

РЕШЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ РАДИОЛОКАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ПОЛНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВА

Введение

Анализ уровня развития радиолокационных средств показывает, что может быть создана такая обстановка, при которой решение радиолокационной станцией (РЛС) своих задач представляет существенную проблему, может быть сорвано или выполнено с превышением временного баланса, отведенного РЛС на решение этих задач. В этой связи возникает актуальная задача повышения помехозащищенности РЛС при ограниченном временном балансе.

Одним из возможных вариантов решения данной задачи является применение в РЛС метода полного поляризационного зондирования пространства (ППЗП), предполагающего излучение двух сложных ортогональных по поляризационной и внутренней структуре сигналов и их одновременный прием на ортогональных поляризациях.

Решению основных задач радиолокации и повышения помехозащищенности РЛС посвящены работы [1-2]. При этом рассматриваются и поляризационные свойства сигналов [3-6]. Для селекции и распознавания целей на основе сигнальной информации используют поляризационные матрицы рассеяния (ПМР) целей [7-8]. Использование ППЗП позволит существенно повысить эффективность защиты РЛС от активных и пассивных помех во многих случаях [9, 10], особенно тогда, когда пространственные либо частотно-временные различия между сигналом и помехой отсутствуют или являются несущественными. Существуют математические модели для описания антенны как основного измерительного элемента ПМР, от качества которого во многом зависит общая эффективность работы РЛС с ППЗП [11]. Известна также техническая реализация РЛС с ППЗП [12, 13]. Однако задача исследования возможностей ППЗП для решения основных проблем радиолокации в рамках одного технического решения не проводилась, что и определяет *новизну* и *актуальность* исследования.

Цель исследования – обобщение возможностей полного поляризационного зондирования пространства для решения основных проблем радиолокации в рамках единого технического решения.

Задачи исследования – обобщение особенностей и различий поляризационных векторов рассеяния сигналов и помех при ППЗП; исследование эффективности обнаружения малозаметной цели при ППЗП; исследование эффективности обнаружения цели на фоне помех при ППЗП.

Сущность ППЗП

Использование ППЗП предполагает переход от скалярной обработки принимаемых сигналов к векторной (рис.1). При этом предполагается излучение двух сложных ортогональных по времени сигналов $\dot{s}_1(t)$ и $\dot{s}_2(t)$ на ортогональных поляризациях. Отраженные от цели сигналы основной и перекрестной поляризации принимаются антеннами ортогональных поляризаций. К каждой из двух поляризационно-ортогональных антенн подключаются приемники, включающие согласованные фильтры (либо корреляторы) и квадратурные каналы (рис.2).

Ввиду ортогональности сигналов $\dot{s}_1(t)$ и $\dot{s}_2(t)$ на практике имеем

$$\int \dot{s}_1(t) \cdot \dot{s}_2^*(t) \cdot dt = \int \dot{s}_2(t) \cdot \dot{s}_1^*(t) \cdot dt = \varepsilon, \quad (1)$$

где $\varepsilon \approx 0$ – некоторая достаточно малая величина, соответствующая условию ортогональности реальных сигналов при ППЗП [7, 11].

На выходе квадратурных каналов 1-2 (рис. 2) первого приемника получаем

$$\begin{aligned} \dot{z}_{11} &= \int (\dot{s}_{11}(t) + \dot{s}_{12}(t)) \cdot \dot{s}_1^*(t) \cdot dt = \int \dot{s}_{11}(t) \cdot \dot{s}_1^*(t) \cdot dt + \int \dot{s}_{12}(t) \cdot \dot{s}_1^*(t) \cdot dt = \\ &= \dot{a}_{11} \cdot \int \dot{s}_1(t) \cdot \dot{s}_1^*(t) dt + \dot{a}_{12} \cdot \int \dot{s}_2(t) \cdot \dot{s}_1^*(t) dt \approx \dot{a}_{11} \cdot \mathcal{E}_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где \dot{a}_{11} – коэффициент отражения цели, элемент ПМР; \mathcal{E}_1 – энергия зондирующего сигнала у цели.

