

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РЛС С ПОЛНЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ
ЗОНДИРОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВА
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ
НА ФОНЕ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ**

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

Рассматривается методика оптимизации параметров полного поляризационного зондирования пространства для повышения эффективности обнаружения целей на фоне активных шумовых помех.

Постановка проблемы. В настоящее время возрастают требования к РЛС по обнаружению целей на фоне активных помех, мощность которых в десятки раз превышает мощность сигнала, а пространственные и спектральные различия малы или отсутствуют. Поэтому в радиолокационных станциях (РЛС) нового поколения целесообразно для повышения помехозащищенности использовать и поляризационные различия, существенно проявляемые при применении метода полного поляризационного зондирования пространства (ППЗП). Под ППЗП понимается излучение в пространство сложных сигналов ортогональных как по поляризационной, так и по внутренней структуре и прием одновременно всех поляризационных составляющих.

В связи с этим представляет значительный интерес рассмотрение возможности оптимизации параметров полного поляризационного зондирования пространства для повышения эффективности обнаружения целей на фоне активных шумовых помех в случае, когда пространственно-временные и частотные различия незначительные.

Анализ литературы. Вопросам использования поляризационных различий сигналов и помех в интересах повышения помехозащищенности РЛС посвящено достаточно большое количество работ. Использование полного поляризационного приема позволяет уменьшить потери в отношении сигнал-шум, связанные с деполаризацией сигнала, отраженного от объектов [1], при этом согласование поляризации антенны РЛС на передачу и прием приводит к максимальной коррелированности или

некоррелированности сигналов в приемном устройстве [2].

Осуществление адаптации поляризации антенны позволяет улучшить отношение сигнал-помеха, при этом поляризация антенны на прием должна быть ортогональной к полностью поляризованной составляющей помехи [3].

Однако существенного улучшения в отношении сигнал-помеха следует ожидать за счет осуществления в РЛС с полным поляризационным зондированием пространства поляризационной фильтрации, основанной как на векторной обработке сигналов, так и на оптимизации поляризационных параметров антенной системы.

Цель статьи. Разработка методики оптимизации параметров поляризационного базиса антенной системы РЛС с полным поляризационным зондированием пространства в интересах повышения эффективности обнаружения цели на фоне активных шумовых помех.

Основной материал. Будем считать, что зондирование пространства осуществляется импульсной РЛС таким образом, что за время наблюдения производится N измерений элементов ПВР, составленного из четырех амплитуд и четырех абсолютных фаз поляризационной матрицы рассеяния. Единичные отсчеты входного ПВР представим в следующем виде:

$$\vec{Y}(t_i) = \gamma_c \cdot \vec{S}(t_i) + \vec{n}(t_i) + \vec{\xi}(t_i), \quad i = (\overline{1, N}), \quad (1)$$

где $\vec{S}(t_i)$ – ПВР цели; $\vec{n}(t_i)$ – ПВР помехи; $\vec{\xi}(t_i)$ – вектор собственных шумов; γ_c – признак наличия либо отсутствия цели в элементе разрешения, причем $\gamma_c = 1$ при условии наличия цели.

Полагаем, что помеха перекрывает сигнал в частотной, временной области и может воздействовать как по главному лучу диаграммы направленности антенны, так и по боковым лепесткам.

Частота зондирования РЛС такова, что соседние по времени отсчеты ПВР независимы. Закон распределения элементов ПВР будем считать многомерным нормальным. Многомерные плотности вероятности распределения входного ПВР для гипотезы о наличии в элементе разрешения независимых сигнала, помехи и шума H_1 и альтернативной гипотезы о наличии в элементе разрешения только помехи и шума H_0 можно записать в виде:

$$P_0(\vec{Y}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |\dot{M}_0|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\vec{Y} - \vec{\mu})^{*\Gamma} \dot{M}_0^{-1}(\vec{Y} - \vec{\mu})\right); \quad (2)$$

$$P_1(\vec{Y}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |\dot{M}_1|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\vec{Y} - \vec{\mu})^* \dot{M}_1^{-1} (\vec{Y} - \vec{\mu})\right). \quad (3)$$

Ковариационно-поляризационные матрицы (КПМ) для рассматриваемых гипотез будут следующими:

$$\dot{M}_0 = \dot{M}_\Pi + \dot{M}_\text{ш}; \quad \dot{M}_1 = \dot{M}_c + \dot{M}_\Pi + \dot{M}_\text{ш}, \quad (4)$$

где \dot{M}_Π – КПМ помехи; \dot{M}_c – КПМ цели; $\dot{M}_\text{ш}$ – КПМ внутренних шумов.

