

УДК 621.396.96

А.В. Попов, М.В. Борцова

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## **ОБНАРУЖЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ ГОРНЫХ МАССИВОВ ПО НЕЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТРАЖЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ**

*Представлены результаты натурных экспериментальных исследований поляризационных характеристик сигналов, отраженных горным массивом и металлическими объектами различной конфигурации. Показано, что поляризационные параметры, получаемые на основе операторной декомпозиции поляризационной матрицы рассеивания объектов, имеют близкие статистические свойства для всех исследованных металлических объектов, в то время как характеристики горного массива существенно отличаются от них. Приведены результаты натурных экспериментов по обнаружению металлических объектов на фоне гор, демонстрирующие возможность их обнаружения с вероятностью не ниже 0,9, что создает предпосылки для совершенствования радиолокационных средств.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, поляризационная матрица рассеивания, декомпозиция, оператор рассеивания, поляризационные характеристики, обнаружение.

### **Постановка проблемы**

Одной из проблем современной радиолокации является обнаружение малоразмерных неподвижных объектов на фоне отражений от подстилающей поверхности [1]. Особенно эта проблема актуальна в условиях гористой местности, например, при поисково-спасательных работах, охране государственной границы, решении оборонных задач. Энергетические характеристики отраженного радиолокационного сигнала не позволяют в таких условиях решать задачу обнаружения цели на фоне помех классическими методами, поскольку отношение сигнал/помеха может быть меньше 1 [2].

Одним из направлений совершенствования современных радиолокационных систем (РЛС) является использование поляризационно – многоканальных РЛС, т.н. поляриметров [3,4], обеспечивающих как всепогодность наблюдений, так и значительное повышение их информативности. Об актуальности данного направления свидетельствует, в частности, внедрение поляриметрических режимов работы практически во всех РЛС искусственных спутников Земли, запущенных развитыми странами в последние 5 лет (например, Terra-SAR, Terra-DEM и др.).

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского „ХАИ” исследования поляризационных характеристик (ПХ) объектов дистанционного зондирования (ДЗ) проводятся с конца 80-х годов с помощью мобильного автоматизированного радиолокационного поляриметра 3-см диапазона, обеспечивающего получение полной поляриметрической информации об объектах ДЗ [5].

Была экспериментально доказана высокая информативность ПХ [6, 7] и эффективность их применения при решении различных задач ДЗ [5,8]. Собранная обширная база данных ПХ различных объектов ДЗ, в т.ч. горных массивов, позволяет детально исследовать поляризационную структуру отраженных радиолокационных сигналов.

Традиционным описанием ПХ объектов ДЗ является поляризационная матрица рассеивания (ПМР), представляющая собой матрицу комплексных коэффициентов отражения при облучении объекта двумя сигналами с ортогональной поляризацией и приеме отраженного сигнала двухкомпонентной антенной в том же поляризационном базисе [4]. Одним из путей исследования собственно поляризационных свойств объектов является декомпозиция ПМР на совокупность инвариантных ПХ [9 – 11], обеспечивающих выделение характерных свойств объектов ДЗ, не зависящих от поляризации зондирующего сигнала.

В работе [10] на основе математического аппарата двойной комплексной плоскости [12] проведена когерентная декомпозиция ПМР и введена инвариантная характеристика поляризационных свойств радиолокационного объекта, названная оператором *рассеивания*, параметры которого отдельно описывают изменения амплитуды, фазы и поляризации сигнала при его отражении.

Трансформация поляризации радиолокационных сигналов теоретически связана с формой и электрофизическими свойствами объектов [11], что создает предпосылки для их обнаружения по неэнергетическим параметрам отраженных сигналов.

## Цель статьи

Целью данной работы является экспериментальная проверка возможности обнаружения металлических объектов на фоне горного массива по инвариантным неэнергетическим параметрам оператора *рассеивания*.

## Изложение основного материала

### 1. Поляризационные характеристики объектов ДЗ

Для описания электромагнитной волны (ЭМВ) традиционно используется ее представление в виде вектора ортогонально поляризованных компонент

$$\vec{E}(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_X \\ \dot{E}_Y \end{bmatrix} \cdot e^{j\omega t}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – несущая частота сигнала;  $\dot{E}_X$ ,  $\dot{E}_Y$  – комплексные амплитуды проекций на оси выбранной системы координат  $(x, y)$ , образующей т.н. поляризационный базис  $\{x, y\}$  [4, 9, 10].

В РЛС обычно используется вертикальная ( $y=V$ ) и горизонтальная ( $x=H$ ) поляризация.

Как известно [3, 4, 9], отраженный от радиолокационного объекта сигнал  $\vec{E}_{Sc}$  вида (1) связан с зондирующим сигналом  $\vec{E}_{In}$  комплексной поляризационной матрицей *рассеивания* (ПМР)  $\dot{S}$

$$\vec{E}_{Sc} = \dot{S} \cdot \vec{E}_{In}. \quad (2)$$

ПМР  $\dot{S}$  описывает отражающие свойства объекта на ортогональных поляризациях (например,  $H, V$ )

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} \cdot e^{j\psi_{HH}} & S_{HV} \cdot e^{j\psi_{HV}} \\ S_{VH} \cdot e^{j\psi_{VH}} & S_{VV} \cdot e^{j\psi_{VV}} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

При моностатической радиолокации  $\dot{S}_{HV} = \dot{S}_{VH}$  [4]. В матрице (3) содержится вся информация об отражающих свойствах объекта при заданной частоте зондирования и фиксированном ракурсе наблюдения.