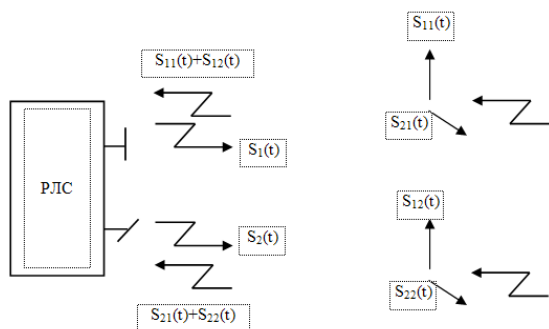


Рис. 1. Физическая сущность ППЗП

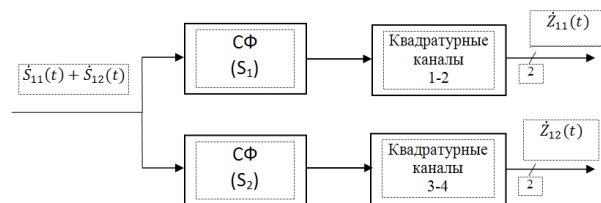


Рис. 2. Сигналы на выходе приемника

Сигналы на всех выходах получают аналогично (2) и представляют в виде поляризационного векторного сигнала (ПВС)

$$\vec{z} = (\dot{z}_{11} \quad \dot{z}_{21} \quad \dot{z}_{12} \quad \dot{z}_{22})^T. \quad (3)$$

Значения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) на разных поляризациях как элементов ПМР цели [1] можно получить из (3) расчетным методом (ошибка до 3 – 5 дБ) либо методом сравнения с эталоном (ошибка до 0,3 дБ) [2]. Тогда, по результатам ППЗП, имеем ПМР в общем виде в комплексной форме представления:

$$\dot{S} = \begin{pmatrix} \dot{s}_{11} & \dot{s}_{12} \\ \dot{s}_{21} & \dot{s}_{22} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

элементы которой используются в виде поляризационного вектора рассеяния (ПВР)

$$\vec{S} = (\dot{s}_{11} \quad \dot{s}_{21} \quad \dot{s}_{12} \quad \dot{s}_{22})^T, \quad (5)$$

свойства которого для сигналов и помех существенно различны.

Обобщение особенностей и различий ПВР сигналов и помех при ППЗП

Под входным информационным вектором понимается поляризационный вектор (ПВ) в виде временных отсчетов t_i , причем, $i = (\overline{1, N})$,

$$\vec{S}(t_i) = \gamma_c \cdot \vec{S}_c(t_i) + \gamma_n \cdot \vec{n}(t_i) + \vec{\xi}(t_i), \quad (6)$$

где $\vec{S}_c(t_i)$ – ПВ полезного сигнала; $\vec{n}(t_i)$ – ПВ внешних помех; $\vec{\xi}(t_i)$ – ПВ собственных шумов; γ_c и γ_n – признаки наличия (1) или отсутствия (0) сигнала и помех.

Отметим специфические особенности ПВ сигнала, когда $\dot{s}_{21} \approx \dot{s}_{12}$ ввиду принципа взаимности в совмещенной радиолокации [1]. Особенности ПВ внешних помех являются примерные равенства $\dot{n}_{11} \approx \dot{n}_{12}$ и $\dot{n}_{21} \approx \dot{n}_{22}$ в силу того, что используются две антенны, выход каждой из которых подключен одновременно к двум согласованным фильтрам (СФ) (рис. 2). Интерес представляют также особенности совместного влияния внутренних шумов тракта обработки до СФ ξ_1 и ξ_2 двух антенных каналов и собственных шумов квадратурных каналов ξ_{11} , ξ_{12} и ξ_{21} , ξ_{22} , когда результирующий вектор собственных шумов при ППЗП будет представлен в виде

$$\vec{\xi} = (\xi_1 + \xi_{11} \quad \xi_2 + \xi_{12} \quad \xi_1 + \xi_{21} \quad \xi_2 + \xi_{22})^T. \quad (7)$$

