

УДК 621.396.96

А.И. Омельченко, А.В. Довбня, Д.Ю. Свистунов

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба*

## АНАЛИЗ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОВЫСОТНЫХ МАЛОСКОРОСТНЫХ ЦЕЛЕЙ НА ФОНЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ПОЛНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВА

*В статье проводится сравнение дальности обнаружения маловысотных малоскоростных целей на фоне подстилающей поверхности при использовании метода полного поляризационного зондирования пространства и классического метода радиолокации. Показана высокая эффективность рассматриваемого метода радиолокации.*

**Ключевые слова:** обнаружение целей, поляризационный вектор рассеяния, поляризационная матрица рассеяния, подстилающая поверхность.

### Введение

**Постановка проблемы.** Среди известных в настоящее время методов поляризационной обработки отраженных сигналов, которые могут быть использованы для обнаружения целей на фоне подстилающей поверхности, можно выделить две основные группы. Первая группа методов основана на полном поляризационном приеме (ППП) отраженных сигналов, а вторая – на полном поляризационном зондировании пространства (ППЗП). ППП предполагает излучение сигналов одной поляризации и прием двух ортогонально поляризованных компонент сигналов, отраженных от каждого разрешаемого элемента объекта. ППЗП предполагает измерение поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) объекта, т.е. – измерение амплитуд и фаз четырех когерентно связанных ортогонально поляризованных компонент сигналов, отраженных от каждого разрешаемого элемента объекта (в целом – два когерентно связанных полных приема, которые могут быть организованы либо одновременно, либо последовательно во времени). Отсюда следует, что информация об объекте, получаемая при ППП, является частью информации, получаемой при ППЗП.

Это позволяет провести сравнение различных методов обработки на основе оценки показателей качества оптимальных решающих правил обнаружения по реализациям сигналов, полученных в процессе одного и того же эксперимента [1, 2]. Такой подход гарантирует, что каждый из методов обработки сигналов будет представлен решающим правилом, которое наилучшим образом использует информацию, получаемую об объекте, для его обнаружения в одних и тех же заданных условиях.

При синтезе решающих правил обнаружения, оценки координат и распознавания объектов совокупность четырех комплексных ортогонально поляризованных компонент сигналов, получаемых в процессе ППЗП, принято представлять не в виде ПМР, а в виде вектора и называть поляризационным вектором рассеяния (ПВР) объекта [3 – 6]. Одинако-

вые условия при сравнении эффективности методов, в данном случае, могут быть обеспечены за счет того, что для оценки показателей эффективности соответствующих оптимальных решающих правил, можно использовать одну и ту же выборку ПВР. При этом для вычисления решающей статистики в случае ППЗП следует использовать выборку полного четырехмерного комплексного ПВР. Для вычисления решающей статистики в случае ППП следует использовать часть той же выборки в виде двухмерного вектора, компоненты которого соответствуют заданной поляризации излученного сигнала, а в традиционном случае, т.е. без учета поляризации, – использовать реализацию одного из основных элементов ПВР.

В случае традиционной локации при обнаружении могут быть учтены только энергетические различия полезных и мешающих сигналов на заданной поляризации. В рассматриваемом методе локации к энергетическим различиям сигналов, отраженных от цели и от участка подстилающей поверхности, на которой она находится, добавляются различия их рассеивающих свойств за счёт измерения и учета ПВР при обнаружении. В результате этого наблюдается увеличение дальности обнаружения цели.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросу обнаружения целей на фоне различного вида помех, а в частности и на фоне подстилающей поверхности, при использовании метода ППЗП посвящено большое количество публикаций за последние десять лет [1 – 9]. В этих работах оценка показателей качества обнаружения находилась, как правило, путем проведения серии статистических экспериментов, при использовании данных математического моделирования либо экспериментальных данных измерения ПВР целей и помех различных видов.

