



УДК 621.396.96

## ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ\*

**Е.В. БУРДАНОВА<sup>1</sup>**  
**Р.А. МАМАТОВ<sup>1</sup>**  
**В.П. ВОЛЧКОВ<sup>2</sup>**

<sup>1)</sup> *Белгородский государственный  
национальный исследовательский  
университет*

<sup>2)</sup> *Московский технический универ-  
ситет связи и статистики*

*e-mail:*  
*burdanova@bsu.edu.ru*  
*mamatov\_r@bsu.edu.ru*

Рассматриваются особенности построения алгоритмов обработки радиолокационных изображений при решении задачи обнаружения объектов на земной поверхности. Алгоритмы основаны на использовании метода полного поляризационного зондирования.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, поляризационный вектор рассеивания, ковариационно-поляризационная матрица, поляризация, земная поверхность, неподвижный объект.

### Введение.

Среди известных методов поляризационной обработки радиолокационных изображений, которые могут быть использованы при обнаружении объектов на земной поверхности, можно выделить два основных. Первый метод основан на полном поляризационном приеме отраженных сигналов, а второй – на полном поляризационном зондировании [1]. Полный поляризационный прием предполагает излучение сигналов одной поляризации и прием двух ортогонально поляризованных компонентов сигналов. При полном поляризационном зондировании производится измерение поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) объекта [1,2], т.е. - измерение амплитуд и фаз четырех когерентно связанных ортогонально поляризованных компонент сигналов, отраженных от каждого разрешаемого элемента объекта (два когерентно связанных полных приема, которые могут быть организованы либо одновременно, либо последовательно во времени). Применение полного поляризационного зондирования позволяет существенно повысить информативность и помехозащищенность за счет использования многомерных (векторных) зондирующих сигналов и совместной обработки компонентов векторов принятых сигналов (ПВР - поляризационных векторов рассеяния объектов, образованных из элементов их поляризационных матриц рассеяния [1]). Однако такой путь повышения информативности влечет за собой как увеличение аппаратной части локационных систем, с выполнением ряда специфических требований, так и вычислительных затрат, определяемых увеличением объема обрабатываемой информации. Для отработки таких технологий необходимо проводить моделирование и макетирование систем с поляризационной обработкой информации.

Макетирование системы с поляризационной обработкой информации

Предлагаемый макет радиолокационной системы с поляризационным зондированием обеспечивает измерение ПВР радиолокационных объектов на линейных поляризациях в трехсантиметровом диапазоне волн. В макете реализовано последовательное во времени излучение когерентно связанных ортогональных по поляризации сигналов, а также одновременный когерентный прием соответствующих отраженных ортогонально поляризованных составляющих сигнала.

В состав макета входит двухканальная по поляризации антенна выполненная по схеме Коссегрена с основным зеркалом в виде параболоида вращения и с облуча-

\* Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы г.к. П1260.



телем на круглом волноводе. Диаграмма направленности антенны симметричная, шириной не более 3-х градусов. Поляризационный разделитель, создан на основе круглого и ортогонально расположенных прямоугольных волноводов, находящихся в основании облучателя, обеспечивает двухканальную работу антенны на передачу и прием. Привод управления положением антенны по азимуту, обеспечивает сканирование антенны по азимуту в зоне  $\pm 105^\circ$ .

Передачик, обеспечивающий излучение СВЧ импульсов длительностью 0,8  $\pm$  0,15 мкс мощностью от 0.35 до 3.5 кВт на частоте 9375 МГц с частотой повторения импульсов 400 Гц;

Приемник сигналов горизонтальной поляризации, приемник сигналов вертикальной поляризации.

Устройство сопряжения (УС) аналоговой части аппаратуры макета со спецвычислителем (СВ) и спецвычислитель на базе ПЭВМ.

Технические характеристики макета:

- режимы коммутации плоскости поляризации радиоимпульсов, излучаемых антенной: вертикальная, горизонтальная (через период);
- развязка по поляризации излучаемых колебаний на выходе коммутатора плоскости поляризации не менее 25 дБ;
- развязка по поляризации антенных каналов не менее 20 дБ;
- частота сканирования антенны по азимуту 0,3 Гц;
- чувствительность приемных устройств не менее 90 дБ/мВт;
- динамический диапазон приемных каналов не менее 75 дБ;
- ошибки измерения амплитуд сигналов не более 15 %;
- диапазон измерения разности фаз сигналов (между основной и кроссовой составляющей сигнала) 0-360 град.;
- ошибки измерения разности фаз сигналов не более 15 град.;
- разрядность аналого-цифровых преобразователей в каналах измерения амплитуд и фаз сигналов – 8.

