

---

УДК 623.556.3

## **Математическое моделирование и алгоритмы распознавания целей на изображениях, формируемых прицельными системами летательного аппарата**

**Бельский А. Б.<sup>\*</sup>, Чобан В. М.<sup>\*\*</sup>**

*Московский вертолетный завод имени М.Л. Миля,  
Гаршина ул., 26/1, Томилино, Московская обл., 140070, Россия*

*\*e-mail: abelskiy@mi-helicopter.ru*

*\*\*e-mail: chobanvm@inbox.ru*

### **Аннотация**

В статье рассмотрены теоретические основы моделирования тепловизионных изображений, формируемых оптико-электронными системами летательных аппаратов для их анализа, обработки и разработки алгоритмов распознавания. Предложен системный подход в решении задач формирования признакового пространства, распознавания целей на тепловизионных изображениях фоно-целевой обстановки и определения углового рассогласования между направлением на цель и линией визирования оптико-электронной обзорно-прицельной системы летательного аппарата.

### **Ключевые слова**

математическая модель тепловизионного изображения, предварительная обработка изображения, сегментация изображения, выделение контуров объектов на изображении, распознавание изображения

Оптико-электронные обзорно-прицельные системы (ОЭ ОПС) формирования, обработки и визуализации инфракрасных изображений находят все более широкое применение на самых различных летательных аппаратах (ЛА). В последнее время основное внимание уделяется вопросам цифровой обработки изображений. Современные системы технического зрения работают в различных спектрах электромагнитного излучения, однако приоритет отдается инфракрасному (ИК) диапазону, включающему ближнюю (0,9-1,7 мкм), среднюю (3-5

мкм) и длинноволновую область (8-12 мкм). Последний диапазон отличается более высоким пропусканием через задымленную атмосферу и более высокой чувствительностью по отношению к целям с температурой, близкой к температурам окружающей среды [15,17]. в диапазоне 8-12 мкм по отношению к диапазону 3-5 мкм примерно в 10 раз меньше помех от излучения неоднородностей небосвода, переотраженного от взволнованной морской поверхности, что особенно важно при захвате и сопровождении низколетящих и надводных целей.

В военном применении съемка в ИК-диапазоне 8-12 мкм также предпочтительней из-за большей защищенности от организованных оптических помех.

Для решения задач распознавания целей в формируемом изображении необходима разработка специальных алгоритмов.

Анализ алгоритмов обработки изображений включает обработку статического изображения, полученного от ИК-каналов ОЭ ОПС ЛА, их оцифровку с последующей электронной обработкой. Однако такой подход возможен только на ранних стадиях исследования разрабатываемых алгоритмов, так как он не оценивает работоспособность алгоритма для динамики обработки реалистичных изображений при помощи бортовой вычислительной системы. С развитой машинной графикой, обеспечивающей потоковое отображение динамических сюжетов на экране монитора в кабине ЛА, изображения последовательно сменяют друг друга. Решение задач, связанных с обработкой изображений, требует высокой точности их моделей. Формирование реалистичных изображений предусматривает передачу всей совокупности изобразительных свойств, включая: объемность, расположение предметов в сюжете, полутона, цвет, текстура поверхности и т.п., при этом обобщенная математическая модель получаемого синтезированного изображения объекта включает в себя как модель объекта (цели с фоном), так и модель приемника излучения.

## **1. Математическое моделирование тепловизионного изображения фоноцелевой обстановки**

Наиболее широкое применение в компьютерной графике при моделировании изображений в различных диапазонах длин волн получили методы прямого и обратного трассирования лучей. При прямом трассировании за исходную позицию берут вычисляемую точку на поверхности объекта 1 (рис. 1а) и моделируют прохождение луча как на источник света, так и на приемник излучения 3. При обратном трассировании моделируется обратный ход светового луча. За исходное положение принимают центр рецептора 1 на приемнике излучения и моделируют его путь на объект 2 и затем на источник света 3.

## 1.1. Математическая модель объекта

Описание трехмерных объектов при методе прямого трассирования лучей наиболее часто представляют в виде отдельных многоугольников. Вся фоно-целевая обстановка, состоящая из многоугольников, описывается через координаты вершин многоугольников в связанной системе координат цели  $\bar{S}_{iu} = \{s_{xiu}, s_{yiu}, s_{ziu}\}$ .

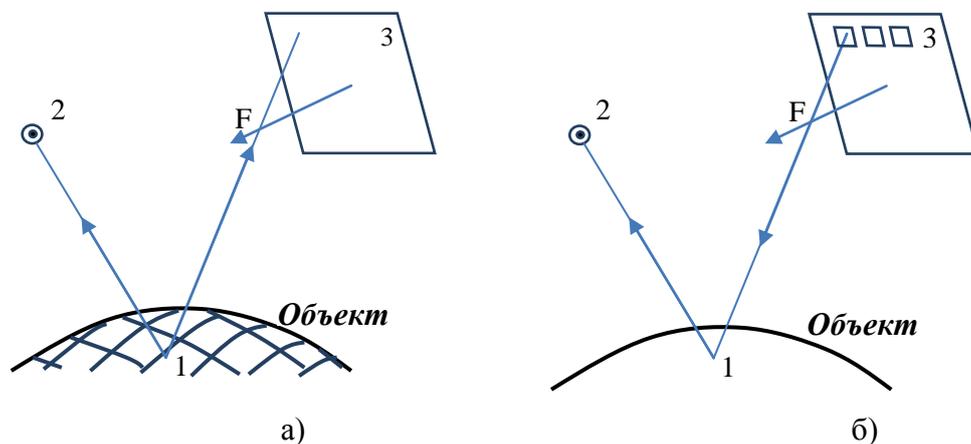


Рисунок 1

Для того, чтобы спроецировать многоугольники на приемник, необходимо провести ряд преобразований и получить координаты вершин многоугольников в системе координат (СК) приемника:

$$\bar{S}_{ig} = A_{ug} \cdot \bar{S}_{iu} + \bar{X}_u; \quad \bar{S}_{il} = A_{g1} \cdot (\bar{S}_{ig} - \bar{X}_n); \quad \bar{S}_{ik} = A_{1k} \cdot \bar{S}_{il};$$

где  $\bar{S}_{ig}$ ,  $\bar{S}_{il}$ ,  $\bar{S}_{ik}$  – координаты вершин многоугольников в земной СК, связанной СК носителя и СК приемника, соответственно;  $A_{ug}$ ,  $A_{g1}$ ,  $A_{1k}$  – матрицы перехода из связанной СК цели в земную, из земной в связанную носителя и из связанной носителя в СК приемника;  $\bar{X}_u$ ,  $\bar{X}_n$  – координаты цели и носителя в земной СК.

