

На правах рукописи

Смирнова Юлия Леонидовна

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ
РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ДАЛЬНОСТНЫМ
ПОРТРЕТАМ В ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ**

Специальности: 05.13.01 — Системный анализ, управление и
обработка информации;
05.11.07 — Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2006

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

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. Волков И.К.

Научный консультант: д.т.н. Бурый Е.В.

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., проф. Формалев В.Ф.,
к.т.н. Бугаев Ю.Н.

Ведущая организация: Филиал ФГУП “ПО “УОМЗ”
“Урал-геофизика”

Защита состоится 17 октября 2006 года в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.15.

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

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., проф.

Г. Н. Кувыркин

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В связи с расширением сфер применения авиации в настоящее время особую значимость приобретает задача получения нетраекторной информации о летательных аппаратах (ЛА), лоцируемых в радио- или оптическом диапазонах длин волн. Эта информация необходима как для осуществления управления воздушным движением, так и для предотвращения поражения гражданских ЛА средствами противовоздушной обороны. Значимость принимаемых на основе этой информации решений предопределяет требования обеспечения высокого качества распознавания лоцируемых ЛА. Теоретические и экспериментальные исследования в области регистрации и обработки оптических сигналов проводились П.А. Бакутом, Е.В. Бурым, В.Е. Зуевым, Л.В. Лабунцом, Е.Г. Лебедько, И.Н. Матвеевым и др. Следует отметить ряд зарубежных исследований, авторы которых — Н.Р. Baltes, С.Л. Bennett, W-М. Boerner, G. Ross — внесли существенный вклад в развитие теории оптической локации. Во многих работах обсуждалась перспективность применения в лазерных локационных системах (ЛЛС) импульсов малой длительности ($1 \cdot 10^{-10} \dots 2 \cdot 10^{-9}$ с), обеспечивающих уменьшение погрешности измерения расстояний и возможность получения оценок геометрических параметров поверхности лоцируемого объекта. Особую значимость имеет правильный выбор методов и средств получения информации об объекте, при котором учитываются особенности процессов распространения, рассеяния и регистрации излучения. Как следствие, резко возрастает актуальность комплексной проблемы получения информации о форме поверхности и ориентации лоцируемых объектов при различных условиях локации и использования этой информации для распознавания объектов.

К важнейшим и актуальным задачам следует отнести: получение итоговой оценки качества распознавания лоцируемых объектов при использовании в ЛЛС системы распознавания (СР) с выбранными параметрами; обоснование достоверности этой оценки и последующий анализ возможности улучшения качества распознавания объектов в результате изменения параметров СР.

Разработка СР, основанная на применении современных достижений в области лазерной техники и средств регистрации и обработки сигналов в импульсных ЛЛС, как правило, включает следующие этапы: 1) синтез математических моделей поверхностей объектов, подлежащих распознаванию; 2) построение математических моделей процессов распространения, рассеяния и регистрации импульсов лазерного излучения; 3) выбор и реализация алгоритма первичной обработки регистрируемого сигнала и вычисление его признаков, инвариантных к изменению условий регистра-

ции излучения; 4) выбор типа и параметров классификатора СР; 5) формирование обучающего и тестового множества признаков для обучения и последующего тестирования СР; 6) обучение СР и проведение имитационного моделирования с целью оценки качества функционирования СР; 7) получение количественной оценки качества функционирования СР и, при необходимости, коррекция ее параметров.

При выполнении перечисленных выше этапов известные классические модели зачастую не позволяют учесть многие особенности генерации, распространения, рассеяния и регистрации лазерного излучения. Это обстоятельство приводит к необходимости разработки и реализации эффективных методов математического моделирования процессов распространения излучения ЛЛС, рассеяния излучения поверхностью лоцируемого объекта, регистрации излучения фотоприемным устройством ЛЛС и последующей обработки сигналов, формируемых на его выходе.

Цель работы и задачи исследования. Основная цель проведенных исследований состоит в разработке методов построения оценки качества распознавания объектов и выбора оптимальной конфигурации СР.

Объектом исследования является дальностный портрет, получаемый в результате локации объекта импульсом лазерного излучения.

Задачи исследования, решение которых было получено в процессе достижения поставленной цели, кратко формулируются следующим образом.

