

На правах рукописи



ДЖАФАР Ассеф

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ОБЪЕКТОВ, НАБЛЮДАЕМЫХ ЧЕРЕЗ СЛОЙ
ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2004

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Кандидат технических наук
Бурый Е.В.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Карасик В.Е.
Кандидат технических наук
Степовой А.В.

Ведущая организация: **Московский научно-исследовательский
телевизионный институт (МНИИТИ),
г. Москва**

Защита диссертации состоится «29» сентября 2004 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.11 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «30» июня 2004 г.

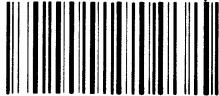
Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.11

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Власов И.Б.

Уч.



1698525

Джафар Р. Разработка систе

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одна из важных областей применения автоматических систем распознавания образов, интенсивно развивающихся в настоящее время, – распознавание изображений летательных аппаратов (ЛА), получаемых в видимом диапазоне длин волн при освещении ЛА естественными источниками света. Основное назначение таких оптико-электронных систем – обнаружение и распознавание класса ЛА в целях повышения надежности работы системы управления воздушным движением и исключения поражения гражданских объектов средствами противовоздушной обороны. В силу этого, оптико-электронная система должна обеспечивать решение поставленной задачи, когда ЛА находится на значительном удалении от нее и регистрируемое изображение ЛА искажается слоем приземной атмосферы. Для обеспечения эффективного распознавания ЛА по их изображениям необходимо обеспечить инвариантность распознавания как к изменению ориентации и местоположения ЛА относительно изображающей системы, так и к изменению условий его освещения, а также обеспечить устойчивость распознавания к возможным искажениям изображения атмосферой. Следует отметить, что успехи, достигнутые в объединении геометрического и яркостного инвариантов изображения, во многом ограничиваются условиями наблюдения ЛА.

Обеспечению инвариантности работы системы распознавания к изменениям ориентации и положения объекта относительно изображающей системы посвящен ряд работ, авторы которых – Аракчеев П.В., Каляев И.А., Кухарев Г.А., Оссовский С., Arbter K., Ben-Arie J., Flusser J., Mamistvalov A.G., Suk T., Tieng Q. и другие – достаточно много внимания уделили проблеме формирования инвариантных векторов признаков. Анализ этих работ показывает, что ряд вопросов, связанных с оценками устойчивости распознавания к воздействию шумов и способности системы распознавания к различимости разных объектов требует дополнительного рассмотрения. Кроме того, до настоящего времени не исследована устойчивость распознавания к искажению изображений объектов турбулентной атмосферой.

Поэтому задача определения принципов построения и выбора параметров оптико-электронной системы, обеспечивающей распознавание ЛА по их изображениям, искаженным атмосферой, является актуальной.

Цель и задачи исследования

Цель проведенного исследования – разработка оптико-электронной системы, обеспечивающей автоматическое распознавание наблюдаемых объектов по их изображениям, получаемым в видимом диапазоне длин волн в условиях освещения объектов естественными источниками света и наличии ис-

кажающей атмосферы. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Проведение анализа существующих методов обеспечения инвариантности распознавания изображений к изменению ориентации и положения объекта в поле зрения изображающей системы, а также методов выбора информативных признаков, редукции пространства признаков, выбора типа и структуры классификатора.

2. Создание математической модели формирования изображения объекта, наблюдаемого через слой приземной атмосферы, и разработка программного обеспечения для ЭВМ, обеспечивающего моделирование изображений;

3. Формирование множества векторов признаков, получаемых из изображений объектов, инвариантных как к изменению масштаба изображений, так и к изменению ориентации объектов относительно оптико-электронной системы;

4. Разработка системы распознавания объектов и оценка ее эффективности;

5. Оценка устойчивости распознавания объектов к наличию искажений их изображений турбулентной атмосферой;

6. Проведение экспериментальных исследований для подтверждения работоспособности разработанной системы распознавания.

Научная новизна работы:

Разработан метод формирования вектора признаков изображения плоского объекта, инвариантность которого к изменениям масштаба изображения и ориентации объекта относительно оптико-электронной системы доказана аналитически;

Предложен метод формирования вектора признаков изображения объекта, устойчивого к вносимым турбулентной атмосферой искажениям изображения;

Показано, что двухпараметрическая функциональная зависимость вектора внешней силы, используемой при модификации элементов активного контура изображения объекта, позволяет существенно ускорить процесс построения искомого контура изображения.

Практическая ценность:

1. Создан программный комплекс для моделирования искаженных турбулентной аэрозольной атмосферой изображений объектов при наличии аддитивного шума регистрирующего фотоприемника.

2. Предложенные методы и созданные на их основе алгоритмы и программы позволяют формировать множество векторов признаков изображений объектов, выбирать квазиоптимальную структуру системы распознавания и параметры классификатора, а также оценивать эффективность разработанной системы распознавания.

