

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛИ  
НА ФОНЕ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ  
ПРИ АДАПТАЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО БАЗИСА РЛС  
С ПОЛНЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ ПРО-  
СТРАНСТВА**

А.А. Бортновский, А.Б. Скорик  
(представил д.в.н., проф. А.Н. Шмаков)

*Рассматривается задача повышения эффективности обнаружения целей в условиях воздействия активных шумовых помех за счет управления поляризационным базисом антенной системы РЛС с полным поляризационным зондированием пространства на излучение и прием.*

**Постановка проблемы.** В современных условиях одними из основных требований, предъявляемых к радиолокационным станциям, являются высокая помехозащищенность, обеспечение режимов адаптации и оптимизации зондирования, исходя из решаемых задач в конкретных условиях помеховой обстановки. В условиях воздействия активных шумовых помех (АШП), как по основному, так и по боковым лепесткам диаграммы направленности антенной системы, и несущественных пространственных и спектральных различиях сигналов и помех, существенно затрудняется обнаружение целей с требуемыми показателями качества. Таким образом, представляет интерес исследование возможностей повышения эффективности обнаружения целей в данных условиях за счет оптимизации поляризационных параметров антенной системы РЛС с полным поляризационным зондированием пространства.

**Анализ литературы.** Методам поляризационной обработки входных сигналов посвящено достаточно большое количество работ. Помехозащищенность радиолокационных средств повышается при обработке векторных по поляризации сигналов, составленных из элементов поляризационных матриц рассеяния целей и помех [1, 2]. Для повышения эффективности подавления помех предлагается оптимизировать поляризационные параметры полезного сигнала [2, 3]. Оптимальное подавление помехи получается при условии, что поляризации антенны на передачу и прием адаптируются отдельно [3]. Однако при этом используется только полный поляризационный прием.

Существенные же различия между сигналами и помехами наблю-

даются при использовании метода полного поляризационного зондирования (ППЗ), основанного на излучении двух ортогональных по структуре сложных сигналов на взаимно ортогональных поляризациях и полном поляризационном приеме каждого из сигналов, при котором улучшение отношения сигнал-помеха достигается за счет подавления помех с помощью поляризационной фильтрации [4].

Дальнейшее улучшение помехозащищенности следует ожидать за счет управления параметрами поляризационного базиса антенной системы РЛС с полным поляризационным зондированием пространства.

**Цель статьи.** Повышение эффективности обнаружения целей на фоне АШП большой интенсивности и недостаточных пространственных, частотных, временных различиях за счет использования адаптации поляризационных параметров базиса антенной системы РЛС с полным поляризационным зондированием пространства.

**Основной материал.** Процесс подавления помех и обнаружения сигнала можно рассматривать как единый этап обработки входных информационные векторов. Под входным информационным вектором понимается поляризационный вектор  $\vec{S}$ , элементами которого являются комплексные элементы поляризационной матрицы рассеивания (ПМР)  $\dot{S}$ , измеренной в некотором поляризационном базисе (ПБ).

На измерение поляризационного вектора рассеяния (ПВР) воздействует большое число независимых случайных величин, следовательно, по центральной предельной теореме,  $n$ -мерная плотность распределения  $P(\dot{S})$  приближается к нормальному распределению

$$P(\vec{S}) = (2\pi|\dot{M}|)^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2}(\vec{S}-\vec{m})^T \dot{M}^{-1}(\vec{S}-\vec{m})\right), \quad (1)$$

где  $\vec{m}$  – вектор средних значений;  $\dot{M}^{-1}$  – матрица, обратная ковариационной матрице  $\dot{M}$ , при этом  $|\dot{M}| \neq 0$ .