Заметим, что указанные выше зависимости отдельных элементов ПМР цели и помех между собой, а также особенности шумов (7) создают предпосылки получения положительного эффекта при обнаружении цели. Эти же зависимости учитываются при описании совместной плотности вероятности распределения входного информационного вектора (6). Область дискретных значений каждой из составляющих независимых во времени отсчетов поляризационного вектора (ПВ) в общем виде (6) будем описывать n -мерной плотностью распределения ($n = 4$), которую будем описывать нормальным законом [1, 2, 5-7]:

$$P(\vec{S}) = \left((2\pi)^n |\dot{M}| \right)^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\vec{S} - \vec{m})^T \dot{M}^{-1} (\vec{S} - \vec{m}) \right\}, \quad (8)$$

где \vec{m} – вектор средних значений; \dot{M}^{-1} – обратная матрица.

Заметим, что ковариационная матрица \dot{M} или ковариационно-поляризационная матрица (КПМ) содержит характеристику степени статистической взаимосвязи элементов ПВ и рассчитывается как статистическое усреднение

$$\dot{M} = \left\langle (\vec{S} - \vec{m}) \cdot (\vec{S} - \vec{m})^T \right\rangle. \quad (9)$$

Пусть пространством измеряемых признаков является n -мерное комплексное поляризационное пространство (КПП)

$$\dot{C}^4 = \begin{pmatrix} 0 & \vec{c}_1^0 & \vec{c}_2^0 & \vec{c}_3^0 & \vec{c}_4^0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

направляющие комплексные орты которого соответствуют элементам ПВ [9, 10]

$$\vec{c}_1^0 = \dot{s}_{11}; \vec{c}_2^0 = \dot{s}_{21}; \vec{c}_3^0 = \dot{s}_{12}; \vec{c}_4^0 = \dot{s}_{22}. \quad (11)$$

Тогда КПМ позволит определить ту область в КПП, внутри которой локализуется случайный вектор (6). Эта область локализации (ОЛ) случайного вектора образует многомерный эллипсоид равной плотности вероятности в соответствии с уравнением

$$(\vec{S} - \vec{m})^T \dot{M}^{-1} (\vec{S} - \vec{m}) = d^2, \quad (12)$$

где $d > 0$ и определяет вероятность попадания координат конца ПВ внутрь ОЛ.

Заметим, что КПМ является эрмитовой [1] и положительно определенной [4, 5], и может быть представлена как

$$\dot{M} = \dot{B} \cdot \Lambda \cdot \dot{B}^T, \quad (13)$$

где $\dot{B} = \begin{pmatrix} \vec{b}_1 & \vec{b}_2 & \vec{b}_3 & \vec{b}_4 \end{pmatrix}$ – матрица собственных векторов КПМ; $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4)$

– матрица неотрицательных собственных значений, спектр КПМ.

Указанное определяет, что ОЛ ПВ в исходном КПП является многомерный эллипсоид, положение которого определяется вектором средних значений \vec{m} . Размерность эллипсоида зависит от числа ненулевых, на практике существенных собственных значений. Ориентация этого эллипсоида определяется собственными векторами КПМ \dot{B} , а длины полуосей – собственными значениями:

$$a_i = d \sqrt{\lambda_i}. \quad (14)$$

Изложенное определяет правомерность применения многомерного нормального закона распределения случайных векторов, включая и случаи жесткой коррелированности отдельных его элементов между собой, когда ранг КПМ меньше размерности КПП $r < 4$. Геомет-

рическая трактовка ОЛ объектов, различающихся размерами и формой, а также помех, включая активные шумовые, имитирующие ответно-импульсные, пассивные, приобретает определенную наглядность. Результаты исследований закономерностей распределения ПВ целей и помех свидетельствуют о том, что их соответствующие ОЛ существенно различны. На рис. 3 показана геометрическая интерпретация проекции ОЛ поляризационного вектора рассеяния (ПВР) объектов простой формы из четырехмерного комплексного (10) в трехмерное вещественное пространство R^3 , а на рис. 4 – соответствующие проекции ПВ полностью поляризованных (ПП) и хаотически поляризованных (ХП) активных помех.