Когерентная декомпозиция ПМР (3) основана на ее представлении собственными числами  $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$  и собственными векторами  $\vec{\zeta}_E$  [9], которые определяются характеристическим уравнением

$$\dot{S} \cdot \vec{\zeta}_E = \dot{\lambda} \vec{\zeta}_E \quad (4)$$

и имеют вид [4, 9, 10]:

$$\dot{\lambda} = \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1 \cdot e^{j\psi_1} & 0 \\ 0 & \dot{\lambda}_2 \cdot e^{j\psi_2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\vec{\zeta}_E = \begin{bmatrix} \cos \theta_E & -\sin \theta_E \\ \sin \theta_E & \cos \theta_E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi_E \\ j \cdot \sin \varphi_E \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $\varphi_E$  и  $\theta_E$  – поляризационные параметры т.н. [4] собственной поляризации объекта. Физически собственные поляризации (6), соответствующие собственным числам (5) матрицы (3), характеризуются отсутствием в отраженном сигнале компонент, поляризованных ортогонально облучающей волне.

При этом собственные числа  $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$  ПМР  $\dot{S}$  являются комплексными коэффициентами отражения объекта при зондировании его сигналами собственных поляризаций, а собственные вектора  $\vec{\zeta}_E$  (6), соответствующие собственным числам ПМР  $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ , являются ортогональными по определению и образуют собственный синфазный ортогонально эллиптический поляризационный базис объекта.

Дальнейшим развитием теории декомпозиции объектов ДЗ стала разработка поляризационного оператора объекта ДЗ [10], показывающая в явном виде все преобразования зондирующего сигнала  $\vec{E}_{In}$  при его отражении от объекта ДЗ:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{Sc} \Big|_{HV} &= \left[ k \cdot \dot{S}(\varphi_T, \theta_T, \psi_T, \theta_E) \times \right. \\ &\left. \times \vec{E}_{in} \Big|_{HV} \cdot e^{j\varphi_E} \cdot e^{-\theta_E} \right] \cdot e^{-j\varphi_E} \cdot e^{\theta_E}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\dot{S}(\varphi_T, \theta_T, \psi_T, \theta_E) = e^{j\psi_T} \cdot \ddot{\Phi}(\varphi_T, \theta_E) \cdot \ddot{\Theta}(\theta_T), \quad (8)$$

$$\ddot{\Phi}(\varphi, \theta) = \left\{ \ddot{\Theta}[-(\theta + \pi/4)] \times e^{-j\varphi} \right\} \cdot \ddot{\Theta}(\theta + \pi/4) -$$

оператор изменения эллиптичности  $\varphi$  сигнала, ориентированного под углом  $\theta$  в плоскости  $(x0y)$ ;

$\ddot{\Theta}(\theta) = e^{j\theta}$  – оператор поворота системы координат на угол  $\theta$  в плоскости  $(x0y)$ ;

$k, \psi_T, \varphi_T, \theta_T$  – параметры трансформации амплитуды, фазы, эллиптичности, ориентации сигнала при отражении его объектом;

$\varphi_E, \theta_E$  – углы эллиптичности и ориентации собственного поляризационного базиса (6).

Параметры  $k, \psi_T, \varphi_T, \theta_T$  декомпозиции (8) определяются из ПМР  $\dot{S}$  по соотношениям, приведенным в [10]. Необходимо отметить, что разложение (8) является единственным и дают совокупность математически независимых параметров, поскольку основано на анализе собственных чисел (5) и векторов (6) ПМР (3).

Исследования [8, 11] показывают, что «амплитудная модуляция»  $k$  линейно зависит только от размеров (общей ЭПР) объекта, «модуляция эллиптичности»  $\varphi_T$  однозначно связана с «выпуклостью» объекта, «модуляция ориентации»  $\theta_T$  зависит от формы объекта независимо от его

ориентации и «выпуклости», «фазовая модуляция»  $\gamma$  однозначно связана с положением фазового центра объекта.

## 2. Экспериментальные исследования ПХ радиолокационных объектов

Для исследования ПХ радиолокационных объектов и возможности их обнаружения и распознавания по неэнергетическим параметрам отраженных сигналов проводились натурные эксперименты по измерению сигналов, отраженных различными металлическими объектами, в частности, трубами промышленных объектов (рис. 1 а), мачтами ретрансляторов (рис. 1 б) и телецентра г. Харьков, опорами высоковольтных линий электропередач (рис. 1 в) и др. Исследования производились с помощью автоматизированного радиолокационного поляриметра 3-х см диапазона [5] с разрешающей способностью по дальности 75 м и угловым разрешением  $3^\circ$  (по нулям диаграммы направленности антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях). Поляриметр размещался на крыше здания на высоте 20 м, дальность до измеряемых объектов составляла 2 – 9 км. Наведение антенн осуществлялось с помощью оптической системы телевизионного контроля на вершину объектов с целью уменьшения влияния местных предметов. Соотношение сигнал/фон составляло в эксперименте не менее 30 дБ, соотношение сигнал/шум – более 50 дБ (по мощности). Радиолокационный поляриметр обеспечивал в экспериментах измерение с частотой 100 Гц полной поляризационной матрицы *рассеивания* объекта (7) в ортогонально линейном ( $H, V$ ) поляризационном базисе с погрешностью измерения амплитуд не более 1 дБ и фаз – не более  $0,5^\circ$  при уровне поляризационной развязки каналов не менее 30 дБ. В режиме измерений со стробированием по дальности измерительная подсистема обеспечивала непрерывное накопление выборки ПМР объемом не менее 8192 отсчета в заданной точке пространства, положение которой устанавливалось программно с шагом 7,5 м и точностью не хуже  $\pm 0,5$  м.