Выборки нормально распределенного случайного вектора имеют тенденцию попадать в одну область [5]. Центр этой области определяется вектором средних значений  $\vec{m}$ , а форма – ковариационной матрицей  $\dot{M}$ . Из соотношения (1) следует, что элементы случайного вектора  $\vec{S}$  образуют  $n$ -мерный эллипсоид равной плотности вероятностей с уравнением

$$(\vec{S}-\vec{m})^T \dot{M}^{-1}(\vec{S}-\vec{m}) \leq d^2, \quad d > 0. \quad (2)$$

Главные оси этого эллипсоида задаются собственными векторами ко-

вариационно-поляризационной матрицы (КПМ), а длины полуосей – ее собственными значениями [5, 6]. Все это позволяет ввести в рассмотрение область локализации [7], отражающую основные статистические свойства ПВ как случайных векторов. Задача обнаружения цели формулируется как задача проверки гипотезы о наличии в элементе разрешения помехи и шума ( $H_0$ ), и альтернативной – помехи, шума и обнаруживаемой цели ( $H_1$ ). Будем полагать, что РЛС осуществляет полное поляризационное зондирование (ППЗ) пространства сложными сигналами, ортогональными как по поляризации, так и по внутренней структуре, с возможностью управления поляризационным базисом передающей антенны. Входной поляризационный вектор рассеяния в момент времени  $t_i$  можно представить в виде

$$\vec{S} = \alpha \vec{S}_c + \vec{S}_n + \vec{\xi}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – параметр, учитывающий факт наличия цели ( $\alpha = 0$  при  $H_0$ ;  $\alpha = 1$  при  $H_1$ );  $\vec{S}_c$  – ПВР цели;  $\vec{S}_n$  – ПВР помехи;  $\vec{\xi}$  – комплексный вектор собственных шумов каналов приема РЛС с полным поляризационным зондированием.

Предположим, что на РЛС воздействует помеха, мощность которой превышает мощность отраженного сигнала и внутренних шумов, т.е. выполняются следующие соотношения ( $\text{Sp} \dot{M}$  – след матрицы  $\dot{M}$ ):

$$q_{c/n}^2 = \text{Sp} \dot{M}_c / \text{Sp} \dot{M}_n \ll 1; \quad q_{n/sh}^2 = \text{Sp} \dot{M}_n / \text{Sp} \dot{M}_{sh} \gg 1. \quad (4)$$

В случае стационарности помехи на интервале наблюдения и заданных ограничениях поляризационно-статистические параметры отдельных разрешаемых объемов  $\dot{M}_n$  по дальности будут незначительно отличаться от соответствующих параметров ковариационно-поляризационной матрицы (КПМ), усредненной по всей совокупности разрешаемых объемов  $j = \overline{1, L}$ . Исключая влияние полезного сигнала на оценку КПМ помехи [8], получим, что КПМ, соответствующие обоим гипотезам  $H_0$  и  $H_1$ , соответственно равны:

$$\dot{M}_0 = \dot{M}_n + \dot{M}_{sh}; \quad \dot{M}_1 = \dot{M}_c + \dot{M}_n + \dot{M}_{sh}. \quad (5)$$

Оценка КПМ происходит путем адаптивного оценивания по пространству и времени одного углового направления. Можно записать оценку КПМ на  $i$ -й временной отсчет

$$\hat{M} = \frac{1}{2(TL-1)} \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^L \vec{S}_{nij} \vec{S}_{nij}^*, \quad (6)$$

где  $T, L$  – размеры "скользящего окна" по времени и пространству, определяемые интервалами стационарности параметра помехи.

Вследствие влияния шумов приемных устройств КПМ помехи

предполагается невырожденной.