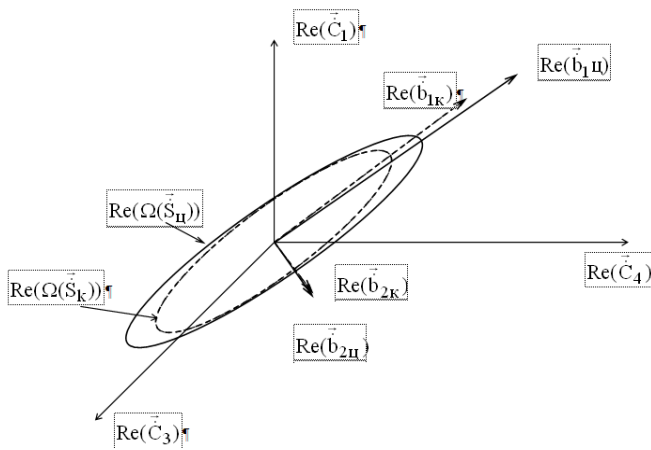


Рис. 3. ОЛ ПВР конуса и цилиндра

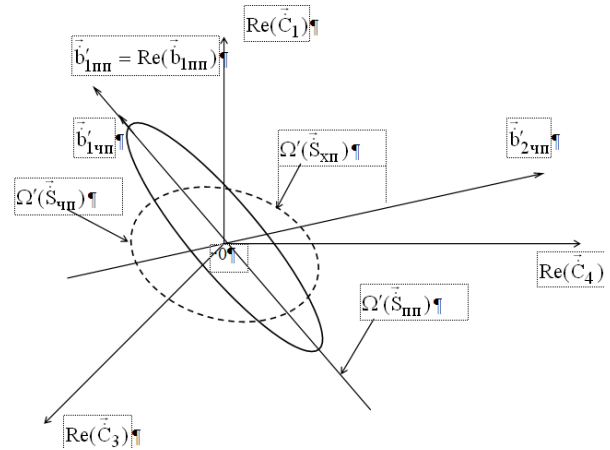


Рис. 4. ОЛ ПВ активных помех

Результаты обобщения особенностей и различий поляризационных векторов сигналов и помех при ППЗП свидетельствуют о существенных различиях их ОЛ, что и создает предпосылки для решения основных проблем радиолокации методом полного поляризационного зондирования пространства.

Исследование эффективности обнаружения малозаметной цели при ППЗП

Обнаружение малозаметных целей часто становится затруднительным на достаточной для практики дальности. При ППЗП эффективность обнаружения таких целей (дальность обнаружения, вероятность правильного обнаружения, средний объем выборки) улучшается по сравнению с РЛС, в которой используется скалярная поляризация. Покажем преимущества ППЗП по сравнению с использованием скалярной поляризации, например вертикальной, на излучение и при приеме (ВВ). На рис. 5 показаны зависимости ЭПР от угла облучения в горизонтальной плоскости цели типа ALCM [7] на основных – горизонтальной (ГГ), вертикальной (ВВ), а также на перекрестных (ГВ и ВГ) поляризациях. Очевидно, что ЭПР существенно зависит от угла облучения, поляризации, наблюдаются глубокие замирания.