1. Анализ параметров СР, определяющих качество распознавания лоцируемых объектов.
2. Разработка методики формирования множеств векторов признаков для обучения и тестирования СР.
3. Построение критерия качества функционирования СР.
4. Разработка методики параметрической оптимизации СР в целях обеспечения максимального значения целевой функции критерия качества функционирования СР.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы системного анализа и математического моделирования, теория распознавания образов, методы теории вероятностей, математической статистики и теории случайных процессов, а также методы математического программирования.

Научная новизна. В процессе проведения исследования получены новые научные результаты как теоретического, так и прикладного характера:

- 1) математическая модель для расчета импульсных характеристик рассеяния (ИХР) и дальностных портретов подстилающей поверхности (ПП) с расположенными на ней местными предметами;

2) метод определения максимального размера сторон конечных элементов (КЭ), аппроксимирующих поверхность лоцируемого объекта, обеспечивающий заданную погрешность моделирования ИХР этого объекта;

3) методики построения критерия качества распознавания лоцируемого объекта и определения квазиоптимальных параметров СР.

Практическая и теоретическая ценность работы состоит в развитии методов математического моделирования и системного анализа применительно к решению важной задачи распознавания лоцируемых объектов. Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Разработана совокупность алгоритмов и программное обеспечение для расчета ИХР и дальностного портрета ПП с расположенными на ней местными предметами.

2. Разработан и реализован метод определения максимального размера сторон КЭ, аппроксимирующих поверхность лоцируемого объекта, позволяющий проводить расчет ИХР этого объекта с заданной точностью.

3. Предложена и обоснована структура скалярного критерия качества распознавания объектов и на его основе разработана и реализована методика определения оптимальных параметров СР.

Реализация результатов исследования. Разработанные математические модели, методики и программное обеспечение реализованы в НИР “Юпитер”, “Тропарь-ЛИСО”, а также в ГБ НИР 1.01.04Д, выполненных в Научно-исследовательском институте радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Математическая модель дальностного портрета ПП с расположенными на ней объектами, позволяющая проводить расчет дальностного портрета путем сочетания аналитического представления ИХР облучаемого участка ПП и конечноэлементной аппроксимации поверхностей расположенных на нем объектов.

2. Математическая постановка и решение задачи об определении оптимальных размеров сторон КЭ, аппроксимирующих поверхности объектов.

3. Методика формирования множеств векторов признаков для обучения и тестирования СР, учитывающая вариации характеристик рассеяния излучения участками поверхностей лоцируемых объектов.

4. Синтез глобального скалярного критерия качества функционирования СР и его применение для оптимизации параметров СР.

Апробация результатов работы. Результаты проведенного исследования докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

– Всероссийская конференция “Нейрокомпьютеры и их применение” НКП-2002 (Москва, 2002);

– Первая международная научно-техническая конференция “Аэрокосмические технологии”, посвященная 90-летию со дня рождения академика В.Н.Челомея (Москва - Реутов, 2004);

– Международная конференция “Образование через науку”, посвященная 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2005);

– на научных семинарах кафедры “Математическое моделирование” и отдела 05 НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в трех статьях, трех тезисах докладов на конференциях и изложены в четырех научно-технических отчетах о НИР.

Личный вклад соискателя. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 120 наименований, и приложения. Работа изложена на 148 страницах, включает 1 таблицу и 50 рисунков.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель, задачи исследований и научные положения, выносимые на защиту, приведена структура диссертации, формы апробации и реализации результатов.

В первой главе проведен сравнительный анализ известных источников нетраекторной информации о лоцируемом объекте. Показано, что при локации объекта коротким импульсом $P_A(t)$ лазерного излучения с длиной волны λ активной импульсной ЛЛС, длительность которого много меньше времени распространения излучения вдоль поверхности объекта, на выходе фотоприемного устройства ЛЛС формируется сигнал электрического напряжения, определяемый функционалом

$$U(t) = P_A(t) \otimes G_{AO}(t) \otimes G_O(t) \otimes G_{OB}(t) \otimes G_{ФПУ}(t), \quad (1)$$

где \otimes — оператор свертки, t — время, $G_{AO}(t)$, $G_{OB}(t)$ — импульсные характеристики атмосферных каналов AO и OB соответственно при расположении источника излучения в точке A , приемника в точке B и объекта в точке O ; $G_O(t)$ — ИХР объекта; $G_{ФПУ}(t)$ — импульсная характеристика фотоприемного устройства ЛЛС. Если оптическая система