На основе полученных в [1 – 9] результатов можно провести анализ потенциального выигрыша дальности обнаружения малоскоростных маловысотных целей на фоне подстилающей поверхности при использовании метода полного поляризационного

зондирования пространства в сравнении с классическими методами радиолокации, что является **целью данной статьи**.

**Основной материал**

Будем полагать, что отношение сигнал/шум и фон/шум существенно больше единицы, тогда параметр обнаружения ( $q^2$ ) в каждом из случаев с достаточной точностью будет определяться отношениями мощностей сигналов, отраженных от цели и разрешаемого РЛС участка подстилающей поверхности, которые, в свою очередь, пропорциональны соответствующим значениям эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), т. е.:

$$q^2 \cong \sigma_{ц} / \sigma_{фона}, \tag{1}$$

где  $\sigma_{ц}, \sigma_{фона}$  – ЭПР цели и помехи соответственно.

Для случая традиционной локации значение удельной ЭПР подстилающей поверхности, например, покрытой высокой травой и кустарником  $\sigma_{тр}^0 = 0,0025$  при длине волны РЛС 3,2см [10]. Если площадь участка подстилающей поверхности, разрешаемого радиолокатором, обозначить  $S$ , то его ЭПР ( $\sigma_{фона}$ ) может быть определена по формуле:

$$\sigma_{фона.тр.} = \sigma_{фона.тр.}^0 \cdot S, \tag{2}$$

при этом параметр обнаружения:

$$q_{тр.}^2 = \sigma_{ц.тр.} / \sigma_{фона.тр.} \tag{3}$$

Поскольку при обнаружении коррелированной выборки цели на фоне коррелированной выборки фона накопление в пределах допустимого (в данном случае) объёма выборки не обеспечивает увеличения параметра обнаружения, то получение приемлемых показателей качества обнаружения возможно при условии, когда [11]:

$$q_{тр.}^2 = \sigma_{ц.тр.} / \sigma_{фона.тр.} \geq 24 (\approx 13,8\text{дБ}). \tag{4}$$

Так как нас интересует предельная (максимальная) дальность обнаружения цели при заданном значении параметра обнаружения, то в дальнейшем неравенство (4) будем полагать равенством, т.е. считать, что

$$q_{тр.}^2 (R_{\text{макс}}) = 24. \tag{5}$$

Это позволяет определить допустимое (предельное) значение  $\sigma_{фона.тр.}$ , при котором выполняется равенство (5), а, учитывая выражение (2), – определить допустимую величину площади  $S$  разрешаемого участка поверхности, на котором находится цель. Используя выражения (5) и (4) с учётом (2), для площади разрешаемого участка подстилающей поверхности, на фоне которого возможно обнаружение цели при значении параметра обнаружения (5), получим:

$$S_{тр.} = \frac{\sigma_{ц.тр.}}{\sigma_{фона.тр.}^0 \cdot q_{тр.}^2 (R_{\text{макс}})} = \frac{\sigma_{ц.тр.}}{24 \sigma_{фона.тр.}^0} = 166,7. \tag{6}$$

Геометрические соотношения в данной задаче демонстрирует рис. 1. На этом рисунке полагается, что в точке  $O$  расположен радиолокатор, ширина диаграммы направленности антенны которого в горизонтальной плоскости обозначена –  $Q$ , а разрешающая способность по дальности –  $r$ . Угол падения луча РЛС на подстилающую поверхность обозначен –  $\beta$ , а площадь участка этой поверхности, разрешаемого РЛС, обозначена –  $S$ .