Защищаемые положения

- Предложенная модификация метода активного контура, основанная на использовании деформирующих контур векторов внешних сил, направленных к одной и той же внутренней точке контура, обеспечивает удовлетворительную аппроксимацию контура изображения ЛА при существенных искажениях изображений турбулентной атмосферой.
- Разработанный метод формирования вектора признаков контура изображения плоского объекта как Фурье-образа совокупности отсчетов аффинных площадей этого контура обеспечивает инвариантность вектора признаков к изменению ориентации и положения объекта относительно оптико-электронной системы.
- Разработанная система распознавания объектов по их изображениям обеспечивает устойчивое распознавание при изменении условий наблюдения объектов и искажениях изображений турбулентной атмосферой.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использовались: теория переноса оптического излучения в рассеивающих и случайно-неоднородных средах; теория случайных процессов и случайных полей; теория дифракции; теория линейной пространственной фильтрации; методы линейной алгебры; методы цифровой обработки изображений и нейросетевой обработки сигналов.

Реализация результатов работы

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для построения оптико-электронных систем распознавания объектов, визуализации контуров регистрируемых изображений, а также для реконструкции изображений объектов, искаженных турбулентной атмосферой.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на 2 международных научно-технических конференциях (Россия, Москва, 2001 г., Польша, Щецин, 2001 г.) и изложены в статье, опубликованной в журнале «Нейрокомпьютеры: разработка, применение».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 130 страницах, содержит 28 иллюстраций и 4 таблицы. Библиография включает 108 наименований.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и основные задачи, приведены выносимые на защиту научные положения и дано краткое описание глав диссертации.

В первой главе изложены основные концепции распознавания образов, представлены характеристики классификаторов различных типов и описана процедура распознавания с использованием нейросетевого классификатора.

Проведен анализ основных методов обеспечения инвариантности результатов работы системы распознавания в условиях изменения положения объекта относительно оптико-электронной системы. Отмечено, что существуют два подхода к решению проблемы инвариантности распознавания: формирование множества векторов инвариантных признаков и применение специальных процедур функционирования классификатора, обеспечивающих инвариантное распознавание неинвариантных векторов признаков. Рассмотрены основные методы формирования инвариантных векторов признаков, основанные на применении интегральных преобразований, вычислении алгебраических инвариантов и формировании геометрических инвариантов контура изображения объекта. Отмечено, что широко используемые при построении систем распознавания изображений преобразования Меллина и Фурье – Меллина требуют значительных вычислительных затрат.

Показано, что вектор признаков, инвариантный к аффинному преобразованию изображения объекта, можно сформировать, используя описание контура этого изображения. При этом в качестве параметра контура необходимо использовать такой параметр, который линейно изменяется в результате аффинных преобразований изображения. Отмечено, что использование аффинных алгебраических инвариантов для формирования вектора признаков ограничено их малой устойчивостью к воздействию шумов.

Также показано, что в тех случаях, когда не удается сформировать множество инвариантных векторов признаков, оправдано применение нейросетевых классификаторов, в том числе – с разделяемыми весовыми коэффициентами, а также нейронных сетей (НС) высших порядков, каждый нейрон которых вычисляет сумму произведений входных сигналов.

Во второй главе описаны основные оптические характеристики атмосферы и методика оценки влияния состояния атмосферы на параметры регистрируемого изображения объекта.

Предложен подход к моделированию изображения объекта, наблюдаемого через слой атмосферы с выраженной турбулентностью при наличии рассеяния излучения, основанный на описании влияния атмосферы на яркий контраст наблюдаемых удаленных объектов с помощью оптической передаточной функции (ОПФ). При достаточно большом времени экспозиции результирующая ОПФ атмосферы и изображающей системы $T_{at-it}(w_x, w_y)$

выражается через произведение ОПФ атмосферы $T_a(w_x, w_y)$ и ОПФ изображающей системы $T_b(w_x, w_y)$:

$$T_{a-b}(w_x, w_y) = T_a(w_x, w_y) \cdot T_b(w_x, w_y),$$

где w_x и w_y – пространственные частоты, а ОПФ атмосферы выражается через произведение ОПФ турбулентной атмосферы $T_t(w_x, w_y)$ и ОПФ, описывающей молекулярное и аэрозольное рассеяние и поглощение излучения в атмосфере $T_s(w_x, w_y)$:

$$T_a(w_x, w_y) = T_t(w_x, w_y) \cdot T_s(w_x, w_y).$$

При этом считается, что атмосферные явления турбулентности и энергетического ослабления, которое обусловлено аэрозольным рассеянием и поглощением излучения атмосферными газами, могут рассматриваться независимо.