В процессе подготовки аппаратуры, при её комплексных настройках и проверках проводится калибровка каналов измерения амплитуд и юстировка каналов измерения фаз ортогонально поляризованных компонентов отраженных сигналов. Для калибровки используется набор эталонных (угловых) отражателей, а для юстировки – ответные линейно-поляризованные сигналы, ориентированные в картинной плоскости под углом 45 град. к поляризационному базису антенны макета.

**Особенности построения алгоритмов обработки радиолокационных изображений.**

Алгоритм обнаружения объектов на земной поверхности основан на обнаружении неоднородностей совместного распределения входного процесса (входных данных) по координатам: дальность и азимут. В алгоритме используются результаты зондирования на двух ортогональных линейных поляризациях. Обработка отраженного сигнала основана на анализе апостериорных параметров распределения помехи.

Входной сигнал можно представить в виде ПВР:

$$\dot{\mathbf{U}}_i = \begin{pmatrix} U_{11}(t)e^{j\varphi_1} \\ U_{21}(t) \\ U_{12}(t) \\ U_{22}(t)e^{j\varphi_2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

где  $U_{11}(t), U_{21}(t), U_{12}(t), U_{22}(t)$  – оцифрованные амплитуды сигнала в момент времени  $t$ , (первый индекс означает поляризацию излучаемой волны, второй индекс озна-



чает поляризацию принимаемой волны, вертикальная поляризация имеет индекс = 1, горизонтальная поляризация имеет индекс = 2)  $\varphi_1, \varphi_4$  – соответствующие относительные фазы сигнала [3].

При совмещении передающих и приемных антенн имеет место равенство  $U_{21}(t) = U_{12}(t)$  [4] (теорема взаимности), поэтому модель принимаемого сигнала можно представить в виде ПВР, состоящего из трех линейно независимых компонент

$$\dot{\mathbf{U}}_i = \begin{pmatrix} \dot{U}_{11}(t_i) \\ \dot{U}_{21}(t_i) \\ \dot{U}_{22}(t_i) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Получаемый в результате измерений ПВР вектор является случайным, вследствие непредсказуемого влияния на результаты измерений множества неконтролируемых факторов (шумы приемных каналов, ошибки измерителя и т.д.).

Геометрическая иллюстрация к процедуре получения и обработки данных измерений приведена на рис. 1. Здесь  $N_d \times N_b$  – общее количество пикселей исследуемого радиоизображения (белая область),  $N_{od} \times N_{ob}$  – количество пикселей фрагмента радиоизображения, используемого для оценивания характеристик фонового отражения (светло-серая область),  $N_{pd} \times N_{pb}$  – количество пикселей фрагмента радиоизображения, подвергаемого анализу на предмет обнаружения объекта (темно-серая область).

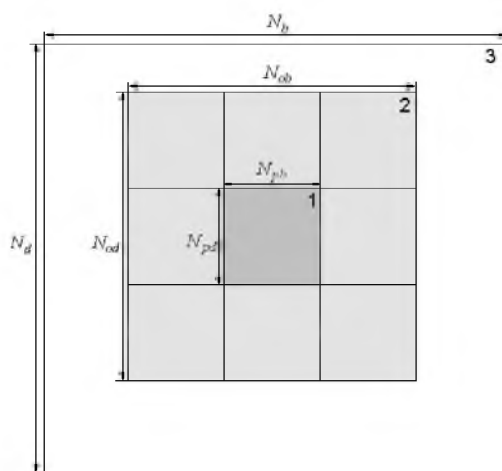


Рис. 1. Принцип формирования окон усреднения

Процедура обработки измерений состоит в том, что выбирается некоторый сектор радиоизображения размера  $N_{pd} \times N_{pb}$  (область 1 рис. 1), относительно которого предполагается принятие решения о наличии или отсутствии в нем объекта, который существенно изменяет характеристики отражённых сигналов по сравнению с окружающей поверхностью (неоднородность отражений). Наличие на рисунке белой области иллюстрирует тот факт, что подобный анализ проводится для многих фрагментов радиоизображения, а использование большего размера окаймляющего анализируемый участок фрагмента земной поверхности позволяет снизить риски при принятии решений (в том числе из-за наличия также и в его пределах создающего неоднородности объекта) на основе усреднений по большому объему выборочных данных (уменьшаются погрешности оценивания вероятностных характеристик отражённых сигналов).