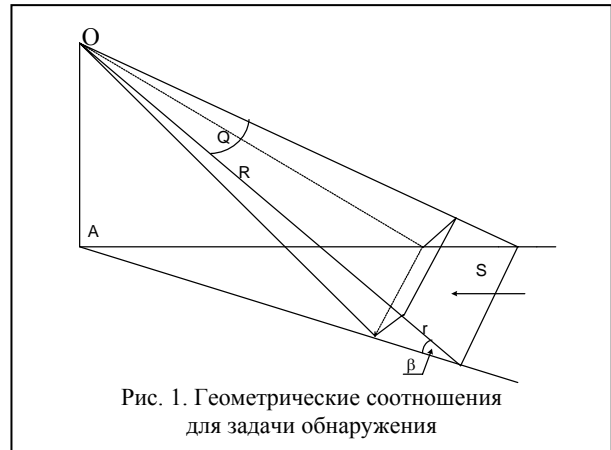


Рис. 1. Геометрические соотношения для задачи обнаружения

С учетом введенных обозначений и геометрических построений, представленных на рис. 1, для площади разрешаемого РЛС участка подстилающей поверхности в рассматриваемых случаях получим следующее выражение:

$$S \approx \frac{r}{\cos \beta} RQ. \tag{7}$$

Из выражения (7) с учетом (6) для максимальной дальности обнаружения цели на фоне подстилающей поверхности в случае традиционной локации получим:

$$R_{тр.макс.} \approx \frac{\sigma_{ц.тр.} \cos \beta}{q_{тр.}^2 (R_{\text{макс}}) \sigma_{фона.тр.}^0 rQ}. \tag{8}$$

Поскольку для  $\beta < 5^\circ$   $\cos \beta \geq 0,996$ , то в выражении (8) можно положить  $\cos \beta = 1$ . Такое приближение тем более допустимо, потому что, как будет показано дальше, выигрыш в дальности обнаружения при использовании предлагаемого метода локации по сравнению с традиционным, в первом приближении, не зависит от  $\beta, r$  и  $Q$ .

Подставляя в (8) значения  $r = 30$  м и  $Q = 0,017$  радиан (это соответствует значению  $Q = 1^\circ$ ) получим, что максимальная дальность обнаружения неподвижной цели в рассматриваемом случае традиционной локации составляет

$$R_{тр.} \approx 340 \text{ м}. \tag{9}$$

В связи с тем, что метод ППЗП предполагает измерение ПВР цели и подстилающей поверхности, параметр обнаружения будет определяться выражением [3]:

$$q_{пп}^2 = \text{Sp } \dot{M}_{ц} / \text{Sp } \dot{M}_{п} = \sum_{i=1}^4 \sigma_{ii.ц} / \sum_{i=1}^4 \sigma_{ii.п}, \tag{10}$$

где  $\text{Sp}\dot{M}_{\text{ц}}$ ,  $\text{Sp}\dot{M}_{\text{п}}$  – след поляризационно-ковариационной матрицы цели и помехи (фона) соответственно ;  $\dot{M}_{\text{ц}} = \langle \dot{S}_{\text{ц}} \cdot \dot{S}_{\text{ц}}^{*T} \rangle$ ;  $\dot{M}_{\text{п}} = \langle \dot{S}_{\text{п}} \cdot \dot{S}_{\text{п}}^{*T} \rangle$ ;

$\dot{S}_{\text{ц}}$ ,  $\dot{S}_{\text{п}}$  – ПВР цели и помехи.

С учетом введенных обозначений  $\sum_{i=1}^4 \sigma_{ii, \text{ц}(\text{п})} = \sum_{i=1}^4 \langle \dot{S}_i \cdot \dot{S}_i^{*T} \rangle = \sigma_{\text{ц}(\text{п}), \text{пз}}$ . – полная ЭПР цели (помехи), которая учитывает отраженные сигналы на двух основных и двух перекрестных поляризациях. Именно эти ЭПР определяют значение параметра обнаружения (10) в случае полного поляризационного зондирования пространства.