Моделирование изображений объекта включает расчет оптического поля $\Psi(\xi, \eta)$ в плоскости $(\xi, 0, \eta)$ входного зрачка изображающей системы и распределения освещенности в плоскости изображения, причем $\Psi(\xi, \eta)$ вычисляется по результатам моделирования флуктуаций фазы $S(\xi, \eta)$ этого поля. В приближении геометрической оптики спектральная плотность флуктуаций фазы плоской волны при распространении излучения в атмосфере имеет вид:

$$F_s(w) = 0,489 r_0^{-5/3} (w^2 + w_0^2)^{-11/6},$$

где w – пространственная частота, $w_0 = 2\pi / L_0$, L_0 – внешний масштаб турбулентности. В соответствии с теорией Колмогорова, при $w > 2\pi / l_0$, где l_0 – внутренний масштаб турбулентности, $F_s(w) \rightarrow 0$. Для учета крупномасштабных флуктуаций фазы волны поле отсчетов $S(l, m)$, полученное в результате применения процедуры формирования случайных фазовых сдвигов и последующего обратного дискретного преобразования Фурье с шагом дискретизации $\Delta s = l_0 / 2$, корректируется с учетом абберационных искажений.

В соответствии с полученной случайной реализацией $S(l, m)$ вычисляется реализация комплексных амплитуд оптического поля в плоскости апертуры, а затем – распределение освещенности в плоскости изображения. Случайная реализация функции рассеяния точки (ФРТ) турбулентной атмосферы и изображающей системы рассчитывается с помощью найденного поля отсчетов освещенности для случая кратковременной регистрации изображения, когда время экспозиции много меньше времени «замороженности» атмосферы. Длинноэкспозиционная ФРТ получается в результате усреднения во времени многих кратковременных ФРТ. Поскольку ОПФ турбулентной атмосферы и изображающей системы $T_{a-b}(w_x, w_y)$ связана с ФРТ преобразованием Фурье, искомая случайная реализация изображения объекта $I_b(x', y')$ находится как:

$$I_b(x', y') = F^{-1} \{ F \{ L(x, y) \} \cdot T_{a-b}(w_x, w_y) \},$$

где $F\{\cdot\}$ и $F^{-1}\{\cdot\}$ – процедуры прямого и обратного преобразований Фурье соответственно, $L(x, y)$ – распределение яркости объекта.

Для проверки адекватности моделирования было проведено сравнение теоретически рассчитанной модуляционной передаточной функции (МПФ) атмосферы с МПФ, полученной в результате моделирования, для случая длинноэкспозиционной регистрации изображений при нескольких значениях радиуса Фрида r_0 . Результаты моделирования представлены на рис. 1. Они демонстрируют адекватность моделирования и корректность примененных алгоритмов.

В третьей главе описан способ формирования множества векторов признаков для распознавания изображений объектов.

Отмечено, что в случае длинноэкспозиционной регистрации изображения амплитуды высокочастотных пространственных гармоник его спектра существенно ослабляются по сравнению со случаем короткоэкспозиционной регистрации изображения. Вместе с тем, контур короткоэкспозиционного изображения наблюдаемого объекта может быть хорошо определен и использован в дальнейшем для решения задачи распознавания этого объекта.

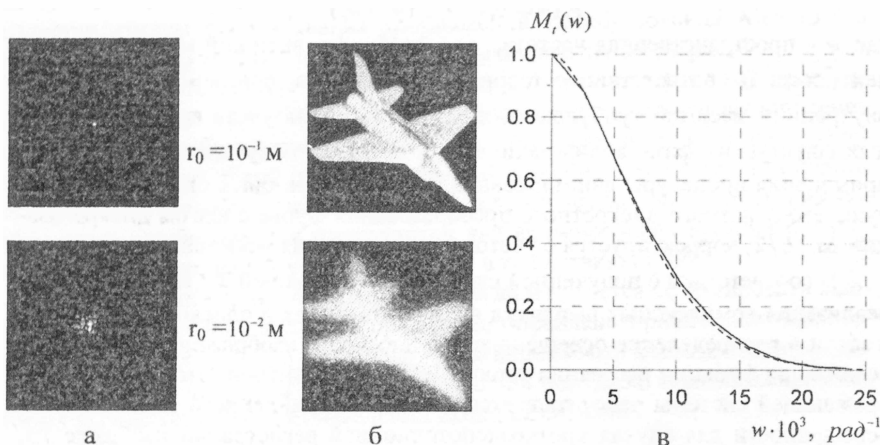


Рис. 1. Результаты моделирования реализаций изображений объекта, формируемого изображающей системой с апертурой $8,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и фокусным расстоянием 1 м, при наблюдении объекта через турбулентную атмосферу: рассчитанные для различных значений r_0 реализации ФРТ и соответствующие им реализации изображений объекта (а, б); теоретически рассчитанная МПФ турбулентной атмосферы с $r_0 = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ в случае длинноэкспозиционной регистрации изображения (сплошная линия) и МПФ (пунктир), полученная в результате компьютерного моделирования (в)

Также отмечено, что наилучшая оценка контура (в смысле ее максимального правдоподобия) представляет собой среднее по ансамблю реализаций контуров краткоэкспозиционных изображений объекта, когда каждый контур описывается в прямоугольной системе координат с центром, совпадающим с центром тяжести этого контура. Сделан вывод о целесообразности построения множества векторов признаков на основании анализа параметров найденного контура изображения объекта.