После преобразования координат вершин многоугольников в СК приемника необходимо вычислить координаты в СК экрана (рис. 2):

$$\Delta_{1i} = -f_{об} * S_{yik} / S_{xik}, \quad \Delta_{2i} = f_{об} * S_{zik} / S_{xik}.$$

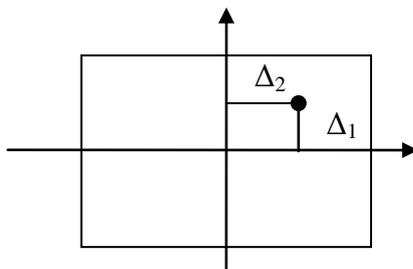


Рисунок 2

Для того, чтобы определить видимость многоугольника из точки наблюдения объекта, необходимо нормаль к плоскости многоугольника  $\bar{n}_{ju} = \{n_{xju}, n_{yju}, n_{zju}\}$  преобразовать в СК приемника. Составляющие нормали к  $j$ -ой плоскости определяются по известным формулам из аналитической геометрии:

$$n_{xj} = -\frac{N_{xj} \cdot \text{sign}(D_j)}{N_j}; \quad n_{yj} = -\frac{N_{yj} \cdot \text{sign}(D_j)}{N_j}; \quad n_{zj} = -\frac{N_{zj} \cdot \text{sign}(D_j)}{N_j};$$

где

$$N_{xj} = (S_{yl} - S_{yk}) * (S_{zm} - S_{zk}) - (S_{ym} - S_{yk}) * (S_{zl} - S_{zk}),$$

$$N_{yj} = (S_{xm} - S_{xk}) * (S_{zl} - S_{zk}) - (S_{xl} - S_{xk}) * (S_{zm} - S_{zk}),$$

$$N_{zj} = (S_{xl} - S_{xk}) * (S_{ym} - S_{yk}) - (S_{xm} - S_{xk}) * (S_{yl} - S_{yk}),$$

$$N_j = \sqrt{N_{xj}^2 + N_{yj}^2 + N_{zj}^2}$$

$$D_j = -(S_{xk} \cdot N_{xj} + S_{yk} \cdot N_{yj} + S_{zk} \cdot N_{zj})$$

$\text{sign}(\cdot)$  – функция определения знака переменной.

Проведя преобразования, аналогичные преобразованиям для точек многоугольников  $\bar{n}_{ig} = A_{ug} \cdot \bar{n}_{iu}; \bar{n}_{i1} = A_{g1} \cdot \bar{n}_{ig}; \bar{n}_{ik} = A_{1k} \cdot \bar{n}_{i1}$ ; определяем видимость заданной плоскости. Плоскость считается видимой, если первая составляющая вектора нормали плоскости меньше нуля:  $n_{xjk} < 0$ .

## 1.2. Математическая модель тепловизионного приемника

Суммарная энергетическая яркость (лучистость) объекта, наблюдаемого с помощью тепловизора, зависит от его температуры  $T_{об}$  и падающего на него излучения  $E_u$ . Ее можно определить по следующей формуле [1.8, 1.9]:

$$B_{об} = (E_u \cdot r_{об} + \sigma \cdot \varepsilon_{об} \cdot T_{об}^4 \cdot z_{об}) / \pi,$$

где  $r_{об}$  - коэффициент отражения;  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_{об}$  - коэффициент излучения;  $T_{об}$  - температура объекта, К;  $z_{об}$  – относительная плотность излучения в заданном спектральном интервале.

Облученность входного зрачка тепловизионной системы

$$E = B \cdot \tau_{атм} \cdot \tau_{онм} \cdot f_{об} S_{вх} / f_{об}^2,$$

где  $\tau_{атм}$  – спектральный коэффициент пропускания атмосферы;  $\tau_{онм}$  – коэффициент пропускания оптической системы;  $S_{вх}$  – площадь входного зрачка;  $f_{об}$  – чувствительность приемника излучения,  $f_{об}$  – фокусное расстояние объектива.

Расчет пропускания излучения на наклонной трассе, вследствие непрерывного изменения давления воздуха и температуры, заключается в разделении трассы на ряд участков с

шагом  $\Delta h$  (250м) и в применении к этим участкам табличных данных с введением поправки на высоту.

Спектральный коэффициент пропускания атмосферы определяется [7,8]:

$$\tau_{атм\lambda} = \tau_{H_2O\lambda} \cdot \tau_{CO_2\lambda} \cdot \tau_{p\lambda} \cdot \tau_{\delta},$$

где  $\tau_{H_2O\lambda}$  – спектральный коэффициент пропускания излучения парами воды;  $\tau_{CO_2\lambda}$  – спектральный коэффициент пропускания излучения углекислым газом;  $\tau_{p\lambda}$  – спектральный коэффициент пропускания атмосферой излучения с учетом молекулярного и аэрозольного рассеяния;  $\tau_{\delta}$  – коэффициент пропускания излучения при наличии дождя.

Спектральный коэффициент пропускания излучения парами воды для горизонтальной трассы определяется

$$\tau_{H_2O\lambda}(h) = (1 - k_{en}(h)) + k_{en}(h) \cdot \tau_{H_2O\lambda}(w_h),$$

где  $k_{en}(h) = e^{ah}$  – поправочный коэффициент на высоту,  $a = -6,867326 \cdot 10^{-5}$ ;  $\tau_{H_2O\lambda}(w_h)$  – табличное значение спектрального коэффициента пропускания в зависимости от толщины слоя осажденной воды  $w_h$  на высоте  $h$ , которая определяется:

$$w_h = w_{0h} \cdot D_{mp}(h),$$

$w_{0h}$  – количество осажденной воды на длине 1км;  $D_{mp}(h)$  – протяженность трассы в км.

В свою очередь  $w_{0h}$  определяется:

$$w_{0h} = 2,167 \cdot 10^4 \cdot f_h \cdot e(T_h) / T_h,$$

$f_h = f_0 \cdot e^{c \cdot h}$  – относительная влажность воздуха на высоте  $h$ ,  $f_0$  – влажность воздуха у поверхности земли,  $c = -4,6480787 \cdot 10^{-4}$ ;  $e(T_h)$  – упругость насыщающих паров в зависимости от температуры воздуха;  $T_h = T_0 + a_T \cdot h$  – температура воздуха на высоте  $h$ ,  $T_0$  – температура воздуха у поверхности земли,  $a_T$  – температурный градиент.