Согласно [7] подстилающая поверхность является слабо деполаризующим объектом локации. Из этого следует, что полная ЭПР разрешаемого РЛС участка подстилающей поверхности (в данном случае - полная ЭПР помехи) будет определяться суммой её ЭПР на основных поляризациях и может быть определена в виде:

$$\sigma_{\text{фона.пз}} \approx 2\sigma_{\text{фона.тр.}} \quad (11)$$

Удельную ЭПР подстилающей поверхности в случае полного поляризационного зондирования пространства определим аналогично случаю традиционной локации, полагая, что рассматривается один и тот же разрешаемый участок этой поверхности, в частности, получим:

$$\sigma_{\text{пз}}^0 = \frac{\sigma_{\text{фона.пз.}}}{S} \approx \frac{2\sigma_{\text{фона.тр.}}}{S} = 2\sigma_{\text{фона.тр.}}^0 \quad (12)$$

Полная ЭПР цели, в общем случае, в соответствии с пояснением к (10) может быть представлена через ЭПР на основных и перекрестных поляризациях в следующем виде:

$$\sigma_{\text{ц.пз}} = \sigma_{11\text{ц}} + \sigma_{21\text{ц}} + \sigma_{12\text{ц}} + \sigma_{22\text{ц}} \geq \sigma_{11\text{ц}} + \sigma_{22\text{ц}} \approx 2\sigma_{\text{ц.тр.}} \quad (13)$$

где  $\sigma_{k, \text{ц}}$  ( $k = 1, 2$ ) ЭПР цели при зондировании на  $k$ -й ортогональной поляризации и приеме на  $l$ -й ортогональной поляризации.

Если цель является слабо деполаризующей, то ЭПР на перекрестных поляризациях будут существенно (примерно на порядок) меньше ЭПР на основных поляризациях. При этом с приемлемой для настоящих приближенных оценок точностью в выражении (13) можно использовать знаки равенства. Если же цель является достаточно сильно деполаризующей, то использование в (13) знаков равенства приведёт к тому, что наши теоретические оценки полной ЭПР цели а следовательно и параметра обнаружения при полном поляризационном зондировании будут занижены по сравнению с реальными. В свою очередь, это приведет к тому, что оценки значений максимальной дальности обнаружения цели на фоне рассматриваемой подстилающей поверхности при полном поляризационном зондировании будут также занижены по сравнению с реальными достижимыми.

Рассмотрим сначала более простой случай, полагая, что цель является слабо деполаризующей. При этом в соответствии с выражениями (10) – (13) для значения параметра обнаружения в случае полного поляризационного зондирования получим:

$$q_{\text{пр}}^2 \approx \frac{\sigma_{\text{ц.пз}}}{\sigma_{\text{фона.пз.}}} \approx \frac{\sigma_{\text{ц.тр.}} \cdot \cos \beta}{\sigma_{\text{фона.тр.}}^0 \cdot rRQ} = \frac{\sigma_{\text{ц.тр.}}}{\sigma_{\text{фона.тр.}}} \quad (14)$$

Из сравнения выражений (3), (8) и (14) следует, что при заданной разрешающей способности РЛС по дальности и угловым координатам, для оценки значения параметра обнаружения слабо деполаризующей цели на фоне подстилающей поверхности в случае полного поляризационного зондирования, может быть использовано то же выражение, что и в случае традиционной локации.

В тоже время проведенные ранее исследования [3, 8, 9], показывают, что в случае ППЗП значения параметра обнаружения ( $q_{\text{пз.}}^2$ ) цели на фоне подстилающей поверхности, при котором могут быть получены приемлемые показатели качества, могут принимать значения от минус 5 до минус 15 дБ. Полагая, что при полном поляризационном зондировании допустимое значение

$$q_{\text{пр.}}^2 = q_{\text{пз.}}^2 \quad (15)$$

из выражения (14) для дальности обнаружения цели в рассматриваемом случае получим:

$$R_{\text{пз.}} = \frac{\sigma_{\text{ц.тр.}} \cdot \cos \beta}{q_{\text{пз.}}^2 \cdot \sigma_{\text{фона.тр.}}^0 \cdot rQ} \approx \frac{\sigma_{\text{ц.тр.}}}{q_{\text{пз.}}^2 \cdot \sigma_{\text{фона.тр.}}^0 \cdot rQ} \quad (16)$$