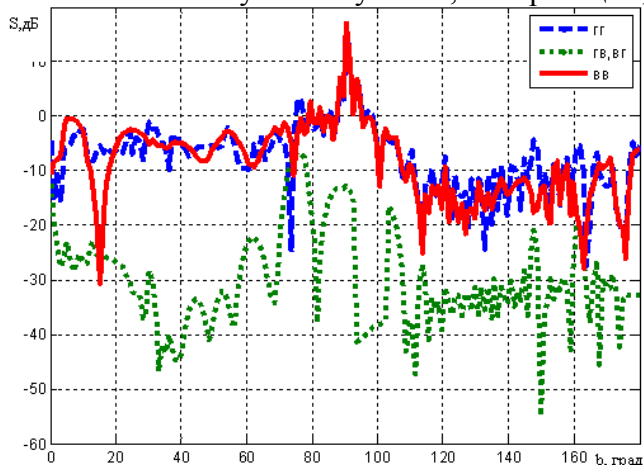


Рис. 5. ЭПР цели на разных поляризациях

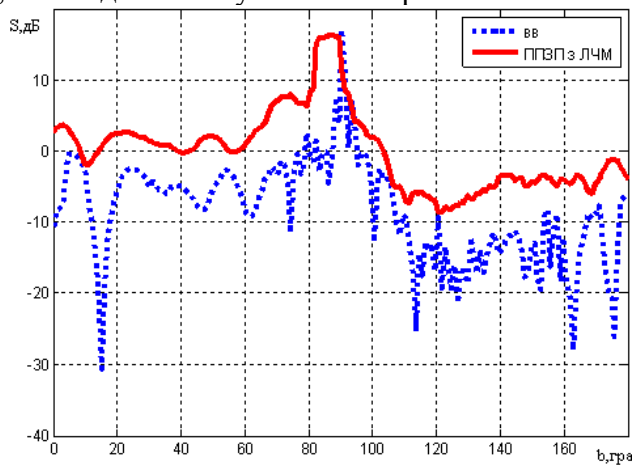


Рис. 6. ЭПР цели при ВВ и ППЗП

Зависимость суммарной ЭПР от угла облучения при ППЗП с использованием ортогональных линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов в сантиметровом диапазоне при девиации сигналов 10 МГц и при базе 200 показана на рис. 6. Отметим, что средняя суммарная ЭПР в диапазоне углов $0^0 \dots 30^0$ при ППЗП с ЛЧМ по сравнению со скалярной поляризацией (ВВ) увеличилась с $0,2 \text{ м}^2$ до $1,55 \text{ м}^2$, т.е. почти в 8 раз, что свидетельствует о возможности увеличения дальности действия на 67 % исходя из основного уравнения радиолокации. Уменьшение динамического диапазона изменения ЭПР с 30 до 5 дБ свидетельствует об уменьшении вероятности замирания сигнала.

Рассмотрим алгоритм обнаружения малозаметных целей в элементе разрешения как критерий обнаружения неоднородностей участка пространства – так называемый метод контраста. При этом достаточную статистику будем вычислять в соответствии с выражением

$$v_H = \bar{z}^{T*} \cdot \dot{M}_0^{-1} \cdot \bar{z} \geq v_0, \quad (15)$$

где \dot{M}_0 – КПМ помех, результат усреднения результатов наблюдения по пространству и во времени; v_0 – порог обнаружения [1].

Результаты статистических испытаний алгоритма обнаружения цели без накопления (15) представлены на рис. 7 – при скалярной поляризации (ВВ) и на рис. 8 – при ППЗП. Цель типа ALCM наблюдается с носовых ракурсов $0^0 - 30^0$ углов облучения. Объем выборки – 1000 отсчетов.