КПМ (4) считаем известными. В частности, КПМ цели можно получить расчетным или экспериментальным путем, а КПМ помехи можно получить по результатам адаптивного оценивания путем усреднения входного ПВР по пространству и времени.

При этом решающее правило, построенное на основе последовательного анализа Вальда, состоит в вычислении отношения правдоподобия и сравнении его с двумя порогами на каждом i -м шаге ($i = \overline{1, N}$) [4].

Исходя из (2) и (3), логарифм отношения правдоподобия имеет вид

$$v = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left(\ln \frac{|\dot{M}_0|}{|\dot{M}_1|} - \vec{Y}^* \text{T} (\dot{M}_0^{-1} - \dot{M}_1^{-1}) \vec{Y} \right). \quad (5)$$

Пороги определяются исходя из задаваемых вероятностей ложной тревоги ε_1 и пропуска цели ε_2 :

$$A_1 = \ln \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1}; \quad A_2 = \ln \frac{\varepsilon_2}{1 - \varepsilon_1}. \quad (6)$$

Решение о наличии цели в данном канале дальности принимается при $v_i \geq A_1$, об отсутствии цели – при $v_i \leq A_1$, а при $A_2 < v_i < A_1$ наблюдение продолжается. Процесс обнаружения прекращается с принятием решения о наличии цели либо ее отсутствии, или же по окончании времени наблюдения данного углового направления.

Рассмотрим теперь возможность оптимизации поляризационных параметров антенной системы. Оптимальные параметры ППЗП могут быть получены из рассмотрения адаптивных систем, действие которых основано на максимизации отношения сигнал-помеха или минимизации мощности помехи. Необходимые свойства данных адаптивных систем достигаются соответствующим выбором весовых коэффициентов, обеспечивающих формирование суммарной диаграммы направленности и поляризационной диаграммы [5].

Выходной сигнал адаптивной системы представим в следующем виде:

$$\vec{Z}(t) = \dot{W}^{T*} \vec{Y}(t), \quad (7)$$

где \dot{W} – некоторая преобразующая матрица весовых коэффициентов.

Тогда сигнальная и помеховая составляющие выходного вектора равны:

$$\vec{Z}_c(t) = \dot{W}^{T*} \vec{S}(t); \quad \vec{Z}_{п+ш}(t) = \dot{W}^{T*} (\vec{n}(t) + \vec{\xi}(t)). \quad (8)$$

Среднюю мощность выходного сигнала определим следующим образом

$$P_c = \left\langle \left| \dot{W}^{T*} \vec{S} \right|^2 \right\rangle = \text{Sp}(\dot{W}^{T*} M_c \dot{W}), \quad (9)$$

где $\langle \dots \rangle$ – знак статистического усреднения; $\text{Sp}(\dots)$ – след матрицы.

Средняя мощность помеха плюс шум равна

$$P_{п+ш} = \left\langle \left| \dot{W}^{T*} (\vec{n} + \vec{\xi}) \right|^2 \right\rangle = \text{Sp}(\dot{W}^{T*} M_0 \dot{W}). \quad (10)$$

В качестве матрицы весовых коэффициентов используем матрицу преобразования поляризационных параметров сигналов на излучение и прием $\dot{W} = \dot{Q}_R \otimes \dot{Q}_T$. Тогда выходное отношение сигнал-помеха можно представить как

$$q_{\%п}^2 = \frac{P_c}{P_{п+ш}} = \frac{\text{Sp}((\dot{Q}_R \otimes \dot{Q}_T) M_c (\dot{Q}_R \otimes \dot{Q}_T)^{*T})}{\text{Sp}((\dot{Q}_R \otimes I) M_0 (\dot{Q}_R \otimes I)^{*T})}, \quad (11)$$

где $\dot{Q}_R = \begin{pmatrix} R_1 & R_3 \\ R_2 & R_4 \end{pmatrix}$; $\dot{Q}_T = \begin{pmatrix} T_1 & T_3 \\ T_2 & T_4 \end{pmatrix}$ – матрицы преобразования поляризационных параметров сигналов на излучение и прием соответственно; I – единичная матрица; \otimes – знак Кронекеровского произведения.

