.

Будем считать, что зондирование пространства осуществляется РЛС с ППЗП на двух частотах таким образом, что за время наблюдения одного углового направления производится N измерений входного четырехмерного поляризационного вектора рассеяния (ПВР) $\dot{\mathbf{Y}}(t_i)$:

$$\dot{\mathbf{Y}}(t_i) = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{Y}}_1(t_i) \\ \dot{\mathbf{Y}}_2(t_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_c \cdot \dot{\mathbf{S}}_1(t_i) + \dot{\mathbf{n}}_1(t_i) + \dot{\xi}_1(t_i) \\ \gamma_c \cdot \dot{\mathbf{S}}_2(t_i) + \dot{\mathbf{n}}_2(t_i) + \dot{\xi}_2(t_i) \end{pmatrix}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где $\dot{\mathbf{Y}}_j(t_i)$ – элементы входного двумерного ПВР на j -й частоте зондирования; $\dot{\mathbf{S}}_j(t_i)$ – двумерный поляризационный вектор сигнала на j -й частоте зондирования; $\dot{\mathbf{n}}_j(t_i)$ – двумерный поляризационный вектор АШП на j -й частоте зондирования; $\dot{\xi}_j(t_i)$ – двумерный вектор собственных шумов на j -й частоте зондирования; γ_c – признак наличия либо отсутствия сигнала в элементе разрешения, причем $\gamma_c=1$ при условии наличия сигнала и $\gamma_c=0$ в противном случае.

Полагаем, что частота зондирования РЛС с ППЗП на двух частотах такова, что соседние по времени отсчеты ПВР $\dot{\mathbf{Y}}(t_i)$ независимы. Закон распределения элементов ПВР $\dot{\mathbf{Y}}(t_i)$ считаем многомерным нормальным. Ковариационно-поляризационные матрицы (КПМ) для гипотез H_1 и H_0 имеют вид:

$$\dot{\mathbf{M}}_0 = \dot{\mathbf{M}}_c + \dot{\mathbf{M}}_{ш}; \quad \dot{\mathbf{M}}_1 = \dot{\mathbf{M}}_c + \dot{\mathbf{M}}_{п} + \dot{\mathbf{M}}_{ш}; \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{M}}_{п}$ – КПМ АШП; $\dot{\mathbf{M}}_c$ – КПМ цели; $\dot{\mathbf{M}}_{ш}$ – КПМ внутренних шумов.

КПМ, входящие в (2), считаем известными. В частности, КПМ цели можно получить расчетным или экспериментальным путем, а КПМ АШП можно оценить в пределах каждого углового направления, как результат усреднения входного ПВР по пространству и времени.

Выражения для плотностей вероятностей входного ПВР, отсчитываемых в некоторый момент времени t_i , соответствующих гипотезам H_0 и H_1 , имеют вид

$$P_0(\dot{\mathbf{Y}}_i) = \left((2\pi)^n |\dot{\mathbf{M}}_0| \right)^{-1/2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\dot{\mathbf{Y}}_i - \dot{\mu}_0)^* \dot{\mathbf{M}}_0^{-1} (\dot{\mathbf{Y}}_i - \dot{\mu}_0) \right\}; \quad (3)$$

$$P_1(\dot{\mathbf{Y}}_i) = \left((2\pi)^n |\dot{\mathbf{M}}_1| \right)^{-1/2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\dot{\mathbf{Y}}_i - \dot{\mu}_1)^* \dot{\mathbf{M}}_1^{-1} (\dot{\mathbf{Y}}_i - \dot{\mu}_1) \right\}. \quad (4)$$

Логарифм отношения правдоподобия (достаточная статистика) при условии, что отношение сигнал-помеха $q_{с/п} \ll 1$ и отношении сигнал-шум $q_{с/ш} \gg 1$, имеет следующий вид:

$$v_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[\ln \frac{|\dot{\mathbf{M}}_0|}{|\dot{\mathbf{M}}_1|} - \dot{\mathbf{Y}}_i^* (\dot{\mathbf{M}}_1^{-1} - \dot{\mathbf{M}}_0^{-1}) \dot{\mathbf{Y}}_i \right]. \quad (5)$$

Решающее правило состоит в сравнении на каждом i -м зондировании разрешаемого объема (РО) логарифма отношения правдоподобия с порогами:

$$v_i < \begin{cases} A_1 = \ln \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_2}; \\ A_0 = \ln \frac{\varepsilon_1}{1-\varepsilon_2}, \end{cases} \quad (6)$$

где A_1 и A_0 – пороги обнаружения [4]; v – достаточная статистика; ε_1 и ε_2 – ошибки первого и второго рода, соответственно.