В качестве примера на рис. 2, 3 представлены гистограммы элементов ПМР  $S_{HH}$  и  $S_{VV}$  объекта «труба промышленного объекта» (см. рис. 1а), построенные по 8192 отсчетам сигнала (82 с наблюдения). Для всех объектов такого типа характерно превышение  $S_{VV}$  над  $S_{HH}$  на 5–7 дБ, а также низкий уровень флуктуаций амплитуды отраженного сигнала (2–3 дБ).

Анализ инвариантных неэнергетических характеристик этой группы объектов показал, что они обладают сходными деполаризующими свойствами. Параметры трансформации эллиптичности  $\varphi_T$  распределены достаточно симметрично (рис. 4) в пределах  $5...25^\circ$  со средним  $16^\circ$  и среднеквадратическим отклонением (с.к.о)  $4^\circ$  для объекта «трубы»

(см. рис. 1а) и  $\varphi_T \in 4...22^\circ$  со средним  $14^\circ$  и с.к.о  $2^\circ$  для объекта «мачта» (см. рис. 1 б). Параметры трансформации ориентации  $\theta_T$  для указанных объектов также подобны (рис. 5) со средними  $60^\circ$  и  $46^\circ$  (с.к.о.  $3^\circ$  и  $19^\circ$ ) соответственно. Анализ гистограмм позволяет сделать вывод о том, что исследуемые металлические объекты практически неразличимы по данным ПХ, и, следовательно, инвариантные неэнергетические характеристики  $\varphi_T$  и  $\theta_T$  могут использоваться в качестве индикаторов металлических объектов.

Исследования ПХ сигналов, отраженных горными массивами, проводилось с помощью того же поляриметра в районе г. Феодосия. Производились измерения ПМР горного хребта, вид которого представлен на рис. 1 г, на дальности 5 – 8 км. Использовался режим непрерывной записи мгновенной реализации 4-х комплексных сигналов (по 256 отсчетов) с шагом по дальности 7,5 м в окне 2 км при неподвижной антенне.

Гистограммы элементов ПМР  $S_{HH}$  и  $S_{VV}$ , построенные по выборке 8192 отсчета и представленные в качестве примера на рис. 6, 7, имеют явно выраженный многомодовый характер с широким динамическим диапазоном отражений (30 – 40 дБ).

На рис. 8–11 представлены мгновенные реализации сигналов, отраженных горным хребтом, анализ которых показывает, что различные участки гор обладают различными деполаризующими свойствами. Так, например, на дальности  $d = 5,81$  км (отметка «1» на рис. 8 – 11) наблюдается значительная деполаризация сигнала при  $H$ -зондировании ( $S_{HV} \approx 2$  дБ при  $S_{HH} \approx 6$  дБ) с разностью фаз между  $H$  и  $V$  каналами приема  $\psi_{HH} - \psi_{HV} \approx 45^\circ$ , что соответствует правому вращению вектора напряженности электрического поля. На дальности  $d = 5,94$  км (отметка «2») отраженный сигнал поляризован практически линейно ( $\psi_{HH} - \psi_{HV} \approx 0$  и ориентирован почти горизонтально ( $S_{HH} \approx 7$  дБ,  $S_{HV} \approx -10$  дБ), а на дальности  $d = 6,37$  км (отметка «3») отражения на вертикальной поляризации превышают отражения на вертикальной ( $S_{VV} > S_{HH}$ ), кроссполаризационная компонента соизмерима с основными  $S_{HV} \approx +15$  дБ, а разность фаз отрицательна и достигает  $-48^\circ$ , что соответствует почти круговой поляризации левого вращения.

Предложенная в [10] декомпозиция ПМР объектов на совокупность математически независимых неэнергетических параметров позволяет разделить изменения ПХ сигналов при их отражении на преобразования, связанные с изменением ориентации объекта в пространстве (параметры собственной поляризации  $\varphi_E$  и  $\theta_E$  в (6), (8)), и на параметры

трансформации поляризации при отражении, связанные с формой и электрофизическими свойствами объекта ( $\varphi_T$ ,  $\theta_T$  в (8)).