Подставляя в (16) значения  $r = 30$  м и  $Q = 0,017$  радиан (это соответствует значению  $Q = 1^\circ$ ) и полагая, что  $q_{\text{пз.}}^2$  может принимать значения от 1 до 0,32 (т.е. от 0дБ до минус 5дБ) получим, что при заданной разрешающей способности РЛС минимальная дальность обнаружения слабо деполаризующей неподвижной цели в случае полного поляризационного зондирования пространства может составить:

$$R_{\text{пз.мин.}} = 8 - 25 \text{ км.} \quad (17)$$

Выигрыш в дальности обнаружения при использовании предлагаемого метода естественно определить отношением соответствующих дальностей, определяемых выражениями (8) и (16), при этом в общем виде получим:

$$\eta = R_{\text{пз.мин.}} / R_{\text{тр.макс.}} = q_{\text{тр.}}^2 / q_{\text{пз.}}^2 \quad (18)$$

Из выражения (18) следует, что выигрыш в дальности обнаружения, который обеспечивает использование метода полного поляризационного зондирования по сравнению с традиционным методом, в первом приближении, не зависит от разрешающей способности РЛС, а определяется только отношением значений параметров обнаружения, необходимых для получения приемлемых показателей качества обнаружения в каждом из сравниваемых методов. Подставляя в (18) значения соответствующих параметров определим, что минимальный выигрыш в

дальности обнаружения в рассматриваемой задаче составит от 24 до 75 раз. Считаем этот выигрыш минимальным, поскольку из диапазона возможных значений  $q_{\text{пз}}^2$  при получении оценок выигрыша использованы минимальные значения параметра обнаружения цели, которые имели место в эксперименте по оценке возможностей обнаружения в случае полного поляризационного зондирования.

Однако рассмотренный случай слабо деполяризующих целей применительно к наземным целям и сантиметровому диапазону волн РЛС можно полагать редким. Наиболее вероятно полагать, что малоскоростные и маловысотные цели могут быть и сильно деполяризуемыми. Выше уже был сделан вывод о том, что пренебрежение деполяризованными составляющими сигналов приведет (при использовании изложенной выше методики) к заниженному значению оценки полной ЭПР цели, а, следовательно, и параметра обнаружения, в случае полного поляризационного зондирования по сравнению с реальными. Однако известно, что учет деполяризованной составляющей отраженного сигнала наряду с основной в большинстве случаев может привести к увеличению отношения сигнал/шум не более, чем на 3дБ (в 2 раза по мощности), т.е. к увеличению значения полной ЭПР цели в выражениях (14 и 16) до двух раз, в то время как оценки полной ЭПР подстилающей поверхности, полученные в соответствии с (11) практически не изменятся. При этом оценки дальности обнаружения, определяемые выражением (16) могут также увеличиться до 2-х раз, т.е. минимальные значения дальности обнаружения достаточно сильно деполяризующих целей при полном поляризационном зондировании пространства в рассматриваемых условиях составят от 16 км до 50 км.

### Выводы

Таким образом, показано, что при использовании метода ППЗП позволит повысить дальность обнаружения маловысотных малоскоростных целей на фоне подстилающей поверхности в десятки раз по сравнению с традиционными методами радиолокации в случае отсутствия доплеровских различий сигналов отраженных от цели и помехи. В этой связи, применение метода полного поляризационного зондирования пространства является одним из эффективных путей

увеличения дальности обнаружения целей на фоне подстилающей поверхности при отношениях сигнал/помеха близких и меньших единицы.