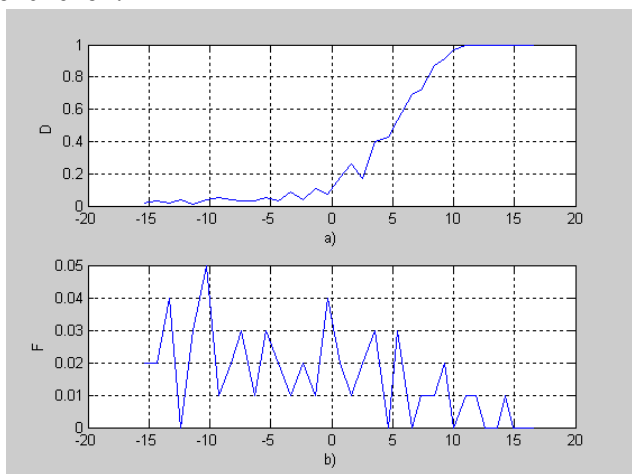


Рис. 7. Показатели обнаружения при скалярной поляризации ВВ

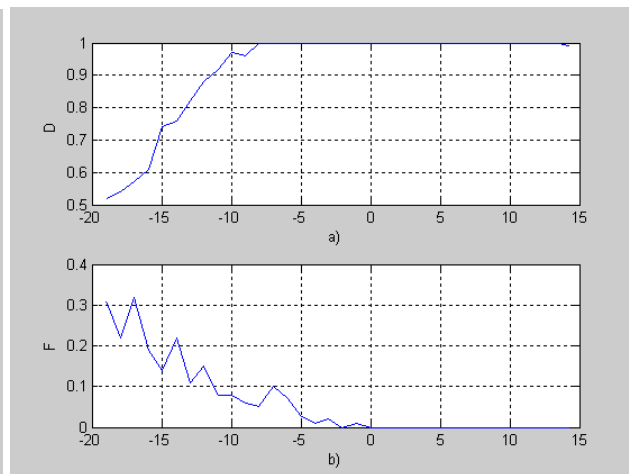


Рис. 8. Показатели обнаружения неоднородностей при ППЗП

Отметим, что показатели вероятности правильного обнаружения $D \geq 0,95$ и ложной тревоги $F \leq 0,01$, которые будем считать допустимыми, наблюдаются при отношении средней мощности сигнала к средней мощности шума $q^2 = 10 \text{ дБ}$ при скалярной поляризации, когда при ППЗП указанные параметры будут наблюдаться уже при $q^2 = 0 \text{ дБ}$. Это свидетельствует о положительном эффекте, об энергетическом выигрыше до 10 дБ при использовании ППЗП. Отметим также, что этот выигрыш свидетельствует о возможности увеличения дальности обнаружения цели на 78 % в соответствии с основным уравнением радиолокации.

Рассмотрим последовательный алгоритм обнаружения Вальда [1] с накоплением

$$v_B = \sum_{i=1}^n \ln \left| \frac{\dot{M}_{0i}}{\dot{M}_{1i}} \right| - \bar{z}_i^{T*} \cdot A_i \cdot \bar{z}_i \begin{cases} \geq v_1 \\ \leq v_0 \end{cases}, \quad (16)$$

где $\dot{M}_1 = M_0 + M_c$ – КПМ при гипотезе наблюдения известной цели (M_c) и помех; \dot{M}_0 – КПМ помех при альтернативе; $A = M_1^{-1} - M_0^{-1}$ – решающая матрица; ν_0 и ν_1 – пороги обнаружения [1].

Результаты испытаний последовательного алгоритма обнаружения Вальда (16) представлены на рис. 9, где допустимые показатели D и F наблюдаются уже при $q^2 = -10\text{дБ}$, когда средний объем выборки на принятие решения об отсутствии N_0 и наличии N_1 цели не превышает 10 отсчетов.