Так как наличие сигнала и помехи в анализируемом элементе разрешения приводит к изменению параметров ОЛ поляризационного вектора (3), значит, возможно решение задачи обнаружения цели на фоне АШП. Для ее решения предполагается использовать критерий Неймана-Пирсона [8, 9], обеспечивающего при заданном ограничении вероятности ложной тревоги  $F$  максимум вероятности правильного обнаружения  $D$ . Считаем, что условные плотности распределения вероятностей независимых ПВР при наличии и отсутствии сигнала описываются нормальными законами:

$$\begin{aligned} P_1(\vec{S}) &= \left( (2\pi) |\dot{M}_1| \right)^{-1/2} \exp \left\{ -1/2 \cdot \exp(\vec{S} - \vec{m}_1)^T \dot{M}_1^{-1} (\vec{S} - \vec{m}_1) \right\}; \\ P_0(\vec{S}) &= \left( (2\pi) |\dot{M}_0| \right)^{-1/2} \exp \left\{ -1/2 \cdot \exp(\vec{S} - \vec{m}_0)^T \dot{M}_0^{-1} (\vec{S} - \vec{m}_0) \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

В [8] показано, что оптимальная весовая обработка смеси сигнала и помехи будет только в том случае, если вектор весовых коэффициентов  $\vec{W}$  вычисляется по формуле Винера-Хопфа ( $\vec{b}_c$  – весовой вектор сигнала):

$$\vec{W} = \dot{M}_\Pi^{-1} \cdot \vec{b}_c. \quad (8)$$

Результатом поляризационной обработки является достаточная статистика

$$v = \vec{S}^T \dot{M}_\Pi^{-1} \vec{W} = \vec{S}^T \dot{M}_\Pi^{-1} \vec{b}_c. \quad (9)$$

Решение о наличии сигнала в принимаемой выборке принимается в результате сравнения достаточной статистики с порогом  $C$ :

$$v \geq \ln C, \quad (10)$$

где порог  $C$  определяется путем усреднения по пространству и зависит от заданного уровня ложной тревоги.

В целом решающее правило (9), предполагающее адаптивное обучение по помехе (6), обеспечивает независимость вероятности ложной тревоги от интенсивности помехи и позволяет использовать поляризационно-статистические отличия ПВР цели и помехи.

Управление поляризационным базисом передающих антенн РЛС осуществляется из условия минимизации помех путем адаптивного обучения и ортогонализации областей локализации сигнала и помехи, при которой обеспечивается наибольшая эффективность обнаружения. Комплексный вектор между соответствующими собственными векторами КПМ сигнала и помехи

$$\dot{Q} = 90^\circ + j0. \quad (11)$$

Поскольку ранг КПМ полностью поляризованной помехи равен единице и имеет единственный собственный вектор, то ОЛ одномерна. Ориентация области локализации в комплексном поляризационном про-

странстве (КПП) определяется только первым собственным вектором

$$\vec{b}_{1c} = \begin{pmatrix} b_1 + jb'_1 \\ b_2 + jb'_2 \\ b_1 + jb'_1 \\ b_2 + jb'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{\pi} \cos \beta_{\pi} - j \sin \alpha_{\pi} \sin \beta_{\pi} \\ \cos \alpha_{\pi} \sin \beta_{\pi} + j \sin \alpha_{\pi} \cos \beta_{\pi} \\ \cos \alpha_{\pi} \cos \beta_{\pi} - j \sin \alpha_{\pi} \sin \beta_{\pi} \\ \cos \alpha_{\pi} \sin \beta_{\pi} + j \sin \alpha_{\pi} \cos \beta_{\pi} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где  $b_1, b_2$  и  $b'_1, b'_2$  – действительные и мнимые составляющие проекций первого собственного вектора помехи на орты КПП;  $\alpha_{\pi}, \beta_{\pi}$  – углы эллиптичности и ориентации эллипса поляризации помехи.

Адаптивная оценка поляризационных параметров помех, воздействующих на РЛС, позволяет получить некоторые поляризационные параметры  $\alpha_{\pi}$  и  $\beta_{\pi}$  на интервале наблюдения помехи.