Полный спектральный коэффициент пропускания излучения парами воды определяется:

$$\tau_{H_2O\lambda} = \int_0^{y_h} \tau_{H_2O\lambda}(h) dh.$$

Спектральный коэффициент пропускания излучения углекислым газом для горизонтальной трассы определяется на основе таблицы в зависимости от эквивалентной протяженности трассы на уровне моря  $L_{э\kappa\beta}$ :

$$\tau_{CO_2\lambda}(h) = \tau_{CO_2\lambda}(L_{э\kappa\beta})$$

$L_{э\kappa\beta} = k_{yh} \cdot D_{mp}(h)$ ,  $k_{yh} = e^{b \cdot h}$  – поправочный коэффициент,  $b = -2,062196 \cdot 10^{-4}$ .

Полный спектральный коэффициент пропускания излучения углекислым газом определяется:

$$\tau_{CO_2, \lambda} = \int_0^{y_p} \tau_{CO_2, \lambda}(h) dh.$$

Спектральный коэффициент пропускания излучения с учетом молекулярного и аэрозольного рассеяния определяется в зависимости от метеорологической дальности видимости  $S_{мдв}$  по следующей аппроксимационной зависимости:

$$\tau_{Др} = \exp \left\{ - \frac{3,92 D_{об}}{S_{мдв}} \left( \frac{0,6}{\lambda} \right)^{1,3} \right\}.$$

Коэффициент пропускания излучения при наличии дождя определяется:

$$\tau_{\delta} = \exp \{ - g_{\delta} D_{об} \},$$

где  $g_{\delta}$  – коэффициент рассеяния при наличии дождя.

Для нахождения интегрального коэффициента пропускания атмосферы в заданном диапазоне длин волн  $\lambda_{\min} \dots \lambda_{\max}$  проводится интегрирование по всему диапазону

$$\tau_{атм} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \tau_{Датм} d\lambda / (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}).$$

Сигнал с выхода тепловизионного приемника определяется:

$$u(i,j) = k_u \cdot d^2 \cdot E,$$

где  $k_u$  – коэффициент усиления;  $d$  – размер элемента матрицы приемника.

Данная математическая модель позволяет получить синтезированное тепловизионное изображение фоно-целевой обстановки при различном взаимном положении приемника излучения (тепловизора) и объекта наблюдения, проводить исследования разрабатываемых алгоритмов распознавания, а также проводить работы по набору библиотек признаков объектов (целей). На рисунке 3 приведены изображения корабля, полученные при разных значениях высоты полета ракеты  $H_p$ , дальности  $D_{ц}$  и курсового угла цели  $q_{ц}$ .

## 2. Решение задачи обработки тепловизионного изображений

Обработка полученного с помощью систем технического зрения или синтезированного изображения заключается в его предварительной обработке (сглаживание – НЧ-фильтрация, подчеркивание границ – ВЧ-фильтрация [2,7,10, 11,-14], сегментация изображения [2.2], выделение контуров объектов [1.11] и распознавание.

Предварительная обработка изображения сводится к выполнению комплекса операций с целью улучшения визуального восприятия изображения или преобразования его в форму удобную для машинного анализа [7, 10,11].

В процессе обработки изображения возникает задача подавления аддитивного и импульсного шума. Методы сглаживания изображений могут устранять шум очень эффективно. Существенным недостатком алгоритмов сглаживания является смаз изображения (т.е. снижение четкости контурных элементов), при этом величина смаза пропорциональна размеру маски, используемой для сглаживания (рисунок 4). Для однозначного анализа изображений, особенно при вычислении геометрических характеристик структурных элементов, очень важно убрать смаз с контуров объектов в изображении, то есть усилить разницу между градациями яркости контурных элементов объекта и соседних элементов фона. В этом случае при обработке изображений используются методы подчеркивания контуров.

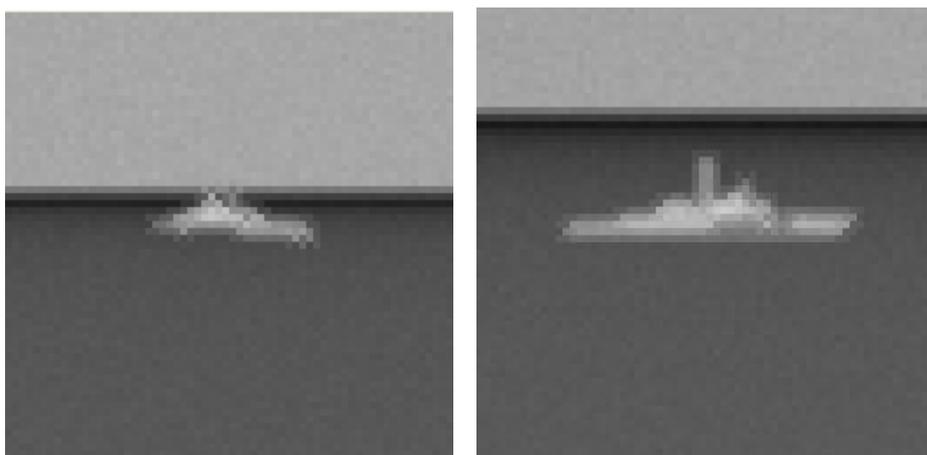
После выполнения предварительной обработки изображения, необходимым предварительным этапом распознавания объектов на изображении является его сегментация.

Под сегментацией изображения понимается процесс его разбиения на составные части, имеющие содержательный смысл: объекты, их границы или другие информативные фрагменты, характерные геометрические особенности и др.

Нередко приходится сталкиваться с задачей нахождения периметров, кривизны, факторов формы, удельной поверхности объектов и т.д. Все перечисленные задачи так или иначе связаны с анализом контурных элементов объектов.

Выделенный таким образом контур представляет собой замкнутый цепной код, т.е. последовательность координат граничных точек объекта, что очень удобно для решения поставленных задач (рисунок 5).