Рассмотрены различные методы аппроксимации контура изображения объекта. Показано, что использование активного контура, под которым понимают определенную в пределах поля изображения кривую с адекватно заданными функциями деформирующих ее внешних и внутренних сил, позволяет получить замкнутый внешний контур изображения объекта, хорошо его аппроксимирующий.

Метод активного контура основан на принципе минимизации функции энергии этого контура, которая определяется уравнением:

$$E = \int_0^1 [E_{\text{int}}(v(s)) + E_{\text{ext}}(v(s))] ds,$$

где $v(s) = (x(s), y(s))$ – уравнение контура, $0 \leq s < 1$ – параметр контура, E_{int} – внутренняя энергия контура, E_{ext} – внешняя энергия контура.

Отмечено, что использование ставших общепринятыми функций внешней силы контура часто не обеспечивает удовлетворительного качества аппроксимации, приводит к формированию ложных осцилляций и требует значительных вычислительных затрат.

Предложенная модифицированная функция внешней силы позволяет получить удовлетворительную аппроксимацию контура изображения и ускорить процесс его построения. Эта функция имеет вид:

$$F_{\text{ext}}(x, y) = F_c(x, y) + F_g(x, y),$$

где

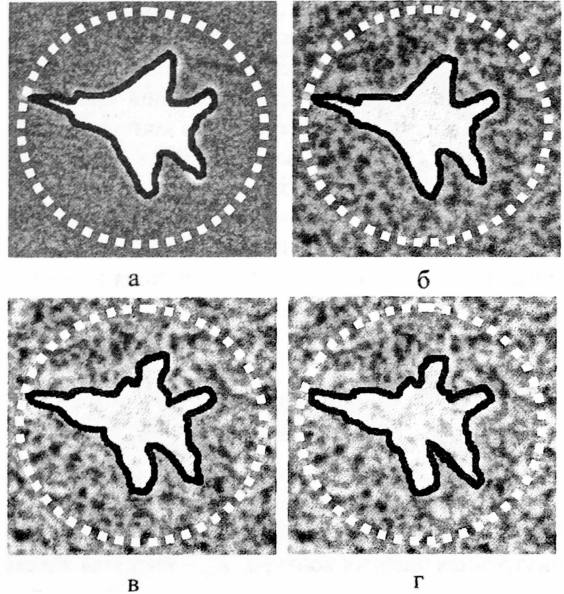
$$F_c(x, y) = a \cdot ((G_\sigma(x, y) \otimes I(x, y)) - I_0) \cdot \left(\frac{(x - x_0)}{r(x, y)} \mathbf{n}_x + \frac{(y - y_0)}{r(x, y)} \mathbf{n}_y \right),$$

$$F_g(x, y) = b \cdot \nabla(I(x, y)),$$

$$r(x, y) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

$G_\sigma(x, y)$ – двумерная гауссовская функция с дисперсией σ^2 , знаком $\otimes$ обозначена операция двумерной свертки, a и b – масштабирующие коэффициенты, I_0 – пороговое значение освещенности изображения, точка (x_0, y_0) расположена внутри изображения объекта, $\mathbf{n}_x$ и $\mathbf{n}_y$ – орты системы координат (СК). Вектор силы $F_c(x, y)$ является центральным, а вектор $F_g(x, y)$ пропорционален вектору градиента освещенности в окрестности точки (x, y) изображения. Результаты применения модифицированного метода построения контура представлены на рис. 3.

Рис. 3. Результаты применения модифицированного метода построения контура изображения реального объекта: исходное изображение объекта с максимальной интенсивностью $I_{\max}$ (а); результаты построения контура при воздействии аддитивного шума с дисперсией $\sigma_N^2 = (0,4I_{\max})^2$ (б); $\sigma_N^2 = (0,8I_{\max})^2$ (в) и $\sigma_N^2 = (0,95I_{\max})^2$ (г). Сплошной линией показан результирующий контур изображения объекта, пунктиром – его начальное положение



Возможность формирования вектора признаков, инвариантного к аффинным преобразованиям контура изображения объекта, расстояние от которого до изображающей системы много больше линейного размера этого объекта, анализировалась для двух случаев:

- 1) Объект считается плоским – контур его изображения после изменения пространственного положения объекта относительно изображающей системы может быть получен в результате аффинного преобразования контура исходного изображения этого объекта;
- 2) Объект считается неплоским – указанное выше условие не выполняется.