Пусть собственный вектор КПП недеполяризующей цели имеет вид

$$\vec{b}_{1c} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_c \cos \beta_c - j \sin \alpha_c \sin \beta_c \\ \cos \alpha_c \sin \beta_c + j \sin \alpha_c \cos \beta_c \\ -\cos \alpha_c \sin \beta_c - j \sin \alpha_c \cos \beta_c \\ \cos \alpha_c \sin \beta_c + j \sin \alpha_c \cos \beta_c \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где  $\alpha_c$  и  $\beta_c$  – углы эллиптичности и ориентации эллипсов поляризации излучаемых сигналов при ППЗ. Обеспечим равенство нулю скалярного произведения векторов (12) и (13), т.е.

$$\left( \vec{b}_{1\pi}, \vec{b}_{1c} \right) = 0. \quad (14)$$

Решая (14) относительно  $\alpha_c$  и  $\beta_c$ , имеем:

$$\alpha_c = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{2 \left( (b_1 - b_2)(b'_1 + b'_2) + (b_1 + b_2)(b''_1 - b'_2) \right)}{\left( (b'_1 - b'_2) \right)^2 + (b_1 - b_2)^2 + \left( (b'_1 + b'_2) \right)^2} \right); \quad (15)$$

$$\beta_c = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{2 \left( (b'_1 + b'_2)(b'_1 - b'_2) + (b_1 - b_2)(b_1 + b_2) \right)}{\left( (b'_1 + b'_2) \right)^2 + \left( (b'_1 - b'_2) \right)^2 + \left( (b'_1 + b'_2) \right)^2 - (b_1 - b_2)^2} \right).$$

Управление параметрами  $\alpha_c$  и  $\beta_c$  определяет адаптацию поляризационного базиса передающей антенны, при котором будет обеспечиваться ортогональность областей локализации ПВР цели и АШП.

Оценка эффективности алгоритма обнаружения целей проводилась методом статистических испытаний. Полезный сигнал моделировался для слабо деполаризующего объекта, прикрываемого полностью, частично или хаотически поляризованными помехами.

Использование управления параметрами поляризационного базиса ан-

тенной системы на излучение и прием позволит получить энергетический выигрыш в отношении сигнал/помеха до 28 дБ в зависимости от поляризационных параметров помехи. Исследование алгоритма обнаружения с управлением параметрами поляризационного базиса антенной системы на излучение и прием показало, что ортогонализация собственных векторов ОЛ ПВР цели и помехи позволит повысить показатели эффективности обнаружения цели на фоне помех при отсутствии каких-либо различий сигналов и помех, кроме поляризационных.

**Выводы.** Таким образом, управление параметрами поляризационного базиса антенной системы РЛС с полным поляризационным зондированием пространства позволит повысить эффективность обнаружения цели в условиях воздействия АШП большой интенсивности и при отсутствии частотных, временных, пространственных различий сигналов и помех. При этом показатели эффективности обнаружения  $D \geq 0,9$  и  $F \leq 10^{-7}$ , без учета нестабильностей приемо-передающих трактов, могут быть получены уже при  $q_{с/п}^2 = -63$  дБ для полностью поляризованной АШП,  $q_{с/п}^2 = -45$  дБ для частично-поляризованной АШП,  $q_{с/п}^2 = -31$  дБ для хаотически поляризованной помехи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин, В.Е. Дулевич / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
2. Гусев К.Г., Филатов А.Д., Сополев А.П. Поляризационная модуляция. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
3. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю.И. Лосев, А.Г. Бердняков и др. / Под ред. Ю.И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
4. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам. – Одесса: ОИУМ, 1999. – 230 с.
5. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
6. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
7. Либенсон М.Н., Хесин А.Я., Янсон Б.А. Автоматизация распознавания телевизионных изображений. – М.: Энергия, 1975. – 160 с.
8. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
9. Акимов П.С., Евстратов Ф.Ф., Захаров С.И. и др. Обнаружение радиосигналов. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.

Поступила 16.02.2004

**БОРТНОВСКИЙ Александр Анатольевич**, нач. цикла кафедры Военной академии. Область научных интересов – поляризация электромагнитных волн, радиолокация и радионавигация.

**СКОРИК Анатолий Борисович**, канд. техн. наук, доцент кафедры ХВУ. Область научных интересов – поляризация электромагнитных волн, радиолокация и радионавигация.

---