Следующим наиболее важным шагом является этап непосредственно распознавания. В литературе, посвященной распознаванию образов [1, 5, 6, 8,9-11], традиционным является суждение о том, что проблема распознавания состоит в нахождении в признаковом пространстве таких решающих границ (решающих правил), т.е. границ между классами, придерживаясь которых можно обеспечить наибольшую точность распознавания. Такая трактовка проблемы распознавания предусматривает, что, во-первых, известен словарь признаков, а во-вторых – алфавит классов. В то же время в общем случае построения систем распознавания ни словарь признаков, ни словарь классов априорно не известны. Проблема распознавания в том и состоит, чтобы их определить.



$D_{ц}=4000\text{м}, H_p=40\text{м}, q_{ц}=45^\circ$

$D_{ц}=3000\text{м}, H_p=80\text{м}, q_{ц}=270^\circ$

Рисунок 3

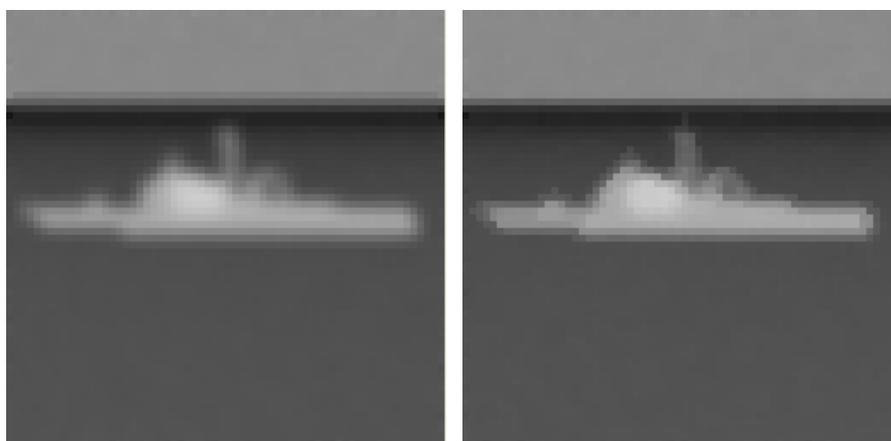


Рисунок 4 – Фильтрация изображения.



Рисунок 5 – Сегментация и выделение контуров объектов.

Все признаки, используемые для классификации объектов, можно условно разделить на следующие виды: детерминированные; вероятностные; логические; структурные.

Детерминированные признаки - признаки, принимающие конкретные числовые значения. Эти признаки можно разделить на группы [10,11]: контурные признаки, геометрические признаки, моментные признаки.

Вероятностные признаки - это признаки, значения которых распределены по определенному закону [10,11]: - признаки, определяемые по яркостным гистограммам,- яркостные признаки,

Логические признаки - признаки, которые можно рассматривать как элементарные высказывания, принимающие два значения истинности ("да", "нет") с полной определенностью. Например: наличие сигнала от цели в радиолокационном канале; наличие контраста цели относительно фона; вибрация цели [1].

Структурные признаки представляют собой элементы структуры объекта или группы объектов [10,11]. Признаки одиночного объекта: наличие в конструкции цели определенных элементов; характер расположения элементов на объекте.

После определения признакового пространства и алфавита классов основной задачей является установление решающего правила, позволяющего с заданной точностью осуществить классификацию элементов изображения или объектов в целом.

### **3. Алгоритм обработки и распознавания изображения**

Большинство изображений в процессе их формирования подвергаются влиянию ряда негативных факторов (вибрация фотокамеры, неравномерность движения сканирующего элемента и т.д.), приводящих к смазу изображения, появлению малоконтрастных и зашумленных участков и т.д. [4,5,7].

Прежде чем подвергнуться анализу, изображение должно пройти этап препарирования, который состоит в выполнении операций улучшения визуального качества (повышение контраста, устранение размытости, подчеркивание границ, фильтрация) и операций формирования графического препарата (сегментация, выделение контуров) изображения.

#### **3.1. Алгоритм предварительной обработки изображения**

Начальным этапом предварительной обработки является удаление шума и контрастирование изображения.

После реставрации изображения, осуществляется пороговая обработка и предварительная отбраковка выделенных фрагментов изображения.

Значение порога вычисляется по локальным признакам изображения [16]. Процедура определения порога является двухэтапной. Вначале по всем значениям изображения вычисляется  $S_e$ - удвоенное произведение контраста  $E$  и числа  $n_e$  граничных точек фон-цель, которое представляет собой сумму абсолютных значений  $e(x,y)$  - максимальное из значений про-

изводной яркости изображения в горизонтальном и вертикальном направлениях в точке  $(x,y)$ :

$$S_e = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |e(x, y)| = 2En_e, \quad (4)$$

вычисляется оценка среднеквадратичного отклонения шума:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sqrt{2\pi} S_e}{4 n}, \quad (5)$$

выбирается предварительный порог:  $e_t = 3,974\sigma$ .

На втором этапе вновь просматривается изображение  $f(x,y)$  и в статистики  $S'_e$  и  $S'_{fe}$  включаются только точки со значениями производной, превышающей  $e_t$ . Здесь  $S'_{fe}$  - сумма произведений уровней яркости на максимальную из производных в точке:

$$S'_{fe} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |f(x, y)e(x, y)|. \quad (6)$$

Отношение полученных величин дает несмещенное значение глобального порога:

$$t^* = \frac{S'_{fe}}{S'_e}. \quad (7)$$

По результатам работы данного алгоритма видно (рисунок 6 б), что возможны ситуации, когда полностью отделить цель от фона не представляется возможным. Дальнейшая обработка предполагает разделение объектов прошедших пороговую обработку с целью определения координат граничных точек контура и вычисления геометрических признаков каждого объекта. Для этого воспользуемся алгоритмом оконтуривания методом «жука».

### **Алгоритм прослеживания границ методом “жука”**

Работа алгоритма заключается в следующем: начиная с верхнего левого угла изображения, выполняется последовательная проверка значений каждого пикселя в строке с целью поиска ненулевого элемента. После того как “жук” пересечет ненулевой элемент (черный), он поворачивает влево и переходит к следующему элементу. Если этот элемент черный, “жук” снова поворачивает налево, если же этот элемент оказывается белым, то “жук” поворачивает направо. Эта процедура продолжается до тех пор, пока “жук” не вернется в исходную точку. Декартовы координаты точек перехода с белого на черный запоминаются и определяют границу выделенного объекта.