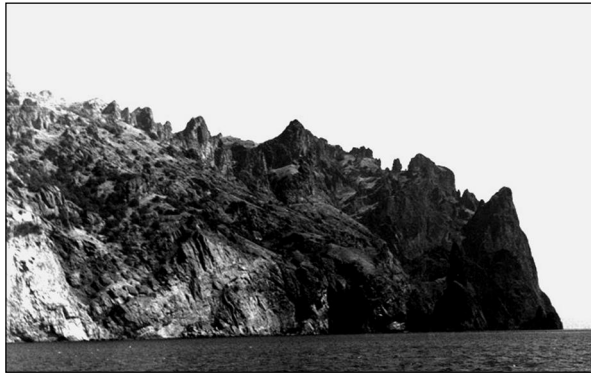
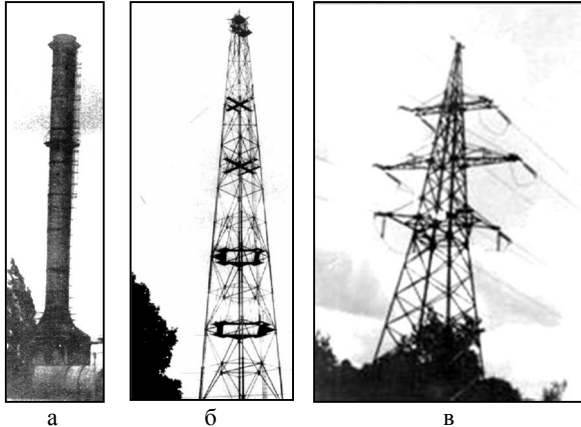


Рис. 1. Объекты экспериментальных исследований:  
а – труба промышленного объекта; б – мачта ретранслятора; в – опора линии электропередач;  
г – горный массив

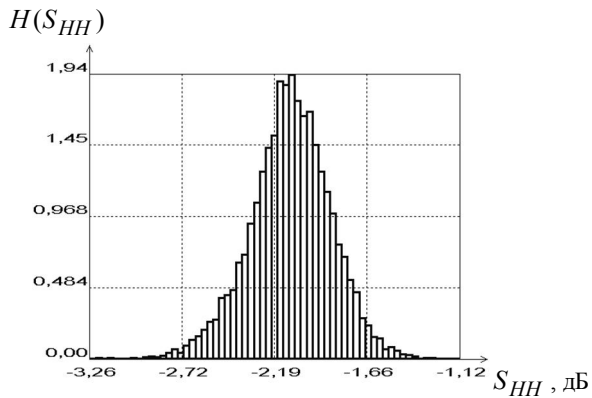


Рис. 2. Гистограмма элемента ПМР  $S_{HH}$  объекта «труба»

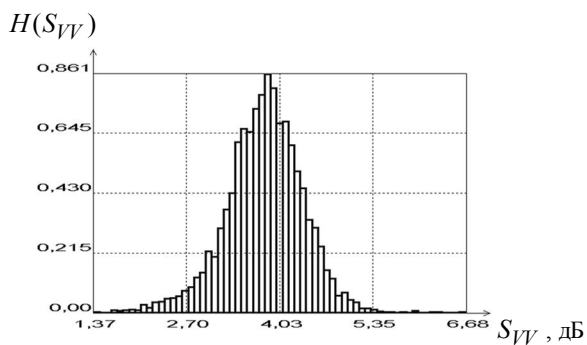


Рис. 3. Гистограмма элемента ПМР  $S_{VV}$  объекта «труба»