В основу алгоритма положено решающее правило, построенное по критерию Неймана-Пирсона, в соответствии с которым обеспечивается получение максимума вероятности правильного обнаружения  $D$  при заданной вероятности ложной тревоги  $F$ . Считаем, что условные плотности распределения вероятности входного сигнала при наличии и отсутствии цели описываются нормальным законом.

Решающее правило процедуры выделения строится при условии априори неизвестных параметров распределения полезного сигнала, т.е. сигнала, отраженного от цели. Параметры распределения помехи оцениваются в процессе наблюдения. Проверяемой, в текущем элементе разрешения, гипотезой является гипотеза об отличии текущих параметров распределения входного сигнала от этих параметров распределения в некоторой окрестности данного текущего элемента разрешения. Окрестностью элемента разрешения является задаваемая величина окна усреднения по дальности и по азимуту. Размеры окна усреднения выбираются исходя из параметров стационарности помехи по дальности и по азимуту (рис. 1).

В рамках теории статистических решений показано, что все виды решающих правил основаны на формировании отношения правдоподобия  $L$  и сравнении его с определенным порогом  $h_\alpha$ , значение которого определяется выбранным критерием качества:

$$L = \frac{W_1(U_{1n})}{W_0(U_{0n})} \begin{cases} \geq h_\alpha & \text{если гипотеза } H_0 \text{ отвергается} \\ < h_\alpha & \text{при справедливости гипотезы } H_0 \end{cases}, \quad (3)$$

где  $W_0(U_{0n})$ ,  $W_1(U_{1n})$  – плотности вероятностей выборочных значений случайных величин соответствующих принятию и непринятию гипотезы  $H_0$  соответственно,  $h_\alpha$  – порог принятия решения.

Для построения решающей функции обнаружения необходимо определить многомерное распределение вероятности данных поляризационных радиолокационных измерений и провести оценку вероятностных характеристик принимаемых сигналов. Оценки вероятностных характеристик принимаемых сигналов обладают достаточно высокой реакцией на наличие неоднородности [5,6], поэтому как оценка векторов МО, так и оценка ковариационно - поляризационной матрицы (КПМ) может быть использована в качестве решающей функции (РФ). Вместе с тем, представляется целесообразным использовать интегральную форму, которая объединяет (комплексирует) реакции указанных оценок. Такое комплексирование можно осуществить, если в качестве модели решающей функции использовать аппроксимацию отношения правдоподобия на основе гауссовской функции плотности вероятностей (ФПВ). Выражения для плотностей вероятностей выборочных значений ПВР соответствующих принятию и непринятию гипотезы  $H_0$  можно соответственно записать в следующем виде (4), при этом, имеются в виду отношение гауссовых аппроксимаций ФПВ для отражений от участка анализа и для отражений от фонового окружения (рис. 1).

$$W_0(\dot{\mathbf{U}}_i) = \frac{1}{(2\pi)^N (\det \hat{\mathbf{R}}_{\text{оф}})^N} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\dot{\mathbf{U}}_i - \dot{\mu}_{\text{оф}})^* \hat{\mathbf{R}}_{\text{оф}}^{-1} (\dot{\mathbf{U}}_i - \dot{\mu}_{\text{оф}}) \right]$$

$$W_1(\dot{\mathbf{U}}_i) = \frac{1}{(2\pi)^N (\det \hat{\mathbf{R}}_{\text{яа}})^N} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\dot{\mathbf{U}}_i - \dot{\mu}_{\text{яа}})^* \hat{\mathbf{R}}_{\text{яа}}^{-1} (\dot{\mathbf{U}}_i - \dot{\mu}_{\text{яа}}) \right] \quad (4)$$

где:  $\hat{\mu}_{оф}$ ,  $\hat{\mu}_{ya}$ ,  $\hat{R}_{оф}$ ,  $\hat{R}_{ya}$  – оценки векторов МО и КПМ окаймляющего фрагмента и участка анализа соответственно (рис.1);  $\hat{U}_i$  – выборочные значения ПВР.