Запишем оптимизирующий функционал в виде

$$f_{\text{опт}}(\vec{\alpha}) = \frac{\partial q_{\%п}^2}{\partial \vec{\alpha}}, \quad (12)$$

где $\vec{\alpha}$ – вектор параметров ППЗП.

Вектор параметров $\vec{\alpha}$ можно рассматривать в следующем виде

$$\vec{\alpha} = (\dot{R}_1, \dot{R}_2, \dot{R}_3, \dot{R}_4, \dot{T}_1, \dot{T}_2, \dot{T}_3, \dot{T}_4)^T, \quad (13)$$

где \dot{R}_1, \dot{R}_2 – комплексные коэффициенты передачи или взвешенные составляющие первого поляризационного эллипса антенны на прием; \dot{R}_3, \dot{R}_4 –

взвешенные веса второго поляризованного эллипса на прием; \dot{T}_1, \dot{T}_2 – взвешенные веса первого поляризованного эллипса на излучение; \dot{T}_3, \dot{T}_4 – взвешенные веса второго поляризованного эллипса на излучение.

Оптимальными параметрами ППЗП будем считать такие, которые получим в результате решения системы линейных дифференциальных уравнений в виде

$$f_{\text{опт}}(\bar{\alpha}) = 0 \Big|_{\bar{\alpha}_{\text{опт}} = \hat{\bar{\alpha}}}, \quad (14)$$

где $\hat{\bar{\alpha}}$ – оценка оптимальных параметров ППЗП.

Точное решение (14) может быть затруднительным и, вообще говоря, нецелесообразным ввиду конечных значений погрешностей обработки реальных весов в аппаратуре.

Полученное выражение (11) является оптимизирующим функционалом, позволяющим оценить элементы матрицы весовых коэффициентов \dot{W} по критериям минимума мощности помехи, максимума мощности сигнала и максимума отношения мощностей сигнал-помеха.

Другим вариантом оптимизирующего функционала может являться функционал, учитывающий пространственные различия областей локализации (ОЛ) ПВР в комплексном поляризованном пространстве (КПП), в котором используется критерий, минимизирующий внутриклассовый разброс наблюдений и максимизирующий межклассовое состояние ОЛ ПВР [4]:

$$J = \text{Sp}(\dot{M}_c^{-1} \dot{M}_n) = \text{Sp} \left\{ \left((\dot{Q}_R \otimes \dot{Q}_T) \dot{M}_c (\dot{Q}_R \otimes \dot{Q}_T)^{*T} \right)^{-1} (\dot{Q}_R \otimes I) \dot{M}_n (\dot{Q}_R \otimes I)^{*T} \right\}. \quad (15)$$

Таким образом, оптимизация параметров ППЗП в задаче обнаружения целей на фоне АШП может быть рассмотрена с использованием полученных функционалов (11) и (15) для различных вариантов реализации управления параметрами ППЗП (на прием и (или) передачу). Важным при этом является вопрос о выборе матриц преобразования поляризованных параметров сигналов на излучение и прием. Представляется целесообразным использование следующих матриц преобразования параметров сигналов на излучение и прием:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_R &= \begin{pmatrix} \cos \beta_{R1} \cos \alpha_{R1} + j \sin \beta_{R1} \sin \alpha_{R1} & -\sin \beta_{R1} \cos \alpha_{R1} + j \cos \beta_{R1} \sin \alpha_{R1} \\ \cos \beta_{R2} \cos \alpha_{R2} + j \sin \beta_{R2} \sin \alpha_{R2} & -\sin \beta_{R2} \cos \alpha_{R2} + j \cos \beta_{R2} \sin \alpha_{R2} \end{pmatrix}, \\ \dot{Q}_T &= \begin{pmatrix} \cos \beta_{T1} \cos \alpha_{T1} + j \sin \beta_{T1} \sin \alpha_{T1} & -\sin \beta_{T1} \cos \alpha_{T1} + j \cos \beta_{T1} \sin \alpha_{T1} \\ \cos \beta_{T2} \cos \alpha_{T2} + j \sin \beta_{T2} \sin \alpha_{T2} & -\sin \beta_{T2} \cos \alpha_{T2} + j \cos \beta_{T2} \sin \alpha_{T2} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\alpha_{R1}, \alpha_{R2}, \alpha_{T1}, \alpha_{T2}$ и $\beta_{R1}, \beta_{R2}, \beta_{T1}, \beta_{T2}$ – углы эллиптичности и углы ориентации соответствующих ортов образуемых поляризационных базисов на излучение и прием.