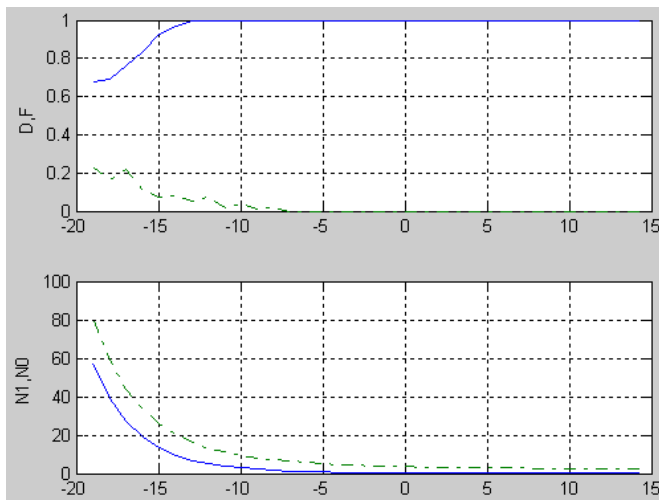


Рис. 9. Показатели качества обнаружения цели

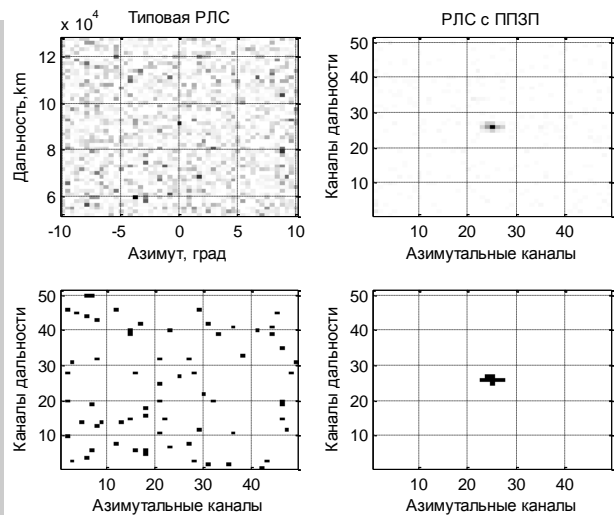


Рис. 10. Первичные (верхние) и вторичные (нижние) индикаторы обнаружения целей

Полученный выигрыш уже в 20дБ свидетельствует о возможности увеличения дальности обнаружения цели более чем в три раза, либо о возможности обнаружения цели с меньшей на 20дБ ЭПР. На рис. 10 показаны результаты испытаний программного симулятора работы РЛС сантиметрового диапазона с возможностью реализации ППЗП. Показаны качественные результаты однократного зондирования в каждом угловом направлении, без использования накопления. Технические характеристики РЛС являются типовыми, развязка по поляризации антенной системы 20дБ , амплитудные и фазовые нестабильности параметров поляризационных каналов не превышают 10% и 10^0 соответственно. Дальность до цели 90км , цель типа ALCM с ЭПР $0,2\text{м}^2$. Если отметка от цели наблюдается уверенно на индикаторах как типовой РЛС, так и РЛС с ППЗП при ЭПР $0,2\text{м}^2$ (на рисунках не показано), то при ее снижении до величины $0,002\text{м}^2$ становится невозможным ее обнаружение типовой РЛС, а РЛС с ППЗП уверенно обнаруживает эту цель (рис. 10).

Исследование эффективности обнаружения цели на фоне помех при ППЗП

Качественную оценку эффективности обнаружения цели на фоне помех представим по результатам испытаний работы симулятора РЛС с возможностью использования ППЗП. На рис. 11 представлены индикаторы обнаружения цели при ее удалении 90км при воздействии активной шумовой широкополосной неполяризованной помехи с относительной мощностью 50дБ , воздействующей по лучу диаграммы направленности РЛС. Видим, что на индикаторах типовой РЛС угловое направление на цель при азимуте 0град оказывается подавлено помехой. При этом на индикаторах вторичной информации оказывается невозможным выделить цель. На рис. 12 представлены первичные индикаторы при воздействии неполяризованной имитирующей несинхронной ответно-импульсной помехи с амплитудной хаотической модуляцией. Видим, что РЛС с ППЗП обладает хорошими возможностями защиты от активных шумовых и имитирующих, даже неполяризованных помех.