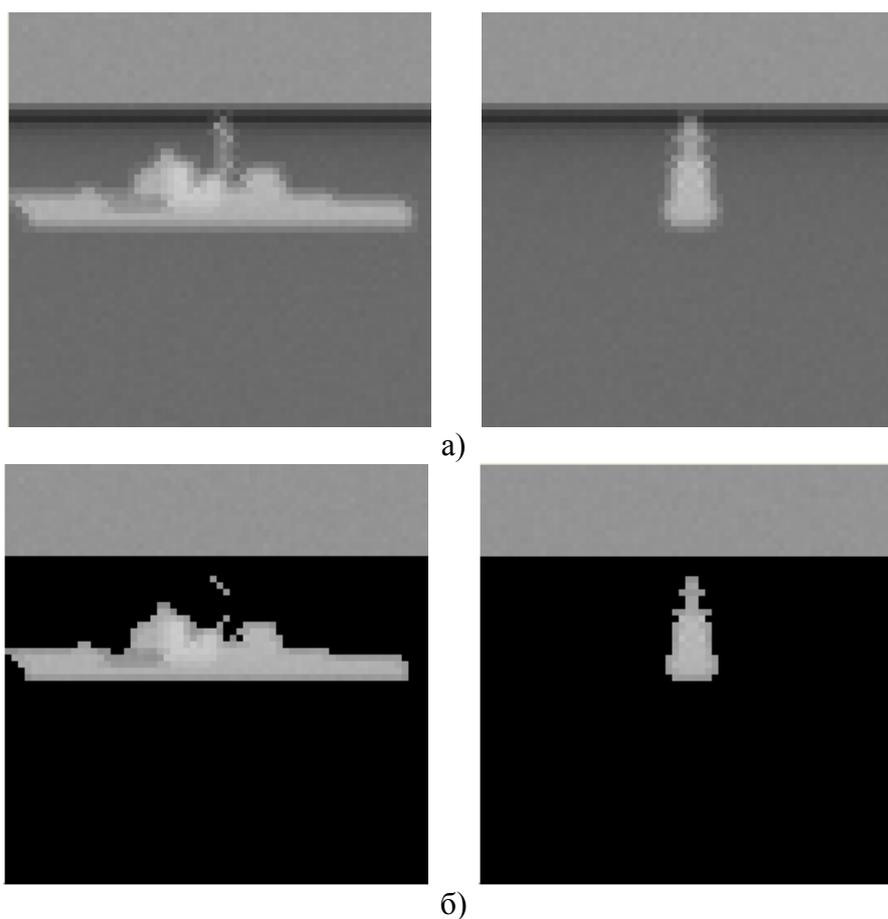
В результате работы алгоритма получаем несколько отдельных блоков  $B_i$  с известными координатами граничных точек (рисунок 6). На рисунке представлены: а – исходное изо-

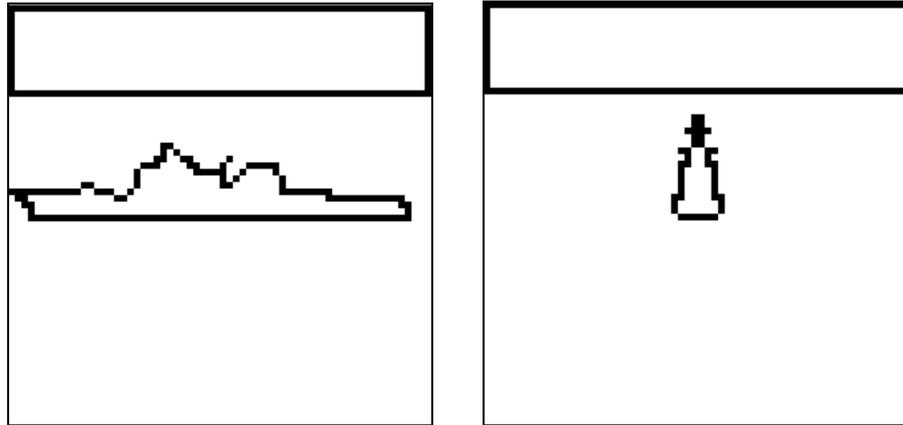
бражение, б – результаты пороговой обработки, в – результаты работы алгоритма прослеживания границ методом «жука».

### Исследование признаков цели

Одной из задач синтеза распознающих систем является выбор из заданного множества признаков оптимального набора ограниченного числа признаков, обеспечивающего требуемый по условиям решаемой задачи уровень достоверности распознавания и минимизирующего затраты на проведение измерений и вычислений. Поэтому целесообразно рассмотреть признаки с учетом следующих ограничений:

- используются только те признаки, относительно которых может быть получена априорная информация;
- нецелесообразно выбирать признаки, которые дают низкую точность классификации объектов;
- некоторые признаки не могут быть определены ввиду отсутствия измерителей на борту.





в)

Рисунок 6 – Алгоритм сегментации изображения.

После проведения предварительной обработки изображения можно вычислить геометрические признаки выделенных объектов.

А именно:

1. Площадь цели:  $S_u$ .
2. Компактность цели:  $X_1 = S_u / (h_u l_u)$ .
3. Анизотропия:  $X_2 = h_u / l_u$ .
4. Удлинение контура:  $X_3 = P_u / l_u$ .
5. Коэффициент формы:  $X_4 = 4\pi S_u / P_u^2$ .

6. Нормированные моменты инерции изображений относительно осей  $Y_k$  и  $Z_k$ , соответственно  $X_5 = M_{20} / S_u$ ,  $X_6 = M_{02} / S_u$  где  $M_{02}, M_{20}$  – моменты инерции изображений.

С помощью математической модели изображения получены и на рисунке 7 представлены значения некоторых признаков, вычисленных с помощью разработанной модели изображения. Как видно из рисунков все геометрические признаки, очень сильно зависят от курсового угла цели.

Учитывая данный факт, можно сделать вывод о необходимости информации о курсовом угле цели, которая обеспечила бы более точное определение признака цели.

После построения признакового пространства в процессе обучения системы и имея на борту информацию от АРГС о дальности до цели, с помощью метода линейной интерполя-

ции можно определить математическое ожидание (МО) курсового угла цели и его средне-квадратическое отклонение (СКО).