Если $v_i \geq A_1$ или $v_i \leq A_0$, то принимается решение о наличии или отсутствии в данном РО цели. Далее осуществляется переход к зондированию следующего РО. В противном случае ($A_1 > v_i > A_0$), продолжается зондирование данного РО.

Рассмотрим особенности реализации поляризационно-статистического алгоритма обнаружения целей [6] в РЛС с ППЗП на двух частотах.

Физическая сущность поляризационно-статистического алгоритма основывается на факте изменения области локализации (ОЛ) входного ПВР в некотором РО по сравнению с ОЛ входного ПВР соответствующей наличию в РО АШП.

Выражение для решающей статистики, соответствующей s -му РО (v_s), имеет вид

$$v_s = \ln \left(\dot{\mathbf{Y}}_i^* \cdot \dot{\mathbf{M}}_0^{-1} \cdot \dot{\mathbf{Y}}_i \right), \quad (7)$$

где $\dot{\mathbf{Y}}_i$ – входной ПВР; $\dot{\mathbf{M}}_0^{-1}$ – обратная ковариационно-поляризационная матрица АШП; $*$, T – знаки комплексного сопряжения и транспонирования, соответственно.

Решающее правило имеет вид:

$$v_s \geq \ln(C), \quad (8)$$

где C – адаптивный порог обнаружения.

При выполнении условия (8) принимается решение о возможном наличии в РО цели.

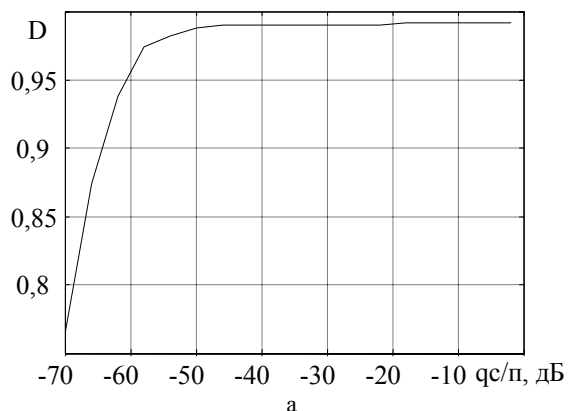
Адаптивный порог обнаружения определяется следующим образом

$$C = m_v + k\sqrt{D_v}, \quad (9)$$

где m_v, D_v – математическое ожидание и диспер-

сия достаточной статистики; k – статистический коэффициент.

Анализ эффективности рассмотренных алгоритмов обнаружения проводился методом математического моделирования. При моделировании предполагалось, что в зоне действия РЛС с ППЗП на двух частотах находится воздушный объект типа “СРЭМ” и АШП с углом эллиптичности 45 град и индексом поляризации 0,5 [3]. При этом отношение сигнал-шум $q_{с/ш} = 20$ дБ, отношение сигнал-помеха $q_{с/п}$ изменялось в пределах от –70 дБ до 0 дБ.



Результаты моделирования для последовательного алгоритма обнаружения Вальда приведены на рис. 1 в виде зависимостей вероятности правильного обнаружения (D) и среднего числа тактов для принятия решений о наличии и отсутствии цели в РО, соответственно N_0 и N_1 , от отношения сигнал-помеха при фиксированных параметрах АШП.

На рис. 2 приведены результаты моделирования для поляризационно-статистического алгоритма в виде зависимостей вероятностей правильного обнаружения (D) и ложной тревоги (F) от отношения сигнал-помеха.

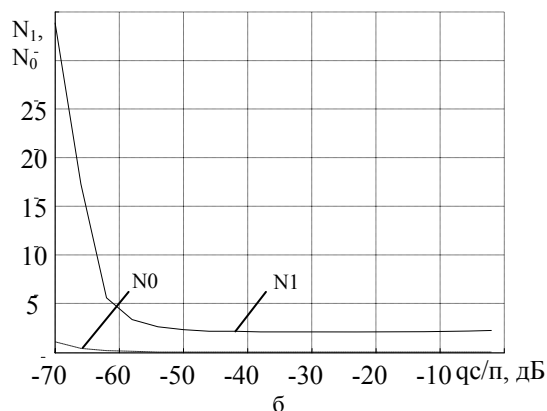


Рис. 1. Показатели обнаружения при использовании последовательного алгоритма Вальда