приемного канала расположена в непосредственной близости к передатчику ЛЛС, то полагают $G_{AO}(t) \equiv G_{OB}(t) \equiv G_A(t)$. Вид функциональной зависимости $G_{ФПУ}(t)$ определяется параметрами фотоприемного устройства ЛЛС, а ИХР объекта $G_O(t)$ определяется формой облученной части S поверхности лоцируемого объекта, характеристиками рассеяния излучения ее участками, распределением интенсивности зондирующего излучения в окрестности объекта, а также положением и ориентацией объекта относительно ЛЛС. ИХР объекта $G_O(t)$ определяется выражением

$$G_O(t) = \frac{c}{2} \frac{d}{dz} \left(\int_{S(z)} \rho_\lambda(M) \cos \varphi(M) dS_M \right) \Big|_{z=ct/2}, \quad (2)$$

где c — скорость распространения излучения в атмосфере, $\rho_\lambda(M)$ — индикатриса рассеяния облучаемой поверхности объекта в окрестности dS_M точки M , $\varphi(M)$ — угол между внешней нормалью к dS_M и направлением на источник излучения, координата z отсчитывается в направлении распространения излучения от точки поверхности объекта, ближайшей к источнику. Поскольку представления ИХР в аналитически замкнутом виде с использованием (2) могут быть найдены лишь в тех немногих случаях, когда в явном виде известны зависимости $S(z)$ и $\rho_\lambda(M)$, а получаемые при этом выражения часто оказываются громоздкими и принципиально не допускают изменения функции $\rho_\lambda(M)$, то для моделирования ИХР объектов их поверхности аппроксимируют совокупностью плоских треугольных КЭ. В этом случае ИХР $G_O(t)$ определяется как суперпозиция ИХР отдельных КЭ

$$G_O(t) = \sum_{n=1}^N \chi_n R_{\lambda,n} g_n(t), \quad (3)$$

где $R_{\lambda,n}$ — усредненный коэффициент рассеяния излучения с длиной волны λ поверхностью n -го КЭ; $\chi_n = 1$, если n -ый КЭ рассеивает излучение в направлении приемника ЛЛС и $\chi_n = 0$ в противном случае; N — число КЭ, аппроксимирующих поверхность лоцируемого объекта; $g_n(t)$ — ИХР n -го КЭ. Считая размеры КЭ малыми по сравнению с расстоянием R_O до лоцируемого объекта и размером самого объекта, пренебрегаем сферичностью волнового фронта в окрестности КЭ. Тогда ИХР n -го КЭ определяется равенством

$$g_n(t) = \frac{c}{2} \frac{\cos^2 \varphi_n}{\pi} l_n(t), \quad (4)$$

где $l_n(t)$ — длина линии пересечения плоскости волнового фронта с поверхностью n -го КЭ, а φ_n — угол, образуемый нормалью к плоскости КЭ и направлением на источник излучения.

Доказано, что использование представления (3) для расчета ИХР оправдано, если производится локация объекта, находящегося в “свободном пространстве”, т.е. когда в лоцируемом объеме нет других объектов. Если же ЛЛС расположена на борту ЛА, осуществляющего движение в воздушном пространстве и производящего локацию ПП с целью обнаружения каких-либо препятствий, которые могут повлиять на безопасность его полета, то возникает необходимость разработки и обоснования математической модели ИХР ПП с расположенными на ней объектами.

Из проведенного сравнительного анализа известных результатов следует, что в качестве вектора признаков \mathbf{X} дальностного портрета, удовлетворяющего условиям представимости и инвариантности, целесообразно использовать совокупность низкочастотных отсчетов амплитудного спектра сигнала $U(t)$, а квазиоптимальную размерность пространства признаков оценивать путем максимизации на множестве $\mathbb{W} = \{w \in \mathbb{R}^q : 0 \leq w_i \leq 1, i = \overline{1, N}\}$ весовых коэффициентов функционала

$$J(w_1, \dots, w_q) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i \frac{\|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|^2}{\|\mathbf{X}_i\| \cdot \|\mathbf{X}_j\|}, \quad (5)$$

где \mathbf{X}_i и \mathbf{X}_j — векторы признаков эталонных объектов из i -го и j -го классов, а $\|\mathbf{X}\| = \sqrt{w_1^2 x_1^2 + \dots + w_q^2 x_q^2}$ — норма вектора \mathbf{X} в пространстве признаков размерности q с весами w_1, \dots, w_q . Для нахождения квазиоптимальной размерности пространства признаков последовательно в $Q - 1$ векторных базисах с размерностями $q = 2, 3, \dots, Q$ итерационным путем осуществляется поиск экстремума функционала (5) на множестве \mathbb{W} . Искомая размерность Q^* пространства признаков соответствует размерности q того векторного базиса, в котором найденное максимальное значение функционала (5) окажется наибольшим.