Функция плотности вероятности ПВР гауссова, т.к. на наблюдения влияет большое число независимых случайных факторов, причем каждый из них по отдельности оказывает лишь малое воздействие. Задача рассматривается для случая однопозиционной локации.

При этом модель РФ имеет вид

$$L = \left( \frac{\det \hat{R}_{оф}}{\det \hat{R}_{ya}} \right)^{K_{ya}} \exp \left\{ \sum_{i=1}^{K_{ya}} \left( \left( \hat{U}_{i,ya} - \hat{\mu}_{оф} \right)^* \hat{R}_{оф}^{-1} \left( \hat{U}_{i,ya} - \hat{\mu}_{оф} \right) - \left( \hat{U}_{i,ya} - \hat{\mu}_{ya} \right)^* \hat{R}_{ya}^{-1} \left( \hat{U}_{i,ya} - \hat{\mu}_{ya} \right) \right) / 2 \right\}, \quad (5)$$

где:  $\hat{\mu}_{оф}$ ,  $\hat{\mu}_{ya}$ ,  $\hat{R}_{оф}$ ,  $\hat{R}_{ya}$  – оценки векторов МО и КПМ окаймляющего фрагмента и участка анализа соответственно (рис.1);  $\hat{U}_{i,ya}$ ,  $i = 1, \dots, K_{ya}$  – векторы, отражаемых от участка анализа сигналов в количестве  $K_{ya}$ , в данном случае  $K_{ya} = 480$ .

РФ заключается в сравнении отношения правдоподобия с порогом  $h_\alpha$  и принятием решения о наличии или отсутствии неоднородности на земной поверхности, порождаемой наличием объекта в разрешаемом объеме.

#### Экспериментальная часть.

Результаты экспериментальных исследований по обнаружению объектов на земной поверхности, проводимые с использованием макета БРЛС «Гроза-40М», и приведены на рис. 2-4. В качестве земной поверхности использовалась территория аэропорта г. Белгорода и прилегающие к ней окрестности. В качестве объектов использовались строения и наземные объекты (самолеты, РЛС курса – глиссады и т.д.), находящиеся в пределах сектора сканирования антенны РЛС.

На рис. 2, в качестве примера, приведены значения амплитуд сигналов на выходе канала вертикальной поляризации приемного устройства макета БРЛС «Гроза-40М». По оси «х» отложены значения азимута в градусах, по оси «у» значения дальности в метрах (так же на всех последующих рисунках). По оси «z» значения амплитуд на выходе приемного канала.

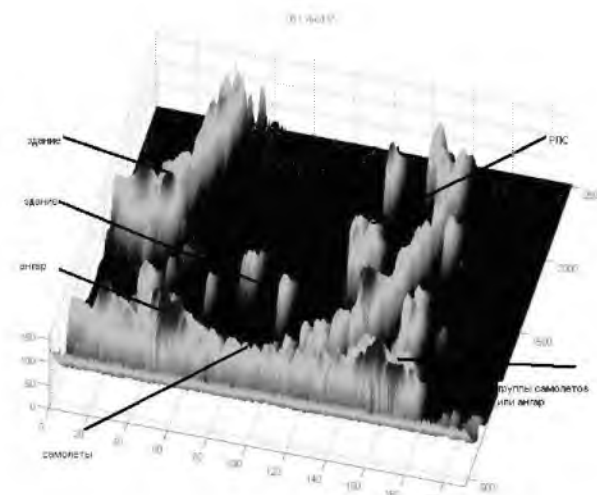


Рис. 2. Значения амплитуд сигналов на выходе канала вертикальной поляризации

При работе алгоритма обработки радиолокационных изображений были получены следующие результаты.

На рис. 3 приведены значения отношения правдоподобия для обнаруженных объектов при заданной вероятности ошибки первого рода  $10^{-4}$  и количеством пикселей радиоизображения фрагмента, окаймляющего участок анализа на предмет обнаружения объекта 18 x 24 единичных отсчетов по азимуту и дальности.