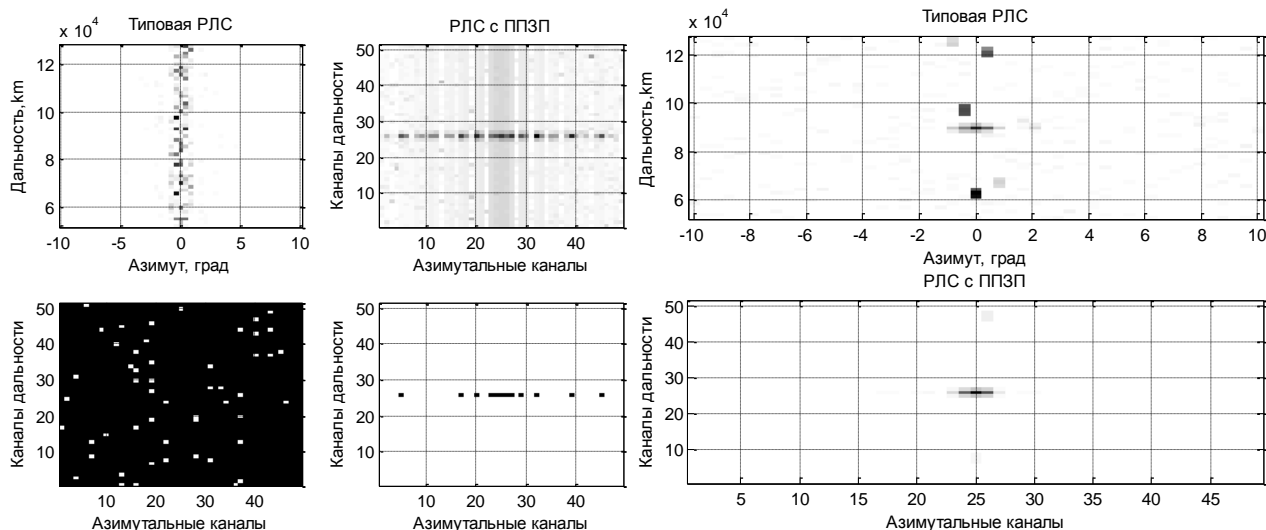


Рис. 11. Индикаторы обнаружения цели при воздействии широкополосной помехи

Рис. 12. Индикаторы обнаружения цели при воздействии несинхронной помехи

Выводы

Следует ожидать, что использование в РЛС ППЗП позволит получить определенный энергетический выигрыш, что существенно улучшит возможности обнаружения малозаметной цели. С другой стороны, РЛС с ППЗП сможет выполнять свои функции при меньшей рабочей мощности передатчика, что улучшит скрытность работы и условия электромагнитной совместимости. Результаты исследования эффективности обнаружения целей на фоне помех при ППЗП позволяют отметить хорошие возможности защиты РЛС от неполяризованных активных шумовых и имитирующих помех. Изложенное представляет собой новое решение основных проблем радиолокации, таких как обнаружение малозаметной цели и защита от неполяризованных активных шумовых и имитирующих помех в рамках одного технического решения, что представляет собой существенную практическую значимость.

Список литературы: 1. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория.* Справочник. Изд. 2-е. перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с. 2. *Radar Handbook.* Merrill I. Skolnik. Editor in Chief. Third Edition. McGraw Hill. 3. *Radar polarization jamming using the superposition of two fully polarized waves* / Wanlelik G., Stock D.J.R. // *Radar 87:* London, 19-21 Oct. – London, 1987. – P.300-332. 4. *Поздняк С.Н., Мелитицкий В.А.* Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн. – М.: Сов.радио, 1974. – 480 с. 5. *Родимов А.П., Поповский В.В.* Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с. 6. *Козлов Н.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.* Поляризация радиоволн. Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Радиотехника, 2005. – 704 с. 7. *Характеристики рассеяния радиолокационных целей* / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, А.Е. Казаков, В.Л. Павлов, Ю.М. Шишкин / Под ред. Е.Л. Казакова. – Харьков, 2006. – 185 с. 8. *Казаков Е.Л.* Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам. – Одесса: ОИУМ, 1999. – 230 с. 9. *Храбростин Б.В., Мартынчук А.А., Зубрицкий Г.Н.* Применение метода полного поляризационного зондирования пространства в РЛС // Сб. науч. трудов ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1998. – Вып. 6. – Ч.1. – С.351-354. 10. *Храбростин Б.В., Мартынчук А.А., Д.В. Фоменко.* Чи існує можливість підвищення ефективності захисту сучасних радіолокаторів від завад // *Радиоелектроніка та інформатика*, 2004. – №4.(29). – С.155-159. 11. *Мартынчук А.А., Терещенко И.В.* Математическая модель двухканальной по поляризации фазированной антенной решетки заданной конструкции // *Радиотехника.* – Х.: ХНУРЕ, 2009. – Вып. №156. – С.118-123. 12. *Храбростин Б.В., Мартынчук А.А.* и др. Спосіб вимірювання поляризаційної матриці розсіювання об'єкта: А.С. 98126624 Україна, МПК 6G01S7/36 / Храбростин Б.В., Кравченко А.И., Мартинчук О.О.(Україна). – № 98126624; Заяв. 02.03.99; Опубл. 07.08.99, Бюл. №54. 13. *Способ и устройство для измерения поляризационной матрицы рассеяния объекта* / Б.В.Храбростин, А.Г. Кравченко, А.А.Мартынчук. № 02204842. 20.05.2003г. DVD Патенты России 2003. The Patents of Russia 2003. <http://cdplanets.centrmag.ru>.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 20.02.2012