Показано, что в первом случае можно сформировать вектор признаков, полностью инвариантный к аффинному преобразованию контура изображения объекта: если контур изображения плоского объекта определен в системе координат $ХОУ$, точка O которой совпадает с центром тяжести этого контура, то для любых двух точек контура $Q_i(x_i, y_i)$ и $Q_j(x_j, y_j)$ может быть найдена величина

$$s_{ij} = x_i y_j - x_j y_i,$$

имеющая смысл аффинной площади сегмента контура. Для всех возможных пар точек замкнутого контура можно сформировать матрицу S_c аффинных площадей сегментов:

$$S_C = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1(N-1)} & s_{1N} \\ s_{22} & s_{23} & \cdots & s_{2N} & s_{21} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ s_{i1} & s_{i(i+1)} & \cdots & s_{i k_y} & \cdots & s_{i k_{N-1}} & s_{i k_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{NN} & s_{N1} & \cdots & s_{N(N-2)} & s_{N(N-1)} \end{pmatrix}, k_y = \begin{cases} i+j-1; i+j-2 < N \\ i+j-N-1; i+j-2 \geq N \end{cases}$$

Нормировка этой матрицы вида

$$S_C^N = \frac{S_C}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (S_C(i, j))^2}}$$

с последующим вычислением дискретного преобразования Фурье двумерной функции, задаваемой отсчетами S_C^N , позволяет найти амплитудный спектр $\hat{S}_C^N(i\Delta\omega_x, j\Delta\omega_y)$. Аналитически доказано, что отсчеты $\hat{S}_C^N(i\Delta\omega_x, j\Delta\omega_y)$ могут быть использованы для построения вектора признаков контура изображения объекта, инвариантного к аффинному преобразованию этого контура. Рис. 4 иллюстрирует инвариантность векторов признаков, полученных для одного из тестовых объектов.

Сделан вывод о том, что для описания найденного контура изображения объекта, представляющего собой некоторый N -угольник, следует использовать параметрическое представление координат его точек, причем параметр должен обладать свойством инвариантности к изменению положения контура в СК XOY и его масштабированию. Вычисление аффинной длины дуги контура требует вычисления производных второго порядка, поэтому в качестве параметра контура предложено использовать его замкнутую аффинную площадь:

$$\sigma_c(k) = \begin{cases} 0; & k=1; \\ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{k-1} |x(t)y(m+1) - x(m+1)y(m)|, & k=2, 3, \dots, N, \end{cases}$$

где k – номер вершины контура. Так как для вычисления $\sigma_c(k)$ требуется определить производные первого порядка, этот параметр оказывается более устойчив к наличию шумовой компоненты, что также оправдывает его применение при описании контура изображения объекта. Нормировка вида $\sigma_c^N(k) = \sigma_c(k)/\sigma_c(N)$ обеспечивает требуемую инвариантность введенного параметра к изменению масштаба контура, а процедура передискретизации контура, заключающаяся в формировании множества равноотстоящих отсчетов $\{\tilde{\sigma}_c^N(k)\}$, $k=1, 2, \dots, 2^L$, $L \in \mathbb{N}$, обеспечивает упрощение последующих расчетов.

Таким образом, сформировав матрицу S_C^N для 2^L точек контура, найдя $\hat{S}_C^N(i\Delta\omega_x, j\Delta\omega_y)$ и проведя конкатенацию строк матрицы $\hat{S}_C^N(i\Delta\omega_x, j\Delta\omega_y)$, полу-