В связи с отсутствием априорной информации о законах распределения компонент векторов признаков и их ковариаций в качестве классификатора СР использована двухслойная нейронная сеть прямого распространения.

Поскольку правильность реализованной процедуры и достоверность принятого решения о распознавании лоцируемого объекта должны быть оценены при помощи системы количественных показателей, поставлена задача синтеза обобщающего критерия качества функционирования СР. Структура его целевой функции должна обеспечивать не только оценку

качества распознавания, но и позволять использовать ее в роли целевой функции при постановке задач оптимизации параметров СР.

Вторая глава посвящена математическому моделированию дальностного портрета сцены — облучаемой области ПП с расположенными на ней местными предметами. Разработана и теоретически обоснована математическая модель для расчета ИХР сцены и решена задача выбора квазиоптимального размера сторон треугольного КЭ, используемого при аппроксимации КЭ поверхностей расположенных на ПП объектов. В качестве критерия оптимальности использован критерий предельного уровня (определяются максимально допустимые размеры сторон КЭ, при которых ошибка расчета ИХР не превышает заданного значения).

При построении модели ИХР предполагалось, что ЛЛС расположена на борту ЛА и расстоянием между передатчиком и приемником излучения ЛЛС можно пренебречь по сравнению с расстоянием до ПП. Построение модели ИХР для так называемой мультистатической схемы локации, когда расстояние между приемником и передатчиком ЛЛС велико, оказывается существенно сложнее и рассмотрено в приложении.

Предполагается, что ЛА осуществляет полет на высоте H (рис. 1), угол между оптической осью передатчика ЛЛС и ПП равен φ , диаграмма направленности передатчика ЛЛС осесимметрична, угол расходимости излучения равен ϑ , а профиль распределения интенсивности излучения в поперечном сечении луча является гауссовым. При этом граница лоцируемой области пространства является частью поверхности конуса. Если $\varphi \in (\vartheta/2, \pi/2)$, то облучаемая область ПП ограничена эллипсом.

Множество точек ПП, находящихся на расстоянии $r = ct/2$ от точки O' , образует в плоскости OXZ окружность, поэтому для расчета ИХР облучаемой области ПП проводилось интегрирование по дуге этой окружности, ограниченной эллипсом (см. рис. 1). ИХР облучаемой области ПП является финитной функцией и при диффузном рассеянии излучения имеет вид

$$G_S(t) = \frac{2H^2\rho}{ct^2} \int_0^{\gamma_{\max}} R_{\lambda,S}(\rho, \gamma) \Psi_S(\rho, \gamma) d\gamma \Big|_{\rho=\sqrt{(\frac{ct}{2})^2-H^2}}, \quad t \in [t_{\min}, t_{\max}], \quad (6)$$

где ρ и γ определяют положение рассматриваемой точки M , величина угла γ_{\max} определяется из условия пересечения рассматриваемой окружности и эллипса, $R_{\lambda,S}(\rho, \gamma)$ — распределение коэффициента рассеяния излучения по ПП, $\Psi_S(\rho, \gamma)$ — распределение интенсивности излучения по ПП, а $t_{\min} = |O'M_1|/2c$, $t_{\max} = |O'M_2|/2c$.

Для случая, когда на ПП находятся один или несколько объектов (местных предметов — таких как кустарники, деревья и т.п.), при рас-