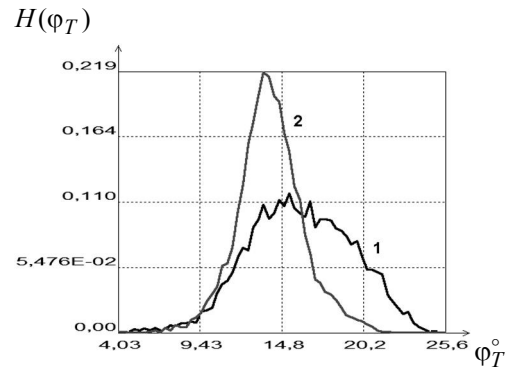


Рис. 4. Гистограммы ПХ  $\varphi_T$  объектов:  
1 – труба, 2 – мачта

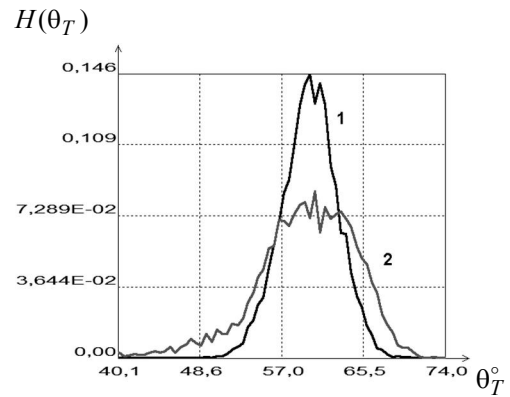


Рис. 5. Гистограммы ПХ  $\theta_T$  объектов:  
1 – труба, 2 – мачта

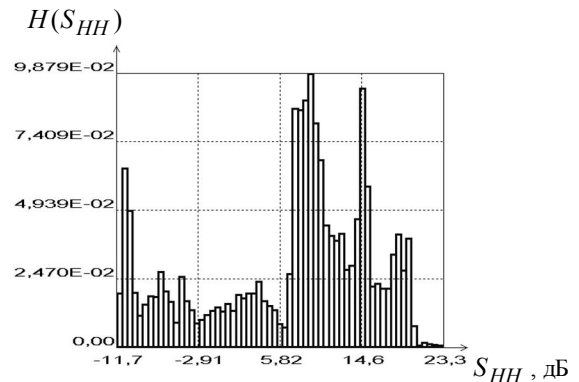


Рис. 6. Гистограмма элемента ПМР  $S_{HH}$  горного массива

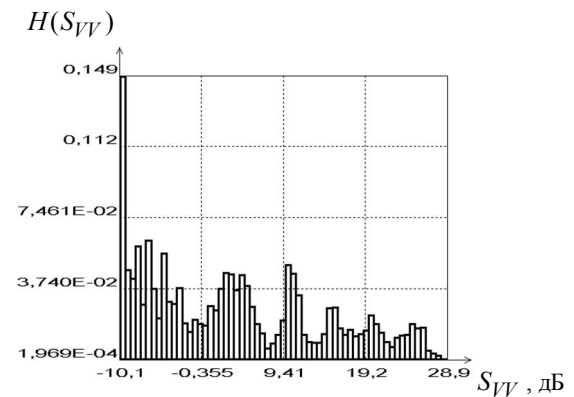


Рис. 7. Гистограмма элемента ПМР  $S_{VV}$  горного массива

Двухмерная гистограмма параметров собственной поляризации горного массива  $\varphi_E, \theta_E$  (т.е. поляризации сигнала, при зондировании которым будет получен максимум отраженного сигнала), представленная на поляриметрической диаграмме (рис. 12), показывает, что для данного объекта собственными являются линейные поляризации с произвольной ориентацией. Однако анализ реализаций  $\theta_E(d)$  (рис. 13) свидетельствует о корреляции ориентации отражений с амплитудой отраженных сигналов (см. рис. 8–10), что позволяет предположить взаимосвязь ориентации собственной поляризации с углом наклона отражающей поверхности. Естественно, данная гипотеза требует дальнейших исследований.

Эллиптичность отраженного сигнала, обусловленная разностью фаз его ортогонально поляризованных компонент (см. рис. 11), «проявляется» в параметре «трансформация эллиптичности»  $\varphi_T$ , в то время как параметр «трансформация ориентации»  $\theta_T$  распределен практически симметрично со средним  $9^\circ$  и с.к.о.  $15^\circ$ . Двумерная гистограмма параметров  $\varphi_T, \theta_T$  на поляриметрической диаграмме представлена на рис. 14 (отметка «2»). Там же показано положение гистограммы этих параметров для металлического объекта «вертикальная труба» (отметка «1»). Очевидно, что рассматриваемые объекты существенно отличаются по своим неэнергетическим параметрам  $\varphi_T, \theta_T$ , что может быть использовано для обнаружения металлических предметов на фоне гор.

### 3. Методология обнаружения объектов по неэнергетическим характеристикам сигналов

Решение классической задачи обнаружения [13] сводится к двухальтернативной процедуре принятия решения по максимуму апостериорной вероятности

$$P_k(\bar{x}) = p_k \cdot f_k(\bar{x}) / \sum_{i=1}^2 p_i \cdot f_i(\bar{x}), \quad k = 1, 2, \quad (9)$$

где  $p_k$  – априорные вероятности появления объектов  $k = 1, 2$ ;

$f_k(\bar{x})$  – плотности распределения вектора параметров сигнала  $\bar{x}$ ;

$P_k$  – апостериорные вероятности, на основании которых принимается решение в пользу объекта  $k$ .

В качестве плотности распределения  $f_k(\bar{x})$  в рассматриваемом случае могут использоваться оценки плотностей распределения исследуемых неэнергетических параметров  $\varphi_T, \theta_T$ , т.е.

$$\bar{x} = (\varphi_T, \theta_T),$$

полученные путем аппроксимации экспериментальных гистограмм, как показано на рис. 15, причем в качестве описания объекта «металл» использовалась смесь плотностей распределения 3 объектов, представленных на рис. 1. Необходимо отметить,

что в общем случае необходимо использовать многоальтернативные процедуры, поскольку на реальной местности могут находиться другие объекты, отличающиеся по своим ПХ.

Поскольку априорные вероятности в общем случае неизвестны, использовалась равновероятная гипотеза появления объектов строге дальности РЛС ( $p_k = 0,5, k = 1, 2$ ), и, таким образом, процедура принятия решения имела вид

$$\max_k (P_k(\bar{x})) \Rightarrow k, \quad (10)$$

$$P_k(\bar{x}) = f_k(\bar{x}) / \sum_{i=1}^2 f_i(\bar{x}), \quad k = 1, 2.$$

### 4. Результаты эксперимента по обнаружению металлических объектов на фоне гор

Для экспериментальной проверки возможности обнаружения малоразмерных металлических объектов на фоне гор на ровном участке горного массива (рис. 1 г) на дальности 6,81 км от РЛС устанавливалась вертикальная металлическая труба диаметром 0,5 м и длиной 5 м. Предполагалось, что ПХ данного объекта будут подобны характеристикам объектов, представленных на рис. 1. Для контроля положения объекта рядом с ним устанавливался трехгранный уголкового отражатель с длиной грани 50 см, отчетливо наблюдаемый на мониторе измерительного комплекса. После наведения антенн РЛС на объект обнаружения и определения его координат уголкового отражатель был демонтирован.