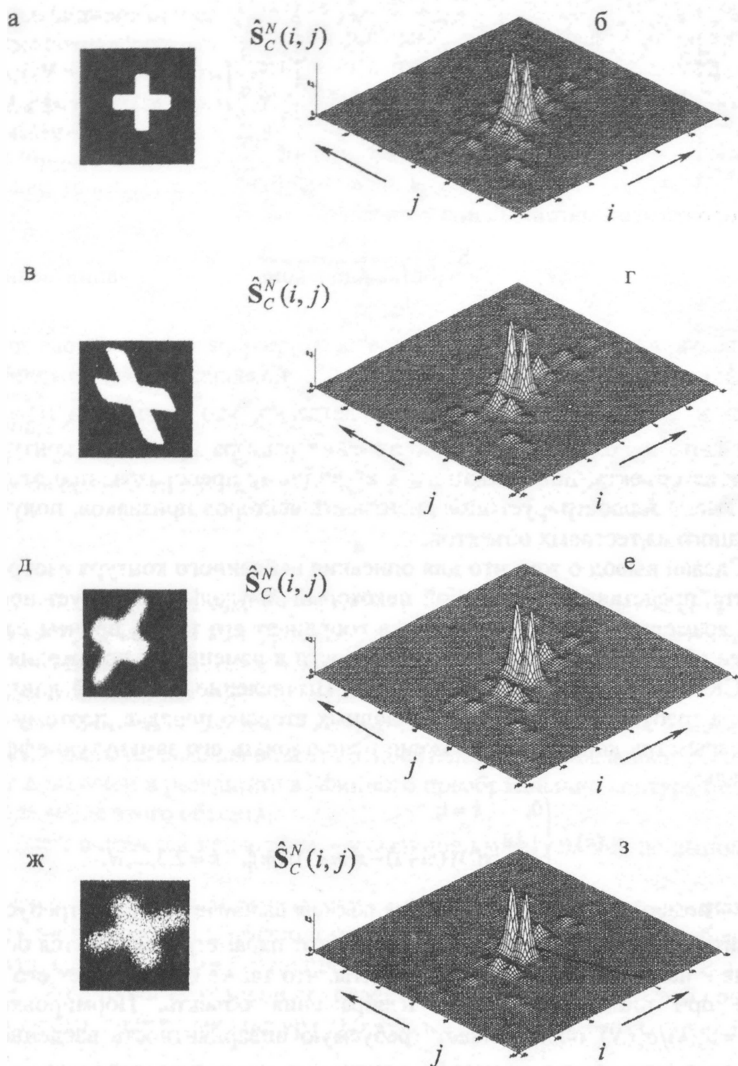


Рис. 4. Иллюстрация инвариантности к аффинному преобразованию и устойчивости к воздействию турбулентности и аддитивного шума амплитудных спектров матриц аффинных площадей: изображения объекта в СК XOY (а, в, д, ж); отсчеты амплитудных спектров (б, г, е, з) при $\Delta w_x = \Delta w_y$

чим 2^{2L} – мерный вектор признаков, инвариантный к аффинному преобразованию контура изображения плоского объекта.

Если наблюдаемый объект неплоский, то для его распознавания в условиях возможных изменений ракурса относительно изображающей системы следует провести обучение распознающей системы на множестве векторов признаков, полученных из P реализаций изображений различных ракурсов этого объекта. Число обучающих реализаций P , при использовании которых обеспечивается устойчивое распознавание объектов, зависит от ряда факторов: совокупности объектов, подлежащих распознаванию; форм поверхностей объектов; метеорологических условий их наблюдения; типа используемого классификатора. Поэтому в каждой конкретной ситуации величину P необходимо определять индивидуально. Описан алгоритм, применение которого позволяет сформировать квазиоптимальное множество обучающих реализаций векторов признаков, характеризующееся максимальными расстояниями между ними.

Проведен анализ целесообразности редукции пространства признаков. Сделан вывод о том, что в качестве компактного вектора признаков, устойчивого к искажениям изображений объекта турбулентной атмосферой, следует использовать последовательно упорядоченную совокупность строк матрицы F_m^n :

$$F_m^n(i, j) = \hat{S}_c^N(i, j), \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m, \quad n, m \ll N/2,$$

где n и m – условные границы пространства частот. Отмечено, что окончательный выбор квазиоптимальных параметров вектора признаков можно сделать только в результате оценки эффективности функционирования системы распознавания.

В четвертой главе изложена методика выбора квазиоптимальной структуры нейросетевого классификатора и параметров его обучения. В качестве классификатора предложено использовать однонаправленную двухслойную НС, обучаемую при помощи процедуры обратного распространения ошибок. Известно, что в результате выполнения этой процедуры ищется минимум целевой функции $E(\mathbf{w})$, которая при большом числе обучающих реализаций имеет вид:

$$E(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^M (y_k'(\mathbf{w}) - d_k')^2,$$

где P – число обучающих реализаций, $y_k'(\mathbf{w})$ – выходной сигнал k -го нейрона выходного слоя НС при предъявлении вектора $\mathbf{x}_j = (x_1', \dots, x_N')$ из множества обучающих реализаций, $\mathbf{w}$ – вектор весовых коэффициентов, N – число входов НС, L – число нейронов во внутреннем слое, $\mathbf{d}_j = (d_1', d_2', \dots, d_M')$ – ожидаемый выходной вектор, M – число нейронов в выходном слое. Как правило, число входов НС выбирают равным размерности вектора признаков, а число

нейронов в выходном слое – равным размерности ожидаемого выходного вектора. Тогда выбор структуры НС сводится к определению числа L нейронов в ее внутреннем слое. Так как изменение L приводит к изменению $\mathbf{w}$, квазиоптимальное значение L и соответствующий ему вектор $\mathbf{w}$ предложено определять по результатам статистического моделирования функционирования НС. Для этого множество входных векторов разделяется на обучающее множество $\mathbf{R}$ и тестовое множество $\mathbf{T}$. Способность отображения обученной НС элементов множества $\mathbf{R}$ характеризует качество обучения НС. Способность распознавания НС элементов множества $\mathbf{T}$ с размерностью P_T характеризует ее способность к обобщению обучающих векторов. Квазиоптимальные значения L и $\mathbf{w}$ определяются как величины, соответствующие минимальному значению погрешности обобщения $E_T(\mathbf{w}, L)$:

$$E_T(\mathbf{w}, L) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{P_T} \sum_{k=1}^M (y'_k(\mathbf{w}) - d'_k)^2,$$