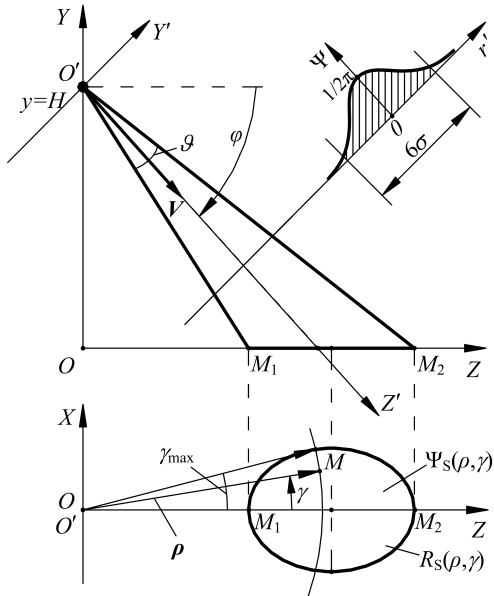


Рис. 1. Схема локации ПП

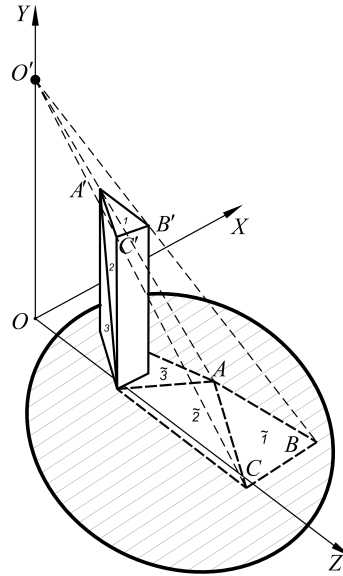


Рис. 2. Затенение ПП объектом

чете ИХР сцены для уменьшения вычислительных затрат использовался принцип суперпозиции

$$G(t) = G_S(t) + \sum_{k=1}^K (G_k(t) - \tilde{G}_k(t)), \quad (7)$$

где K — общее число объектов, $G_k(t)$ — ИХР облученной части поверхности k -го объекта, $\tilde{G}_k(t)$ — ИХР затененной им области ПП. Представление (7) справедливо в том случае, когда попавшие в лоцируемый объем объекты друг друга не затеняют. Для определения ИХР объектов использовалась аппроксимация их поверхностей плоскими треугольными КЭ, при этом ИХР k -го объекта определялась в соответствии

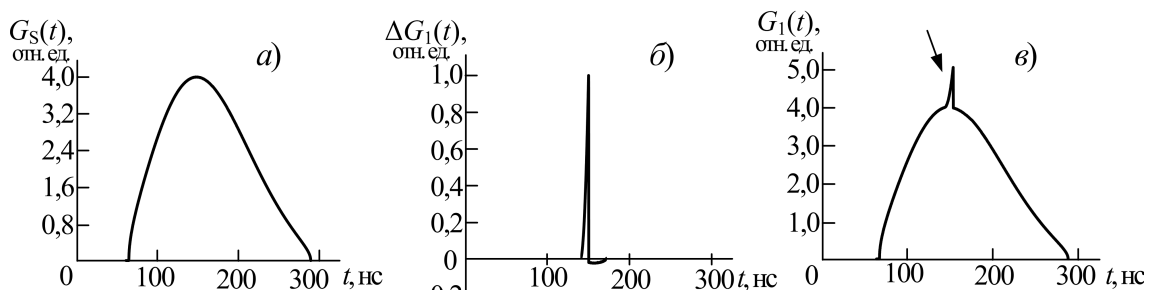


Рис. 3. ИХР облучаемой области ПП (а), рассчитанная для сферы разность $\Delta G_1(t) = G_1(t) - \tilde{G}_1(t)$ (б), ИХР ПП с расположенной на ней сферой (в)

с (3) и (4), причем для определения ИХР КЭ вводился коэффициент, учитывающий распределение интенсивности излучения в окрестности рассматриваемого n_k -го КЭ. Для определения ИХР затененной КЭ $A'B'C'$ области ABC ПП (рис. 2) в работе предложена методика расчета ИХР, учитывающая распределение интенсивности излучения по области тени и вариации коэффициента рассеяния участками этой области (рис. 3).

Для произвольной поверхности двойкой кривизны обоснована целесообразность использования критерия предельного уровня, позволяющего для заданной величины допустимой ошибки $\bar{\varepsilon}^*$ расчета ИХР ее участка определить максимально допустимую длину стороны l_{\max} аппроксимирующего его КЭ: $l_{\max} = \bar{\varepsilon}^{-1}(\bar{\varepsilon}^*)R$, где R — минимальный радиус кривизны аппроксимируемой области поверхности объекта. При этом относительная погрешность вычисления ИХР при аппроксимации этой области треугольными КЭ с наибольшей стороной l_{\max} не будет превышать погрешность при аппроксимации такими КЭ диффузно рассеивающей излучение области сферической поверхности, если в качестве R использовать наименьший из главных радиусов кривизны этой поверхности в окрестности рассматриваемой точки. Результаты аналитических расчетов и вычислительных экспериментов подтвердили корректность исходных допущений.