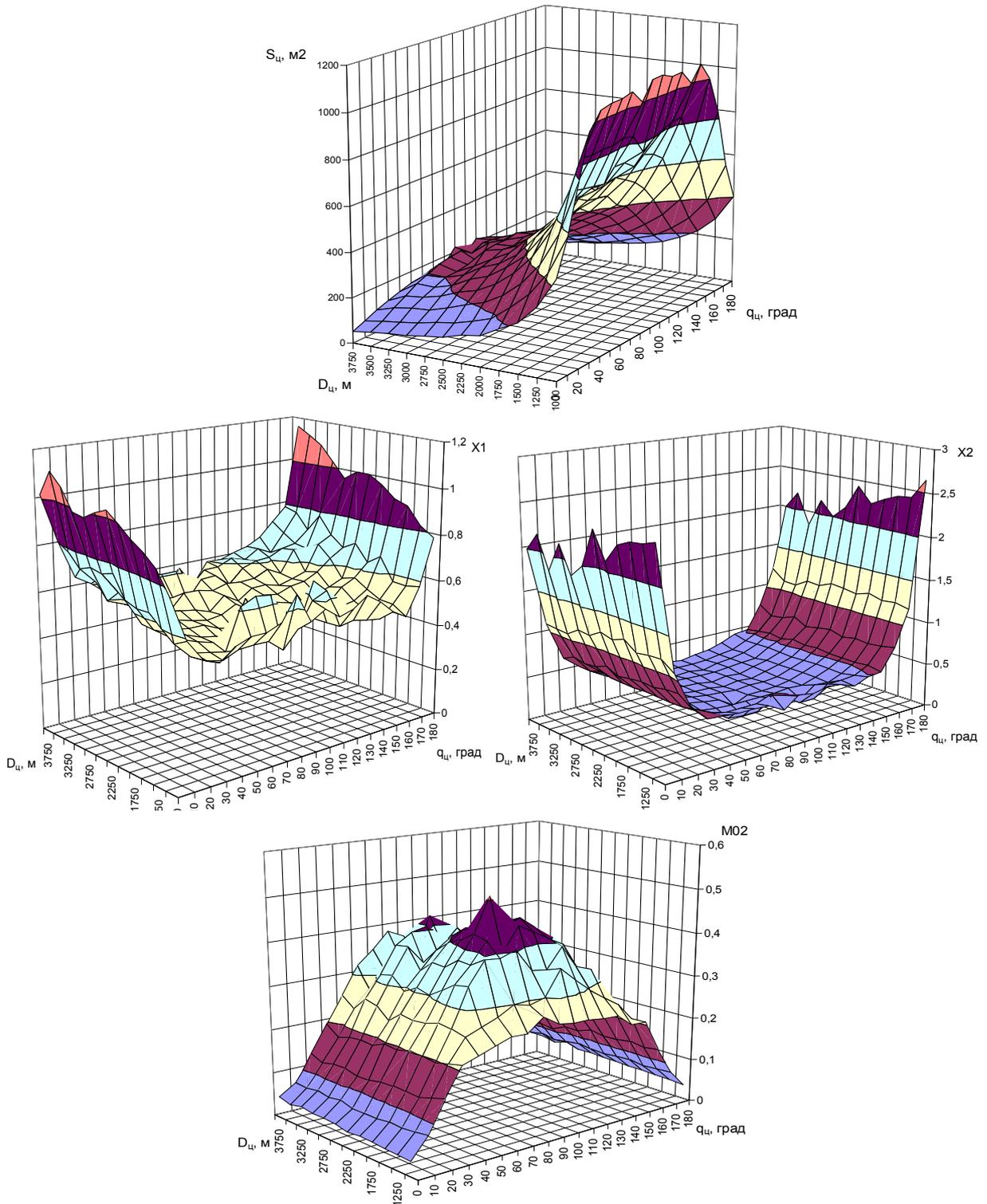


Рисунок 7 – Зависимость признаков: «площадь цели» (а), «компактность цели» (б), «анизотропия» (г) и «момент инерции» (д) от дальности и курсового угла цели

На рисунке 8 представлены зависимости ошибки определения курсового угла с помощью нормированных моментов инерции изображений M20 (а), M02 (б) и усреднением по двум признакам (в).

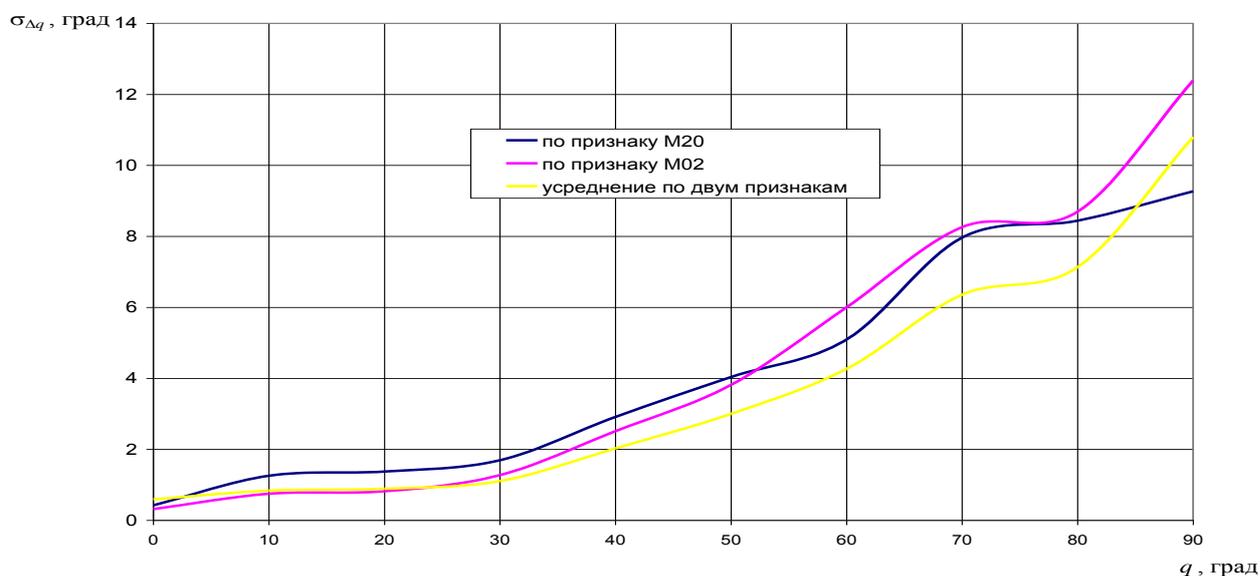


Рисунок 8 – Зависимость ошибки определения курсового угла от курсового угла с помощью нормированных моментов инерции изображений M20 (а), M02 (б) и усреднением по двум признакам (в)

### 3.2. Алгоритм распознавания изображения

В результате работы алгоритма предварительной обработки изображения, на анализируемом участке изображения получаем несколько выделенных объектов с известными координатами их граничных точек.