В эксперименте по обнаружению металлического объекта на фоне гор производилось многократное измерение отраженного сигнала в диапазоне дальностей 5,482 – 7,395 км с шагом по дистанции 7,5 м (при неподвижной антенне) с расчетом апостериорных вероятностей (9)  $P_1$  для металлического объекта и  $P_2$  для гор по статистическим моделям неэнергетических параметров сигнала  $\varphi_T, \theta_T$  (8). 32 реализации по 256 отсчетов полученных значений  $P_1$  представлены на рис. 16 в виде изображения. Принятие решения о наличии объекта обнаружения производилось согласно правила (10).

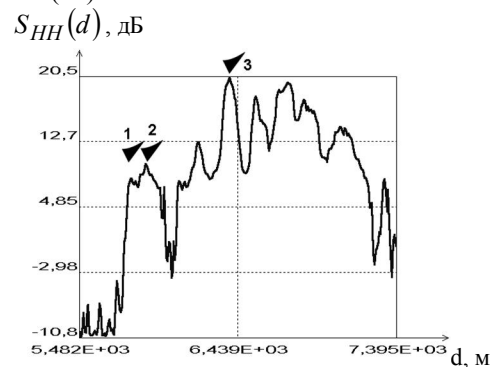


Рис. 8. Мгновенная реализация элемента ПМР  $S_{HH}$  горного массива

Обработка результатов эксперимента производилась в предположении, что при разрешающей способности РЛС 75 м и частоте дискретизации сигнала 20 МГц (шаг 7,5 м) в одной реализации сигнала должно присутствовать 10 отсчетов сигнала, отраженного объектом и 246 отсчетов сигнала от горного массива. Исходя из этого были определены:

$S_{VV}(d)$ , дБ

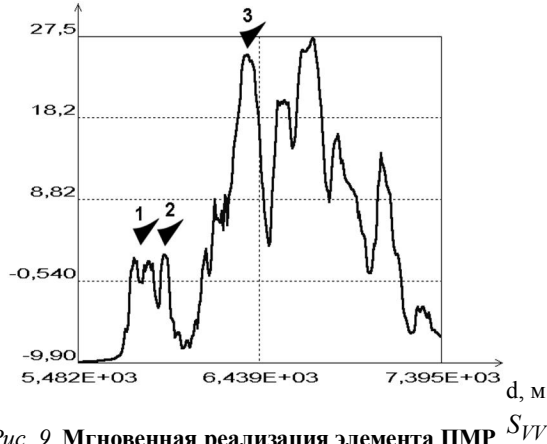


Рис. 9. Мгновенная реализация элемента ПМР  $S_{VV}$  горного массива

$S_{HV}(d)$ , дБ

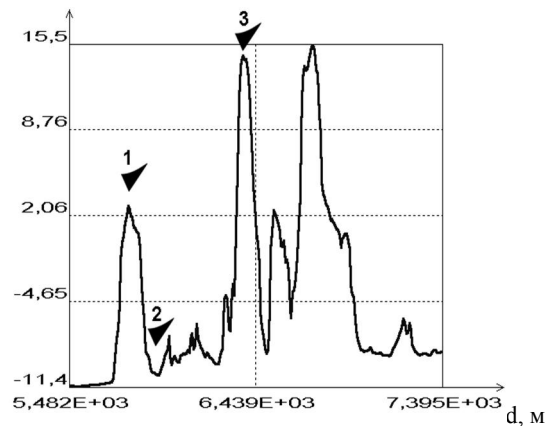


Рис. 10. Мгновенная реализация элемента ПМР  $S_{HV}$  горного массива

$\Delta\psi^\circ(d)$

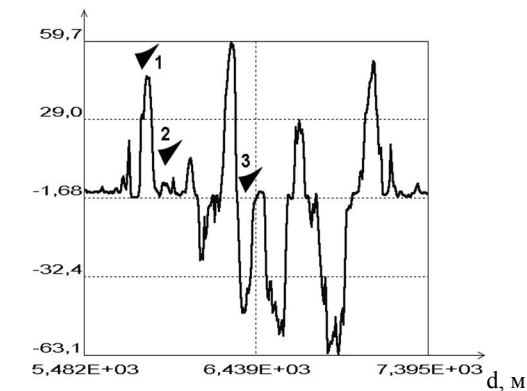


Рис. 11. Мгновенная реализация разности фаз элементов ПМР горного массива

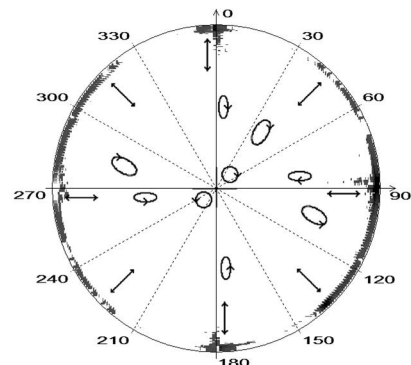


Рис. 12. Гистограмма собственной поляризации горного массива на поляриметрической диаграмме