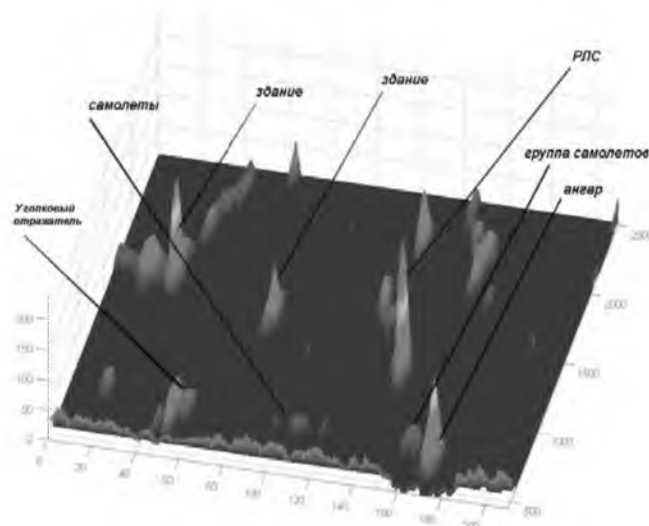


Рис. 3. Значения отношений правдоподобия обнаруженных объектов

На рис. 4 приведены значения отношения правдоподобия для обнаруженных объектов при заданной вероятности ошибки первого рода  $10^{-3}$  и тех же размерах окна окрестности элемента разрешения.

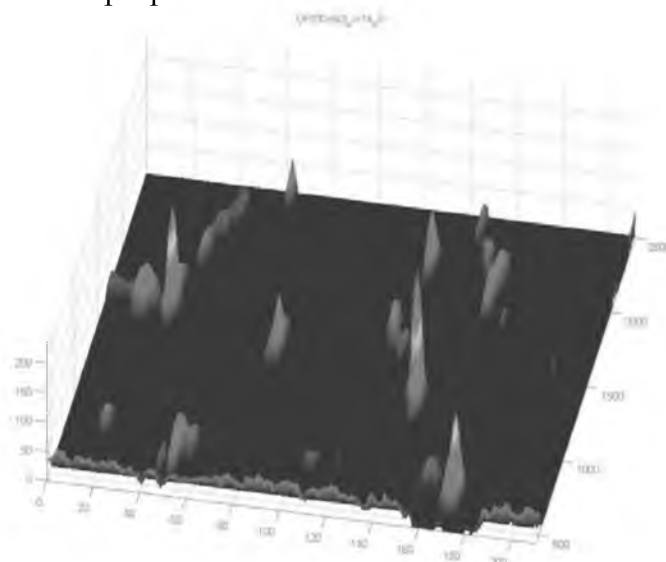


Рис. 4. Значения отношений правдоподобия обнаруженных объектов, вероятности ошибки первого рода  $10^{-3}$

Полученные результаты зависимостей оценки вероятности правильного обнаружения  $D$ , от отношения сигнал/шум ( $q^2c/ш$ ) по мощности в дБ приведены на



рис. 5. При этом отношение сигнал/помеха по мощности составляло порядка минус 5 дБ. Вероятность ложной тревоги  $F$  задавалась:  $F=10^{-2}$  (график 1),  $F=10^{-3}$  (график 2),  $F=10^{-4}$  (график 3).

Шумы приемных каналов полагались нормально распределенными, некоррелированными и независимыми при воздействии на каждый из компонентов ПВР [7].

СКО шума задавалось с помощью такого параметра как отношение сигнала/шум по мощности

$$q_{с/ш}^2 = \frac{\text{Sp}(\dot{\mathbf{M}})}{\text{Sp}(\dot{\mathbf{M}}_{ш})}, \quad (6)$$

где:  $\mathbf{M}$  – КПМ сигнала,  $\mathbf{M}_{ш}$  – ковариационная матрица шума, определяемая как