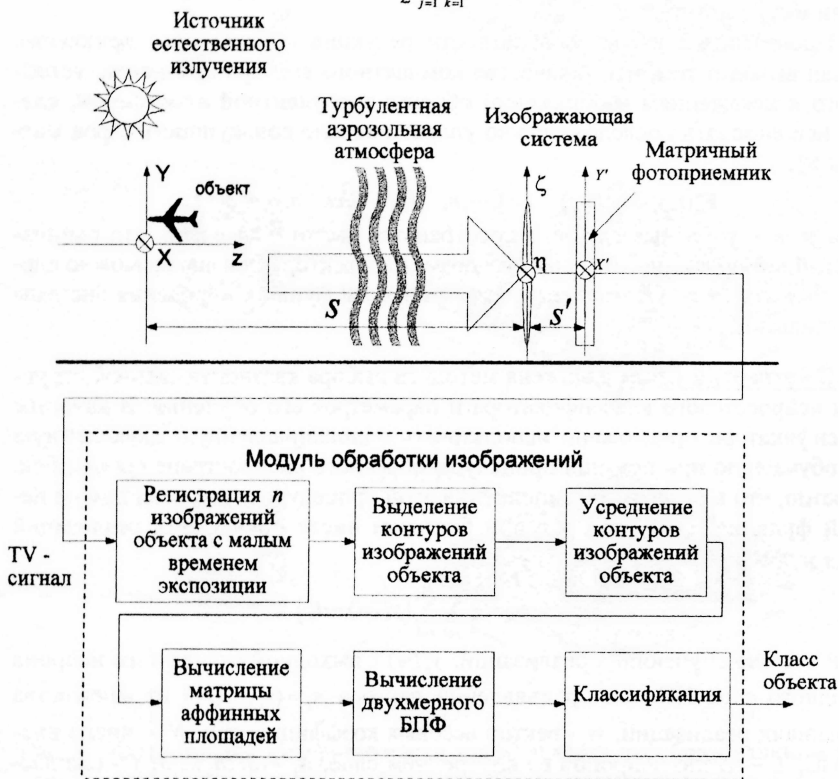


Рис. 5. Функциональная схема разработанной системы распознавания

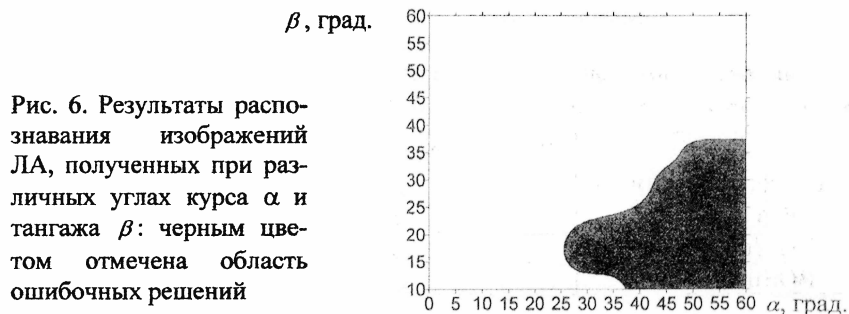
найденному при распознавании векторов признаков множества T . Функциональная схема разработанной системы распознавания представлена на рис. 5.

Базируясь на определении эффективности как отношения производительности системы к ее стоимости, и, характеризуя производительность системы распознавания как число полученных правильных решений, а стоимость – как число регистрируемых изображений объектов, более эффективной предложено считать ту систему, которая при тех же условиях наблюдения объекта позволяет получить большее число правильных решений при равном числе регистрируемых изображений. На основе этого критерия в результате проведенного численного моделирования была оценена эффективность работы разработанной системы распознавания ЛА при наблюдении объектов через слой турбулентной атмосферы в условиях наличия аддитивного шума регистрирующего фотоприемника.

В качестве тестовых объектов были выбраны ЛА восьми классов $C_1, C_2, \dots, C_8$: ЛА В2-А; ЛА F16; легкомоторный самолет; одновинтовой вертолет; ЛА EF2000; ЛА F22; ЛА BOEING 777; двухвинтовой вертолет. В обучающее множество R включены восемь векторов признаков изображений перечисленных ЛА – по одному вектору для каждого класса ЛА. В тестовое множество T включены вектора признаков четырех телевизионных изображений ЛА из каждого класса. Размерность N формируемого вектора признаков принята равной 36, число выходов НС равно 8. Анализ полученной зависимости $E_T(w, L)$, $L = 4, 5, \dots, 18$ показал, что квазиоптимальное значение числа нейронов L во внутреннем слое НС равно 13.

Способность разработанной системы распознавания к обобщению была оценена в результате распознавания изображений ЛА класса C_2 , полученных при различных величинах углов курса α и тангажа β . Анализ результатов распознавания (рис. 6) показывает, что ошибки распознавания наблюдаются в 22% случаях. Это свидетельствует о хорошей способности к обобщению НС с выбранными параметрами.