$\theta_T^\circ(d)$

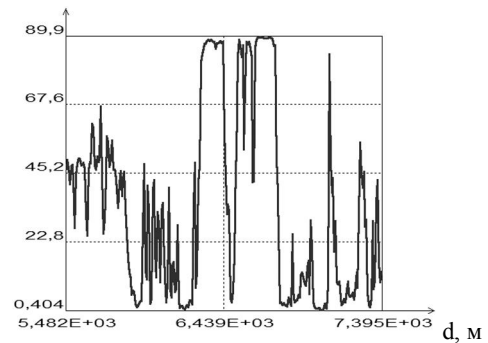


Рис. 13. Мгновенная реализация ориентации собственной поляризации горного массива

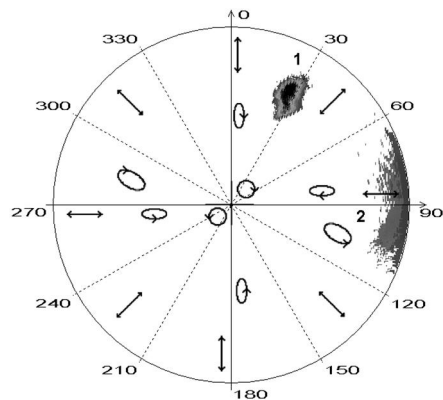


Рис. 14. Гистограмма параметров трансформации поляризации сигнала металлическим объектом (1) и горным массивом (2) на поляриметрической диаграмме

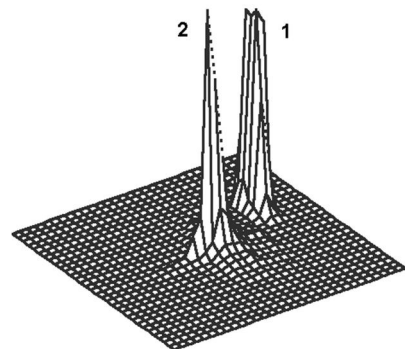


Рис. 15. Статистические модели металлического объекта (1) и горного массива (2)

- вероятность правильного обнаружения  $\approx 0,9$  ;
- вероятность ложной тревоги  $\approx 0,01$  ;
- вероятность пропуска цели  $\approx 0,1$  .

Необходимо отметить, что уверенное обнаружение ( $P_1 > 0,8$ ) наблюдалось только в 2–3-х отчетах из 10 в каждой реализации (см. рис. 16), что, возможно, связано с влиянием подстилающей поверхности на ПХ объекта обнаружения.

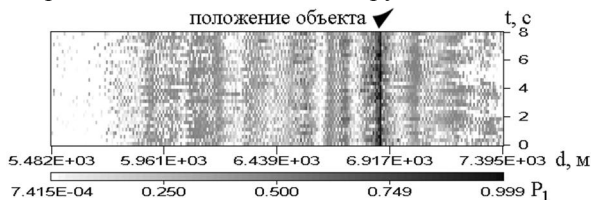


Рис. 16. Реализации апостериорной вероятности при обнаружении металлического объекта на фоне гор

### Выводы

Одним из перспективных направлений совершенствования радиолокационных средств обнаружения и распознавания объектов является использование поляризационной многоканальности, однако интерпретация получаемых при этом данных существенно зависит от методов их обработки. Экспериментально доказано, что сигналы, отраженные объектами различной электрофизической природы, имеют существенно различные поляризационные свойства.

В реальных сигналах, отраженных от гор (в отличие от металлических объектов), наблюдается преимущественно изменение ориентации собственной поляризации (поляризации зондирующего сигнала, при которой будет получен максимальный отраженный сигнал). В то же время металлические объекты (в отличие от гор) вызывают существенную трансформацию поляризации зондирующего сигнала. Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают высокую информативность инвариантных неэнергетических ПХ, получаемых на основе операторной декомпозиции ПМР объектов.

Экспериментально проверена возможность обнаружения металлических объектов на фоне горных массивов по неэнергетическим ПХ с достаточно высокими вероятностными характеристиками.

Полученные результаты создают предпосылки для совершенствования перспективных радиолокационных средств. Дальнейшие исследования следует сосредоточить на экспериментальных исследованиях возможности распознавания радиолокационных объектов по неэнергетическим поляризационным параметрам отраженных сигналов.

### Виявлення металевих об'єктів на фоні гірських масивів за неенергетичними поляризаційними характеристиками відбитих радіолокаційних сигналів

А.В. Попов, М.В. Борцова

Надано результати натурних експериментальних досліджень поляризаційних характеристик сигналів, відбитих гірським масивом і металевими об'єктами різної конфігурації. Показано, що поляризаційні параметри, отримані на