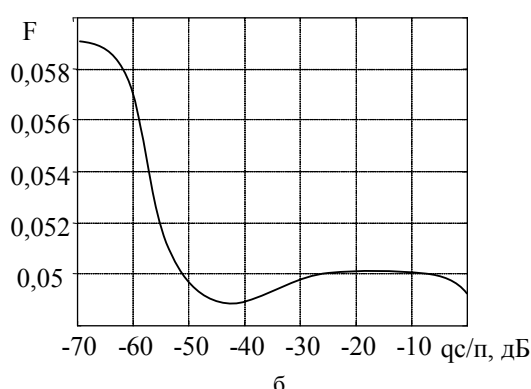
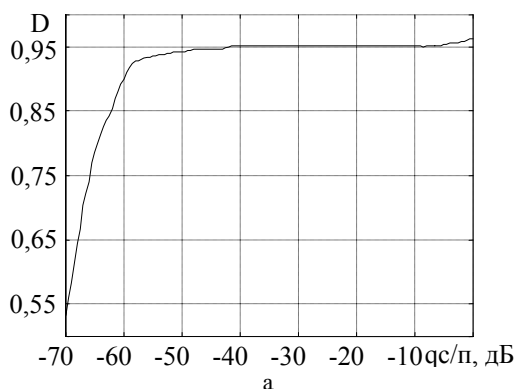


Рис. 2. Показатели обнаружения при использовании поляризационно-статистического алгоритма

Анализ приведенных на рис. 1, 2 зависимостей показывает, что при отношении сигнал-помеха $q_{с/п} = -66$ дБ использование последовательного алгоритма Вальда обеспечивает обнаружение целей на фоне АШП с вероятностью правильного обнаружения равной 0,87 и постоянным уровнем ложной тревоги при $N_1 = 17$ зондированиях РО, а поляризационно-статистический алгоритм обнаружения – с вероятностью правильного обнаружения, равной 0,74 и ложной тревогой, равной 0,59 при однократном зондировании РО.

Таким образом, для обеспечения работы РЛС с ППЗП на двух частотах в пределах заданного временного баланса целесообразно использовать двух-

этапную процедуру обнаружения, реализованную комбинированным алгоритмом обнаружения. На первом этапе предлагается использовать поляризационно-статистический алгоритм обнаружения для однократного просмотра каждого углового направления и выделения РО с неоднородностями ОЛ входного ПВР. На втором этапе в выделенных РО – последовательный алгоритм Вальда. При этом необходимое число зондирований определяется с учетом временной диаграммы работы для обеспечения требуемых показателей обнаружения целей в пределах всего сектора ответственности.

Структурная схема комбинированного алгоритма обнаружения целей на фоне АШП для РЛС с ППЗП на двух частотах представлена на рис. 3.