Результаты моделирования также показали, что распознавание изображений ЛА устойчиво к вносимым турбулентной атмосферой искажениям,



когда $r_0 > 8,5 \cdot 10^{-3}$ м, а дисперсия аддитивного нормального белого шума удовлетворяет условию $\sigma^2 \leq (0,8 \cdot I_{\max})^2$. При большем значении дисперсии шума, как правило, имеют место ошибки при выделении контура изображения ЛА.

Для подтверждения работоспособности разработанной системы распознавания был выполнен полунатурный эксперимент по распознаванию изображений макетов ЛА четырех классов: ЛА EUROFIGHTER JF 90 (класс C_1 , масштаб 1:144); ЛА F16 FIGHTER (класс C_2 , масштаб 1:144); ЛА F-19 Stealth Fighter (класс C_3 , масштаб 1:144); BOEING 777-200 (класс C_4 , масштаб 1:300). Изображения макетов этих ЛА получены с помощью видеокамеры MINTRON S05-65D при использовании объектива NEVA 2/20 и платы видеоввода сигнала в компьютер MIRO-VIDEO DC30.

В обучающее множество R были включены векторы признаков, сформированные для двух реализаций изображений макетов ЛА каждого из классов C_1 , C_2 и C_4 , и одной реализации изображения макета ЛА класса C_3 , поскольку его можно считать плоским. В тестовое множество T были включены векторы признаков 298 изображений различных ракурсов макетов ЛА каждого класса.

Полученные результаты распознавания изображений макетов ЛА, а также реализаций этих изображений, сформированных в результате моделирования вносимых турбулентной атмосферой искажений и воздействия аддитивного белого шума с дисперсией σ^2 показывают, что отношение f/p , где f – число правильных решений, p – число регистрируемых изображений (табл.) остается неизменным до тех пор, пока $r_0 > 9,0 \cdot 10^{-3}$ м и $\sigma^2 < (0,14 \cdot I_{\max})^2$. Случаи формирования ошибочных решений НС соответствуют ситуациям, когда величина угла между продольной осью макета ЛА и оптической осью изображающей системы была меньше 20° . Полученные результаты подтверждают способность разработанной системы распознавания к обобщению и ее устойчивость к вносимым турбулентной атмосферой искажениям изображений.

Таблица

Результаты распознавания изображений макетов ЛА четырех классов при общем числе регистрируемых изображений макета каждого ЛА $p = 298$

Класс ЛА	Число правильных решений f	f/p
EUROFIGHTER JF 90	249	0,84
F16 FIGHTER	258	0,87
F-19 Stealth Fighter	262	0,88
BOEING 777-200	275	0,93

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Созданная математическая модель формирования изображения объекта, наблюдаемого через слой приземной атмосферы, и разработанное на ее основе программное обеспечение для ЭВМ обеспечивают адекватное моделирование изображений объектов и позволяют оценивать результаты их распознавания.
2. Предложенная двухпараметрическая функциональная зависимость вектора внешней силы, используемой для модификации элементов активного контура изображения объекта, позволяет получить удовлетворительную аппроксимацию этого контура и ускорить процесс его построения по сравнению с известными методами модификации элементов активного контура.
3. Сформированный вектор признаков изображений плоских объектов инвариантен как к изменению ориентации объекта относительно оптико-электронной системы, так и к изменению его местоположения в поле зрения этой системы.
4. Предложенные методы и созданные на их основе алгоритмы и программы позволяют формировать множество векторов признаков изображений объектов, выбирать квазиоптимальную структуру системы распознавания и параметры классификатора, а также оценивать эффективность разработанной системы распознавания.
5. Разработанная система распознавания объектов по их изображениям обеспечивает устойчивое распознавание при изменении условий наблюдения и искажениях изображений турбулентной атмосферой.
6. Результаты выполненного эксперимента по распознаванию телевизионных изображений макетов четырех летательных аппаратов: F16 FIGHTER; EUROFIGHTER JF 90; F-19 Stealth Fighter и BOEING 777-200 подтверждают работоспособность разработанной системы распознавания.

Основные результаты диссертации представлены в следующих работах:

1. Бурый Е.В., Джафар А. Распознавание двумерных контрастных изображений объектов по инвариантным информативным признакам с применением нейросетевых алгоритмов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2001. – № 1. – С. 34 – 42.
2. Buryi E., Jafar A. Invariant Features Extraction Forming for Contrast Planer Objects Recognition // 8-th Int. Conf. ACS'2001. – Szczecin (Poland), 2001. – Part. 2. – P. 205 – 207.
3. Бурый Е.В., Джафар А. Получение инвариантных информативных признаков для распознавания двумерных контрастных изображений объектов // Нейрокомпьютеры и их применение: Труды VI Всеросс. конф. – М., 2000. – С. 32 – 43.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Подписано в печать 22/06/2004. Тир. 100 экз. Заказ. № 127, 7

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.