### Список литературы

1. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей [под ред. С.Н. Конюхова, В.И. Драновского, В.Н. Цимбала]. – К.: НАНУ, 2007. – 440 с.
2. Волосюк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко [под ред. В.Ф. Кравченко]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.
3. Cloude S.R. Polarisation: Applications in Remote Sensing / S.R. Cloude. – Oxford: Oxford University Press, 2009. – 352 p.
4. Козлов А.И. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия / А.И. Козлов, А.И. Логвин, В.А. Сарычев. – М.: Радиотехника, 2007. – 640 с.
5. Бабаков М.Ф. Применение поляризационно-модулированных сигналов для селекции и распознавания радиолокационных объектов / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 11. – С. 42-45.
6. Popov A.V. Informability of polarimetric radar invariants / A.V. Popov, O.B. Pogrebnyak // Proc. of SPIE. – 2003. – V. 5151. – P. 74-84.
7. Бабаков М.Ф. Використання поляризаційних ознак для визначення електрофізичних параметрів земних поверхонь / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов, П.Є. Сльцов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: зб. наук. праць. – Вип. 3. – Хмельницький, 1999. – С. 29-33.
8. Попов А.В. Оценка параметров движения объектов дистанционного зондирования по данным радиолокационного поляриметра / А.В. Попов, Р.В. Колесник // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 6(63). – С. 93-100.
9. Huijnen J.R. Phenomenological theory of radar targets / J.R. Huijnen // Electromagnetic scattering. – 1978. – P. 653-712.
10. Попов А.В. Операторное описание поляризационных характеристик объектов активного дистанционного зондирования / А.В. Попов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 5(62). – С. 94-102.
11. Попов А.В. Сравнительный анализ теорем декомпозиции поляризационных характеристик объектов активного аэрокосмического дистанционного зондирования / А.В. Попов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 5 (72). – С. 90-99.
12. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция / К.Г. Гусев, А.Д. Филатов, А.П. Сопов. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
13. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов: пер. с англ. / К. Фукунага. – М.: Наука, 1979. – 367 с.

Рецензент: доктор технических наук, профессор Г.И. Хлопов, Институт радиофизики и электроники, Харьков.

основі операторної декомпозиції поляризаційної матриці розсіювання об'єктів, мають близькі статистичні властивості для всіх досліджених металевих об'єктів, у той час як характеристики гірського масиву суттєво відрізняються від них. Наведено результати натурних експериментів з виявлення металевих об'єктів на фоні гір, що демонструють можливість їх виявлення з вірогідністю не нижче за 0,9, що створює передумови для вдосконалення радіолокаційних засобів.

**Ключові слова:** дистанційне зондування, поляризаційна матриця розсіювання, декомпозиція, оператор розсіювання, поляризаційні характеристики, виявлення.

#### Detection of metal objects against mountain ranges by non-energy polarization signatures of back scattered radar signals

A.V. Popov, M.V. Bortsova

*Results of full-scale experimental researches of polarization signatures of signals backscattered by a mountain range and by metal objects of different configurations are presented. It is shown that the polarization signatures received on basis of polarization scattering matrix operator decomposition have similar statistical properties for all the investigated metal objects whereas the signatures of the mountain range are essentially different. The results of full-scale experiments on detecting metal objects against mountain ranges that demonstrate possibility of their detection with probability of no less than 0.9 are adduced. All this founds premises for perfecting radar systems.*

**Keywords:** remote sensing, polarization scattering matrix, decomposition, backscattering operator, polarization signatures, detection

УДК 004.932: 621.383.7: 523.44

В.Е. Саваневич<sup>1</sup>, А.М. Кожухов<sup>2</sup>, А.Б. Брюховецкий<sup>2</sup>, А.С. Сыроватка<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

<sup>2</sup>Национальный Центр управления и испытаний космических средств, Евпатория

<sup>3</sup>Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СЕЛЕКЦИЯ СИГНАЛОВ ОТ НЕБЕСНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПЗС-КАДРЕ

*Предложен метод предварительной селекции сигналов от небесных объектов, основанный на сравнении с порогом значений пространственной свертки между принятым излучением, в окрестности пика изображения, и маской, соответствующей форме ожидаемого сигнала. Предложена новая модель распределения значений пространственной свертки, представляющая собой смесь нормального закона распределения и «хвоста» в области больших значений пространственной свертки. Для определения порога отбраковки пиков изображения, в окрестности которых отсутствуют сигналы от небесных объектов, производится приближенное выделение нормальной («фоновой») составляющей смеси распределений значений пространственной свертки по разработанному вычислительному методу. Метод использован авторами в разработанной системе автоматизированного обнаружения новых и известных астероидов.*

**Ключевые слова:** сигналы – методы обнаружения, ПЗС-кадр.

#### Постановка проблемы

Для оптимального обнаружения сигнала используются корреляционные обнаружители [1], в которых вычисляется корреляционный интеграл – интеграл произведения принятого сигнала на форму ожидаемого сигнала, и сравнивается с пороговым значением.

Для случая приема оптического излучения на фотоприемник типа ПЗС-матрицы, для корреляционного обнаружителя используется пространственная свертка [2] принятого излучения с пространственной формой ожидаемого сигнала.

Так как при смещении местоположения сигнала внутри пикселя его форма будет меняться, то для

проведения оптимального обнаружения сигнала на ПЗС-кадре необходимо провести вычисление значения пространственной свертки для каждого возможного положения сигнала на ПЗС-кадре с шагом, пропорциональным потенциальной точности оценки параметров обнаруживаемого сигнала. С учетом того, что потенциальная точность оценки параметров сигнала может составлять до 0,01 пикселя [3] количество положений сигнала может составлять значительное количество для каждого пикселя ПЗС-матрицы. Современные ПЗС-кадры насчитывают миллионы пикселей, поэтому проведение оптимального обнаружения может повлечь за собой неприемлемые вычислительные затраты.