Целью алгоритма распознавания является определение наличия цели среди выделенных объектов и вычисление ее угловых координат.

Анализ методов классификации изображений привел к целесообразности построения алгоритма распознавания на основе методов теории динамических систем со случайной структурой [1.3].

Для синтеза алгоритмов распознавания рассмотрим следующие возможные состояния анализируемого участка изображения:

1. Рассматриваемый объект не является целью -  $s=1$ .
2. Рассматриваемый объект является целью -  $s=2$ .

Алгоритм классификатора в общем виде имеет следующий вид:

$$\Delta h_{k+1} = 0,5 \left\{ \frac{[Z_{k+1} - \tilde{X}(2)]^2}{|K(2)|} - \frac{[Z_{k+1} - \tilde{X}(1)]^2}{|K(1)|} \right\},$$

$$P_{k+1}^{s1}(i, j) = \left[ 1 + \frac{P_k^{s2}(i, j) \sqrt{|K(2)|}}{P_k^{s1}(i, j) \sqrt{|K(1)|}} \exp(-\Delta h_{k+1}) \right]^{-1},$$

$$P_{k+1}^{s2}(i, j) = 1 - P_{k+1}^{s1}(i, j),$$

$$Z_k = \{z_k^1, z_k^2, \dots, z_k^n\},$$

$$\tilde{X}(m)_k = \{\tilde{x}_k^1(m), \tilde{x}_k^2(m), \dots, \tilde{x}_k^n(m)\},$$

$$K(m) = \begin{pmatrix} c_{11}(m)c_{12}(m) \cdots c_{1n}(m) \\ c_{21}(m)c_{22}(m) \cdots c_{2n}(m) \\ \vdots \\ c_{n1}(m)c_{n2}(m) \cdots c_{nn}(m) \end{pmatrix}, m=1,2.$$

Здесь  $\tilde{X}(1), \tilde{X}(2)$  - вектор математических ожиданий признаков для состояния 1 и 2, соответственно;  $K(1), K(2)$  - ковариационная матрица признаков для состояния 1 и 2 соответственно;  $c_{ii}(1), c_{ii}(2)$  - дисперсия  $i$ -го признака для состояния 1 и 2 соответственно;  $c_{ij}(1), c_{ij}(2)$  - ковариация  $i$ -й и  $j$ -й компоненты для состояния 1 и 2 соответственно;  $P^{s1}(i, j), P^{s2}(i, j)$  - вероятность того, что анализируемый объект помеха или цель, соответственно,  $Z$  - вектор измеренных значений признаков.

Выбор цели производится по максимуму вероятности и в соответствии с условием:

$$s_{k+1} = \begin{cases} 1, & \text{при } P_{k+1}^{s2} < P_n \cup k < k_{mp} \\ 2, & \text{при } P_{k+1}^{s2} \geq P_n \cap k \geq k_{mp} \end{cases},$$

где  $k_{mp}$  - требуемое число измерений, соответствующее установившемуся режиму функционирования классификатора.

При наличии нескольких объектов определенных как цель, выбирается ближайший к центру кадра.

#### Определение угловых координат цели

Для определения угловых координат вычисляем геометрический центр тяжести выбранного объекта и угловые рассогласования:

$$\hat{i}_y = \frac{\sum i_B}{S_y}, \quad \hat{j}_y = \frac{\sum j_B}{S_y},$$

где  $i_B, j_B$  – значения пикселей занимаемых объектом-целью,  $S_u$  – площадь объекта-цели:

$$S_u = \sum_i \sum_j i_B j_B.$$

$$\Delta_1 = \arctg\left(\frac{\hat{i}_u - N/2}{f}\right), \quad \Delta_2 = \arctg\left(\frac{\hat{j}_u - M/2}{f}\right),$$

где  $\Delta_1, \Delta_2$  – угловые рассогласования в вертикальной и горизонтальной плоскости соответственно,

$N, M$  – размер матрицы приемника излучения,

$f$  – фокусное расстояние.

Результаты работы алгоритма представлены на рисунке 9. Исходное изображение сглажено медианным фильтром (размер маски  $3 \times 3$  элемента); подчеркивание границ выполнено ВЧ фильтром; пороговая обработка (4-7).

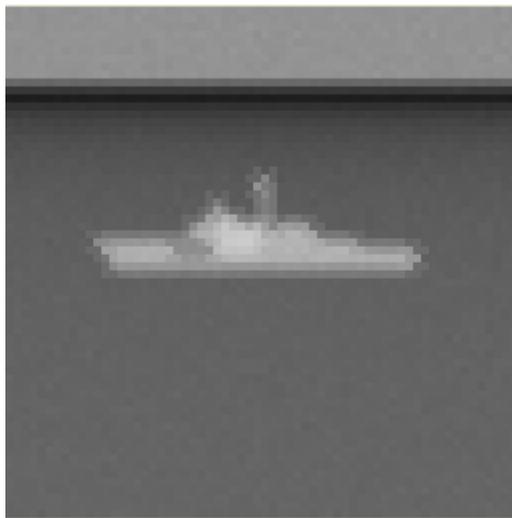
Вычисление курсового угла цели выполняется по признакам M20 и M02 методом линейной интерполяции и усреднением результата. По оценке курсового угла цели определяются МО и СКО признака.

В алгоритме распознавания цель представляется в виде двумерного вектора. В качестве признаков рассмотрены площадь цели и удлинение контура.

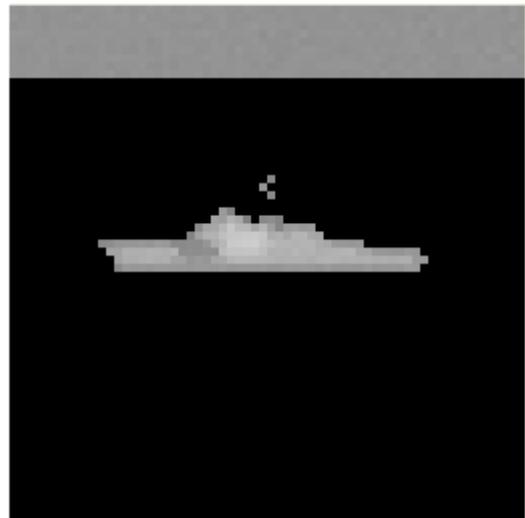
Классификатор в этом случае примет вид:

$$\Delta h_{k+1} = 0,5 \left\{ \frac{[z_{k+1}^1 - \tilde{x}^1(2)]^2 [z_{k+1}^2 - \tilde{x}^2(2)]^2}{\sigma_1^2(2) \sigma_2^2(2)} - \frac{[z_{k+1}^1 - \tilde{x}^1(1)]^2 [z_{k+1}^2 - \tilde{x}^2(1)]^2}{\sigma_1^2(1) \sigma_2^2(1)} \right\},$$