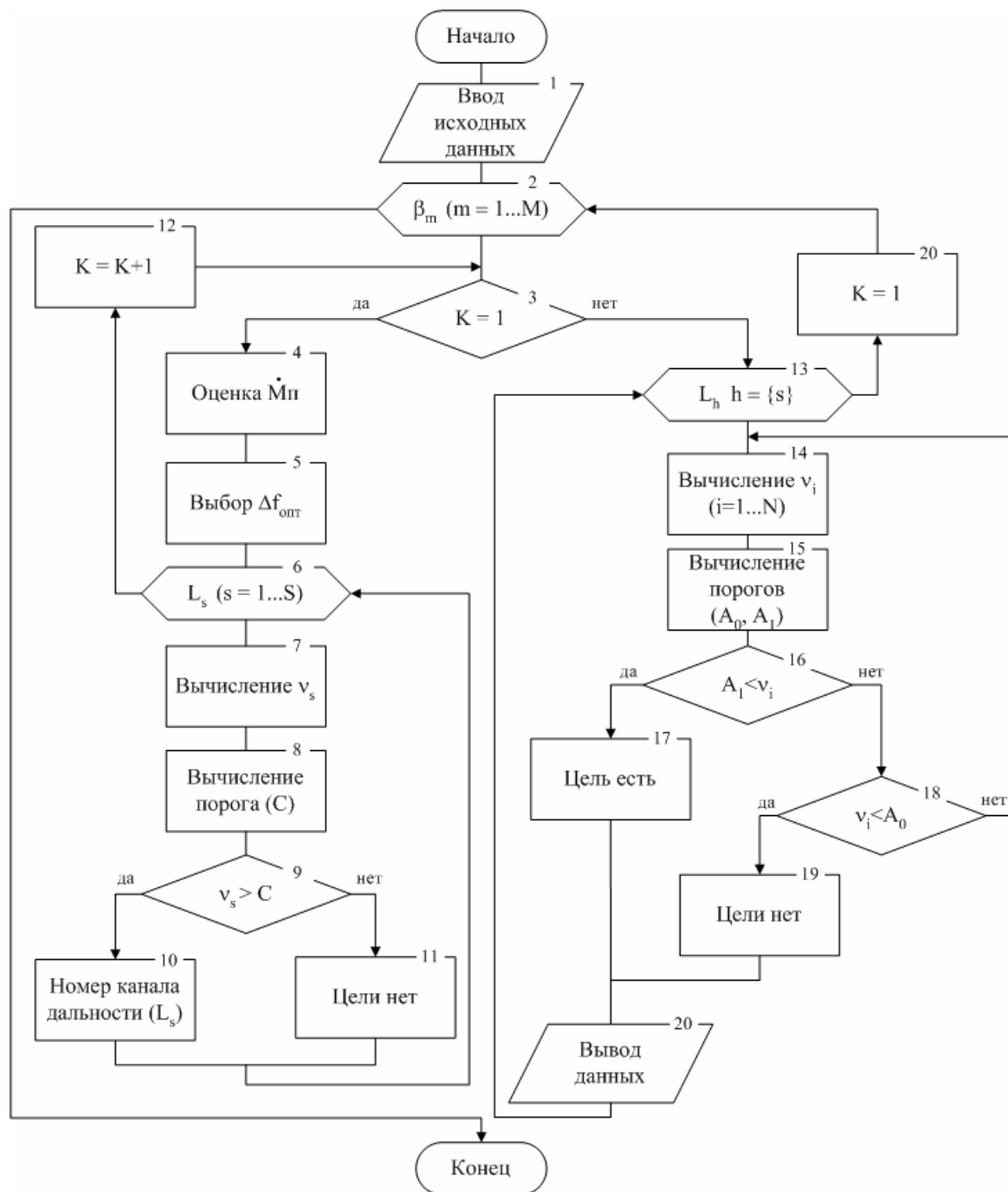


Рис. 3. Структурная схема комбинированного алгоритма обнаружения целей в условиях воздействия АШП

При сканировании каждого углового направления β_m , число которых M определяется размерами сектора ответственности РЛС с ППЗП на двух частотах, шириной диаграммы направленности антенной системы и шагом перемещения луча, алгоритм предусматривает выполнение следующих основных действий:

- рекуррентную оценку КМ АШП $\dot{M}_n$ в каждом из азимутальных направлении (блок 4);
- выбор разности несущих частот, согласно методики [7], для обеспечения оптимальных параметров ППЗП на двух частотах (блок 5);

– обзор всех РО (L) с использованием поляризационно-статистического алгоритма (выражение 8) (блоки 6 – 8);

– выделение РО (L_s), в которых обнаружены неоднородности ОЛ входного ПВР, т.е. возможно наличие цели (блоки 9, 10);

– применение в выделенных РО L_s , последовательного алгоритма обнаружения Вальда (выражения 5, 6) (блоки 13 – 16);

– принятие решения о наличии либо отсутствии цели с заданными показателями обнаружения и выдача требуемой информации потребителям (блоки 17 – 20).

Вывод

Применение предложенного комбинированного алгоритма обнаружения целей на фоне активных шумовых помех в РЛС с полным поляризационным зондированием пространства на двух частотах, реализующего двухэтапную адаптивную процедуру обнаружения, позволит не только обеспечить приемлемые показатели обнаружения в сложной помеховой обстановке, но и эффективно использовать временной баланс РЛС.

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы: Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО “МАКВИС”, 1998. – 828 с.
2. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам. – Одесса: ОИУМ, 1999. – 230 с.
3. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
4. Родимов А.П., Поповский В.В. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
5. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю.И. Лосев, А.Г. Бердников, Э.Ш. Гойхман, Б.Д. Сизов / Под ред. Ю.И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
6. Мартынчук А.А., Логинов А.И. Адаптивный параметрический алгоритм обнаружения флюктуирующего сигнала на фоне частично-поляризованной активно-шумовой помехи в РЛС с полным поляризационным приемом // Сборник докладов 1 НПК ЖНИИРС. – Житомир: ЖНИИРС, 1994. – С. 14-22.
7. Ботов М.Ф., Флоров О.Д., Мартынчук А.А., Лукьянчук В.В., Харченко А.И., Фоменко Д.В. Методика выбора разности несущих частот двух простых сигналов при полном поляризационном зондировании пространства // Системы обробки інформації. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 11(39). – С. 23-32.

Поступила в редколлегию 6.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.А. Демидов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