Математическая модель для определения выходного тока $i(t)$ фотодетектора в режиме регистрации сильного сигнала известна. Для построения аналогичной модели в режиме регистрации излучения малой интенсивности в настоящей работе ток имитировался последовательностью одноэлектронных импульсов тока:

$$i(t) = \sum_{n=1}^N \chi_n G_{\text{ФД}}(t - t_d - \tau_n),$$

где $G_{\text{ФД}}$ — импульсная характеристика фотодетектора, t_d — время задержки, зависящее от характеристик фотодетектора, а реализации последовательностей случайных величин $\{\chi_n\}_{n=1}^N$ и $\{\tau_n\}_{n=1}^N$ определялись методами имитационного моделирования. Зависимость электрического напряжения на выходе усилителя имеет вид

$$U(t) = K_{\text{УС}} R_{\text{н}} i(t) \otimes G_{\text{УС}}(t) + A_{\xi} \xi(t),$$

где $K_{\text{УС}}$ — коэффициент усиления сигнала, $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки, $G_{\text{УС}}(t)$ — импульсная характеристика усилителя, содержит аддитивную составляющую $A_{\xi} \xi(t)$, которая позволяет моделировать различный уровень зашумления сигнала.

В **третьей главе** для оценки качества функционирования СР использована известная совокупность средней вероятности $\langle P_r \rangle$ правильного

распознавания всех K объектов, минимальной вероятности P_{\min} правильного распознавания одного из K объектов и вероятности ошибки P_e . Значения этих величин определялись путем имитационного моделирования функционирования СР. С привлечением методов теории вероятностей и математической статистики были получены точечные и интервальные оценки для вероятностей $\langle P_r \rangle$, P_{\min} и P_e , каждая из которых зависит от вектора параметров $\mathbf{W} = [N_{\xi}^{\circ}, Q, \Delta]^T$, где N_{ξ}° — число зашумленных реализаций сигнала в эталонном множестве \mathbb{U}° сигналов, $j = \overline{1, J^{\circ}}$, J° — число вариантов наблюдений каждого из объектов для обучения СР при $A_{\xi} = 0$, $k = \overline{1, K}$ и K — число объектов распознавания; Q — размерность пространства признаков; Δ — допустимая ошибка обучения нейронной сети.

Это обстоятельство позволило сформулировать задачу векторной оптимизации относительно параметров СР, представленных вектором \mathbf{W} , на множестве допустимых параметров СР \mathbb{W} :

$$p_k(\mathbf{W}) \rightarrow \max_{\mathbf{W} \in \mathbb{W}}, k = \overline{1, 3}, \quad (8)$$

где $p_1(\mathbf{W}) = \langle P_r \rangle(\mathbf{W})$, $p_2(\mathbf{W}) = P_{\min}(\mathbf{W})$, $p_3(\mathbf{W}) = 1 - P_e(\mathbf{W})$.

Для решения задачи (8) реализована идея синтеза глобального скалярного критерия с последующим переходом к соответствующей задаче математического программирования. Целевая функция глобального скалярного критерия для задачи векторной оптимизации (8) имеет вид

$$\mathcal{K}(\mathbf{W}) = \sigma_1 p_1(\mathbf{W}) + \sigma_2 p_2(\mathbf{W}) + \sigma_3 p_3(\mathbf{W}), \quad (9)$$

где $\{\sigma_k\}_{k=1}^3$ — весовые коэффициенты — неизвестные параметры, удовлетворяющие условиям $\sum_{k=1}^3 \sigma_k = 1$, $0 \leq \sigma_k \leq 1$, $k = \overline{1, 3}$. В этом случае значение весового коэффициента σ_k определяет значимость k -ой локальной цели при решении задачи векторной оптимизации (8), значение $p_k(\mathbf{W})$ дает представление о качестве оптимизации по k -му критерию, а качество функционирования СР определяется значением $\mathcal{K}(\mathbf{W})$. Для определения весовых коэффициентов использован метод, основанный на решении задачи линейного программирования, которая формулируется на основе экспертных оценок качественного характера.