При этом матрицы (16) являются унитарными только в случае ортогональности соответствующих поляризационных параметров ($\alpha_1 = -\alpha_2$;

$\beta_1 = \beta_2 + 90^\circ$). Полученный с их использованием поляризационный базис может быть охарактеризован, в общем случае, как ковариантная система координат (рис. 1) [6]. Его параметры, такие как углы эллиптичности и ориентации, влияют на взаимную ориентацию областей локализации векторных сигналов и помех в КПП, а значит, имеется возможность осуществления согласованной или оптимальной обработки сигнала на фоне помех.

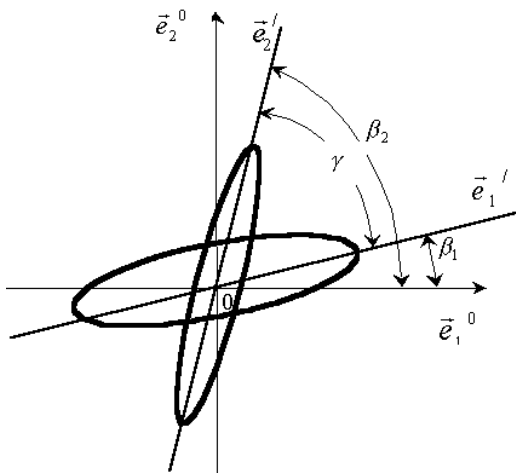


Рис. 1. Ковариантная система координат

Дифференцирование оптимизирующих функционалов и решение системы уравнений позволяет определить оптимальное сочетание поляризационных параметров соответствующих сигналов. Поскольку же рассмотренные оптимизирующие функционалы являются, в общем случае, функциями восьми переменных, то снижение временных и вычислительных затрат для решения задачи оптимизации может быть достигнуто за счет применения методов оптимизации, не использующих производные. В частности, при проведении исследований использовался метод Нельдера и Мида деформируемого многогранника [7].

Методика оптимизации параметров полного поляризационного зондирования пространства в задаче повышения эффективности обнаружения целей на фоне АШП состоит в следующем:

- проведение адаптивной оценки КПМ АШП и учет априорной информации о ковариационно-поляризационной матрице обнаруживаемой цели;
- выбор оптимизирующего функционала (11) или (15);
- наложение ограничений на задачу оптимизации ППЗП, связанных с конкретным вариантом ППЗП и критерием оптимизации;
- решение задач оптимизации и получение параметров полного по-

ляризационного зондирования пространства.

Для оценки эффективности предложенной методики проведены статистические испытания рассмотренного алгоритма обнаружения, при которых определялись показатели обнаружения слабодеполаризующей цели на фоне активной шумовой помехи с различными индексами поляризации m .

Выводы. Таким образом, предложена методика управления параметрами полного поляризационного зондирования пространства, позволяющая повысить эффективность обнаружения целей на фоне активных шумовых помех при возможном отсутствии пространственных, частотных, временных различий.

При этом потенциальные показатели эффективности обнаружения ($D = 0,9$ и $F \leq 10^{-7}$) могут быть получены при $q_{\text{с/п}}^2 = -65$ дБ для полностью поляризованной ($m = 0,95$), $q_{\text{с/п}}^2 = -52$ дБ для частично поляризованной ($m = 0,5$) и $q_{\text{с/п}}^2 = -48$ дБ для хаотически поляризованной ($m = 0,05$) АШП. Однако следует заметить, что реальные показатели эффективности обнаружения следует ожидать значительно меньшими.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поэлман А. Жд., Гай Жд. Р.Ф. Использование поляризационной информации в первичной РЛС: Исследование технического центра SHAPE. Перевод № 4 (232). МО СССР, 1987. – 80 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, Э.Ш. Гойхман, Б.Д. Сизов / Под ред. Ю.И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
4. Алмазов В.Б. Основы теории радиолокации. – Х.: ВИРТА, 1992. – 204 с.
5. Проблемы антенной техники / Под ред. Л.Д. Бахраха, Д.Н. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1989. – 368 с.
6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1981. – 718 с.
7. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

Поступила 2.04.2004

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.