$$\dot{\mathbf{M}}_{ш} = \sigma_{ш}^2 \mathbf{I}. \quad (7)$$

След матрицы  $\mathbf{M}_{ш}$  будет определяться как

$$\text{Sp}(\dot{\mathbf{M}}_{ш}) = n\sigma_{ш}^2. \quad (8)$$

Следовательно

$$\sigma_{ш} = \sqrt{\text{Sp}(\dot{\mathbf{M}})/nq_{с/ш}^2}. \quad (9)$$

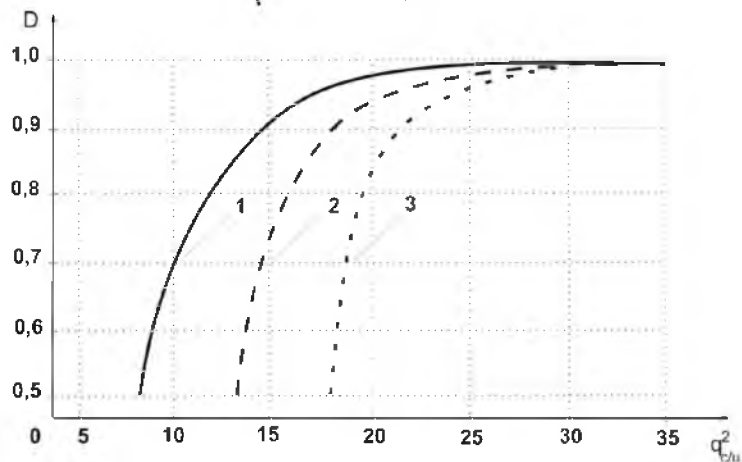


Рис. 5. Зависимость оценки вероятности  $D$  от отношения сигнала/шум при отношении сигнал/помеха минус 5 дБ.

Из рис. 5 видно, что вероятность правильного обнаружения порядка 0,95 при вероятности ложной тревоги  $10^{-4}$ , при отношении сигнал/помеха порядка минус 5 дБ достигается при отношении сигнал/шум порядка 23 дБ.

Были проведены аналогичные расчеты при отношении сигнал/помеха порядка минус 7-8 дБ. При этом аналогичные показатели обнаружения достигаются при отношении сигнал/шум порядка 25-27 дБ.

#### **Заключение.**

Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что разработанные алгоритмы позволяют обнаруживать неоднородности на земной поверхности с вероятностью правильного обнаружения, равной 0,95% и при вероятности ошибки первого рода  $=10^{-4}$ , при отношении сигнал/помеха порядка минус 5 дБ достигается при отношении сигнал/шум порядка 23 дБ.

#### **Список литературы**

1. Киселев А.З. Теория радиолокационного обнаружения на основе использования векторов рассеяния целей // 2-е изд. – СПб.: Наука. 2005. – 295 с.
2. Козлов А.И. Свойства статистических параметров элементов матрицы рассеивания радиолокационных целей // Изв. вузов Сер. Радиоэлектроника, 1979, т. 22, № 1, с. 14-18.



3 Бурданова, Е.В. Моделирование решающих функций при обнаружении объектов по радиолокационным данным / Е.В. Бурданова, А.П. Денисов // Научные ведомости БелГУ, серия история, политология, экономика, информатика. – Белгород, 2009 – выпуск 9/1 №1(56). – С. 51-55

4. Татарский, Б.Г. Многофункциональные радиолокационные системы / П.И. Дудкин, А.Р. Ильчук, Б.Г. Татарский – М.: Дрофа, 2007. – С. 283.

5. Дикуль О.Д., Мартынчук А.А., Олейник И.И., Омельченко А.И., Храбростин Б.В., Храбростин Д.Б. Радиолокационный комплекс для измерения поляризационных векторов рассеяния объектов // Сборник докладов XVIII научно-технической конференции ОАО «НИИ Приборостроения им. В.В. Тихомирова», г. Жуковский. 2005 – с. 263-272.

6. Олейник И.И., Омельченко А.И. Решающее правило и оценка показателей качества распознавания одного радиолокационного объекта на фоне другого при полном поляризационном зондировании // СНТ - Харьков: ХВУ - 2002, вып. 1/39/ - с.79...81.

7. Либенсон М.Н., Хесин А.Я., Янсон Б.А. Автоматизация распознавания телевизионных изображений. – М.: Энергия, 1975. – 160с.

## **«TECHNICAL REALIZATION OF ALGORITHMS OF PROCESSING RADIOLO-KATSIONNYH OF IMAGES AT DETECTION OF OBJECTS ON THE TERRESTRIAL SURFACE»**

**E.V.BURDANOVA**  
**R.A.MAMATOV**  
**V.P. VOLCHKOV**

*Belgorod National  
Research University*

*e-mail:*  
*burdanova@bsu.edu.ru*  
*mamatov\_r@bsu.edu.ru*

Features of construction of algorithms of processing of radar-tracking images are considered at the decision of a problem of detection of objects on a terrestrial surface. Algorithms are based on use of a method of full polarizing sounding.

Key words: the radar-tracking image, a polarizing vector of dispersion, kovaria-tсионno – a polarizing matrix, polarization, a terrestrial surface, motionless object.