### Список литературы

1. Олейник И.И., Омельченко А.И. Решающее правило и оценка показателей качества распознавания одного радиолокационного объекта на фоне другого при полном поляризационном зондировании // 36. наук. праць. – Х.: ХВУ. – 2002. – Вып. 1 (39). – С. 79-81.
2. Храбростин Б.В., Омельченко А.И., Катасонов А.Ф. Решающее правило обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 2002. – Вып. 1 (17). – С. 135-139.
3. Храбростин Б.В. Метод полного поляризационного зондирования пространства // Научные ведомости БелГУ, сер. Информатика, прикладная математика, управление, т. 1. – Белгород: БелГУ. – 2004. – Вып. 1 (19). – С. 111-130.
4. Мартыничук А.А., Зубрицкий Г.Н., Храбростин Б.В. Применение метода полного поляризационного зондирования в РЛС // Сб. научн. тр. 6 международной научной конференции. – Х.: ХГПУ, 1998. – Вып. 6., ч. 1. – С. 351-354.
5. Храбростин Б.В. Способ и устройство измерения поляризационной матрицы рассеивания объекта. Патент N 2187129 (РФ) от 10.08.2002.
6. Храбростин Б.В., Храбростин Д.Б. Устройство для измерения поляризационной матрицы рассеяния объекта. Патент N 2183022 (РФ) от 27.05.2002.
7. Храбростин Б.В., Омельченко А.И., Катасонов А.Ф. Статистические характеристики поляризационных векторов рассеяния помеховых сигналов различных типов // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 2002. – Вып. 2 (21). – С. 115-121.
8. Распознавание целей по результатам радиолокационных измерений в сложной помеховой обстановке / Б.В. Храбростин, О.Д. Дикуль, А.А. Лучин, И.И. Олейник, Д.Б. Храбростин // Радиотехника. – 2005. – № 11. – С. 34-39.
9. Дикуль О.Д., Храбростин Д.Б. Результаты эксперимента по обнаружению и распознаванию неподвижной наземной цели при отношениях сигнал/фон меньших единицы // Военная техника, вооружение и технологии двойного применения. Материалы III международного технологического конгресса, ч. 2. – Омск. – 2005. – С. 55-57.
10. Кулемин Г.П., Разказовский В.Б. Рассеяние миллиметровых волн поверхностью земли под малыми углами. – К.: Наук. думка. – 1987. – 232 с.
11. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.

Поступила в редколлегию 3.09.2008

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. В.А. Василец, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### АНАЛІЗ ДАЛЬНОСТІ ВІЯВЛЕННЯ МАЛОВИСОТНИХ МАЛОРУХОМИХ ЦІЛЕЙ НА ТЛІ ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МЕТОДУ ПОВНОГО ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ПРОСТОРУ

А.І. Омельченко, О.В. Довбня, Д.Ю. Свистунов

В статті здійснюється порівняння дальності виявлення мало висотних малорухомих цілей на тлі підстильної поверхні при використанні методу повного поляризаційного зондування простору та при використанні класичних методів радіолокації. Показано високу ефективність методу радіолокації, що розглядається.

**Ключові слова:** виявлення цілей, поляризаційний вектор розсіяння, поляризаційна матриця розсіяння, підстильна поверхня.

### THE ANALYSIS OF DETECTION RANGE OF THE LOW-ALTITUDE LOW-SPEED TARGETS ON THE BACKGROUND OF THE SPREADING SURFACE AT USE OF METHOD OF FULL POLARIZATION PROBING OF SPACE

A.I. Omelchenko, A.V. Dovbnya, D.Yu. Svistunov.

In article comparison of detection range of the low-altitude low-speed targets on a background of a spreading surface is spent at use of a method of full polarization probing of space and a classical method of a radar-location. High efficiency of a considered method of a radar-location is shown.

**Keywords:** detection of the purposes, a polarizing vector of dispersion, the polarizing matrix of dispersion spreading a surface.