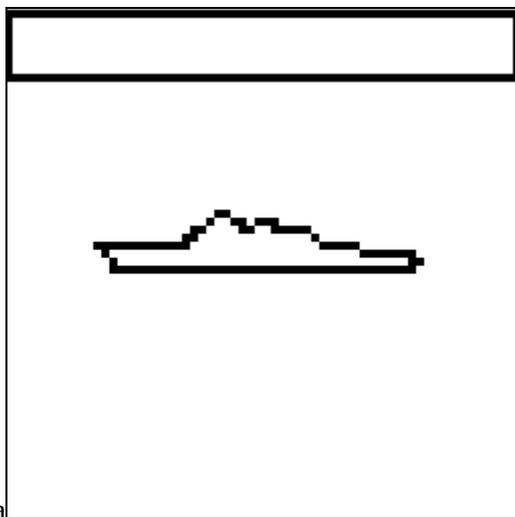
$$P_{k+1}^{s1}(i, j) = \left[ 1 + \frac{P_k^{s2}(i, j) \sigma_1(2) \sigma_2(2)}{P_k^{s1}(i, j) \sigma_1(1) \sigma_2(1)} \exp(-\Delta h_{k+1}) \right]^{-1}.$$



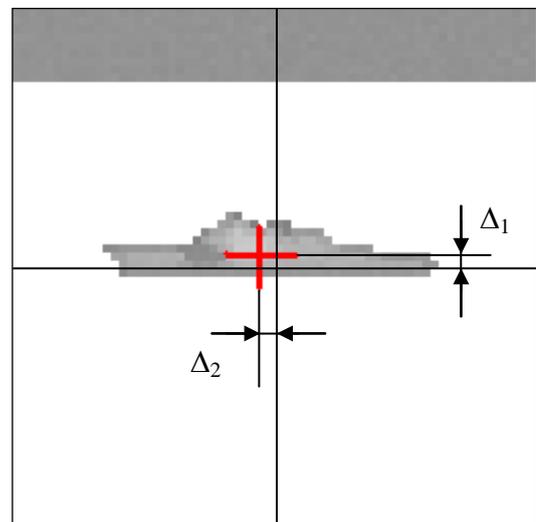
Предварительная обработка



Пороговая обработка



Сегментация



Распознавание

ка

Рисунок 9

Априорная вероятность принадлежности объекта к цели:

$$P_0^{S2} = \int_{-\infty}^{P_1} \int_{-\infty}^{P_2} f(Z) dz^1 dz^2,$$

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^2 \sigma_1(2)\sigma_2(2)}} \exp\left(-\frac{(z^1 - \tilde{x}^1)^2}{2\sigma_1^2(2)}\right) \exp\left(-\frac{(z^2 - \tilde{x}^2)^2}{2\sigma_2^2(2)}\right),$$

$$P_1 = \tilde{x}_1(2) - |\tilde{x}_1(2) - z^1(2)|, P_2 = \tilde{x}_2(2) - |\tilde{x}_2(2) - z^2(2)|.$$

$f(Z)$  - функция нормального распределения поверхности признакового пространства цели.

## **Выводы**

Описанные в настоящей статье процедуры моделирования и разработанные алгоритмы распознавания целей на тепловизионном фоне изображений ОЭС ЛА дают возможность сделать следующие выводы:

- 1) математическая модель тепловизионного изображения обеспечивает получение изображения фоно-целевой обстановки для его дальнейшего анализа, обработки и исследования на основе разработанных алгоритмов распознавания целей;
- 2) алгоритмы обработки, анализа и распознавания изображения позволяют:
  - а) выполнить предварительную обработку тепловизионного изображения фоно-целевой обстановки (сглаживание изображения и подчеркивание границ),
  - б) получить сегментированное изображение в виде отдельных объектов с известными координатами граничных точек контура,
  - в) вычислить геометрические признаки выделенных объектов,
  - г) выполнить оценку курсового угла цели для каждого выделенного объекта,
  - д) определить математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение признаков используемых для классификации каждого объекта,
  - е) осуществить классификацию выделенных объектов и определить цель,
  - ж) вычислить угловые координаты объекта-цели.

## **Библиографический список**

1. Барабаш Ю.Л. Вопросы статической теории распознавания. М.: Сов. радио, 1967.
2. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры. Под ред. Т.С.Хуанга. М.: Радио и связь, 1984.
3. Бухалев В.А. Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Наука, Физматлит, 1996. -288 с.
4. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипкин В.А. Современное состояние проблемы распознавания. М.: Радио и связь, 1985.
5. Дж. Ллойд. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.
6. Дж. Ту, Р. Гонсалес. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978.
7. Катус Г.П. Обработка визуальной информации. М.: Машиностроение, 1990.
8. Лазарев Л.П. Оптико-электронные приборы наведения. М.: Машиностроение, 1989.
9. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983 .
10. Пересада В.П. Автоматическое распознавание образов. Л.: Энергия, 1970.

11. Претт У. Цифровая обработка изображений. М.:Мир,1982.
12. Яшин В.В., Калинин Г.А. Обработка изображений на языке Си для IBM PC. М.: Мир, 1994.
13. Arse G.R., Foster R.E. Detail – preserving ranked-order based filters for image processing. IEEE, Transaction on acoustic, speech and signal processing, vol.37,1989/
14. The Infrared and Electro-Optical System Handbook (Ed. by J.S.Accetta, D.L.Shumaker-Bellingham, 1993.
15. Андрюшин С. Я.; Кравченко Н. В. Состояние разработок микроболометрических матриц в Государственном научном центре РФ «НПО “Орион”» // Прикладная физика. – 2000. – №5. – С. 5-17.
16. Бакут П.А., Колмогоров Г.С., Ворновицкий И.Е. Сегментация изображений: методы пороговой обработки. “Зарубежная радиоэлектроника”, 1987, №10.
17. Дмитриев, Е. Фотоприемники для работы в мультиспектральных оптоэлектронных системах. Проблемы создания // «Электроника»: Наука, технология, бизнес. – 2005. – №8.