Разработанная методика проведения параметрического анализа качества СР, представляет собой процедуру, состоящую из трех основных этапов: 1) определение числа объектов и их ракурсов, подлежащих распознаванию, а также формирование двух множеств сигналов — для обучения СР и для проведения имитационного моделирования функционирования СР с целью количественного определения значения целевой функции

критерия ее качества; 2) определение параметров СР и установление границ их допустимого варьирования; 3) решение задачи математического программирования

$$\mathcal{K}(\mathbf{W}) \rightarrow \max_{\mathbf{W} \in \mathbb{W}}. \quad (10)$$

Следует заметить, что синтезированный критерий качества можно использовать для анализа ситуационных задач.

Так как изменение характеристик рассеяния отдельных участков поверхности объекта оказывает значительное влияние на вид его дальностного портрета, анализ нижней границы целевой функции критерия качества функционирования СР в зависимости от конкретной реализации распределения коэффициентов рассеяния по поверхностям объектов $R_\lambda(\Omega)$ имеет важное значение при оценке параметров СР. Вариации вероятностей $\langle P_r \rangle$, P_{\min} и P_e могут быть значительными из-за отсутствия в обучающем множестве СР векторов признаков, адекватно отражающих возможные реализации коэффициентов рассеяния поверхностей объектов.

Сформулирована задача оценки наилучшего качества функционирования СР в наихудших условиях: определить качество функционирования СР в случае, когда реализация $R_\lambda(\Omega)$ обеспечивает минимальное расстояние между векторами признаков дальностных портретов, определенное на множестве наблюдаемых ракурсов объекта или совокупности объектов, подлежащих распознаванию. Получено решение этой задачи для K объектов, основанное на поиске совокупности $\{R_{\lambda mk} : m, k = \overline{1, K}, k \neq m\}$ распределений коэффициентов рассеяния по поверхностям соответствующих объектов и формировании множества векторов признаков $\tilde{\mathbf{X}}$, рассчитанных для найденной совокупности $\{R_{\lambda mk}\}$ с последующим проведением имитационного моделирования функционирования СР для определения его качества. Приведены результаты расчета $R_{\lambda 12}$ и $R_{\lambda 21}$ для ЛА F16 и Cessna, а также результаты имитационного моделирования функционирования СР, которые показали, что распознавание объектов СР в целом можно характеризовать как устойчивое к вариациям характеристик рассеяния излучения участками поверхностей объектов. При этом обучение СР на множестве векторов признаков, учитывающих вариации характеристик рассеяния излучения поверхностями лоцируемых объектов, привело к увеличению качества функционирования СР и уменьшило его зависимости от уровня аддитивного шума.

В **четвертой главе** приведены результаты вычислительных экспериментов, позволившие сравнить качество функционирования двух СР, обученных на одинаковых множествах векторов признаков, но ориентированных на решение различных ситуационных задач: задачи определения наличия какого-либо препятствия на ПП и задачи определения нали-

чия опасного для полета ЛА препятствия на ПП. При этом предполагалось, что: 1) ЛА осуществляет полет над ПП в диапазоне высот от H_{\min} до H_{\max} и на горизонтальной плоской ПП могут быть расположены объекты — местные предметы, допускающие аппроксимацию сферой (куст), конусом (дерево) или цилиндром (столб); 2) в лоцируемом объеме одновременно может находиться не более одного из перечисленных объектов (СР для решения первой ситуационной задачи по регистрируемому бортовой ЛЛС дальностному портрету должна принять решение о наличии на ПП какого-либо из перечисленных объектов или об отсутствии любого из них, а СР для решения второй ситуационной задачи — о наличии или об отсутствии на ПП препятствия, представляющего опасность для ЛА); 3) к опасным препятствиям относятся конус и цилиндр; 4) ЛА осуществляет полет на высоте $H = 100$ м, а рассматриваемые объекты имеют следующие размеры: радиус сферы 1,5 м, радиус основания и высота конуса 1,5 м и 8 м, соответственно, радиус цилиндра 0,15 м и высота 6 м, зондирующий импульс $P_A(t)$ излучения гауссовой формы длительностью 3 нс, при этом угол ϑ расходимости излучения передатчика ЛЛС 3° , а угол между оптической осью ЛЛС и горизонтальным направлением составляет $\varphi = 35^\circ$. Эталонное множество сигналов было сформировано из дальностных портретов перечисленных объектов при 6 вариантах их расположения на ПП относительно ЛА (рис. 4). На этом же рисунке штриховой линией отмечены положения объектов, из дальностных портретов которых сформировано тестовое множество сигналов.

При синтезе целевой функции K скалярного критерия качества функ-

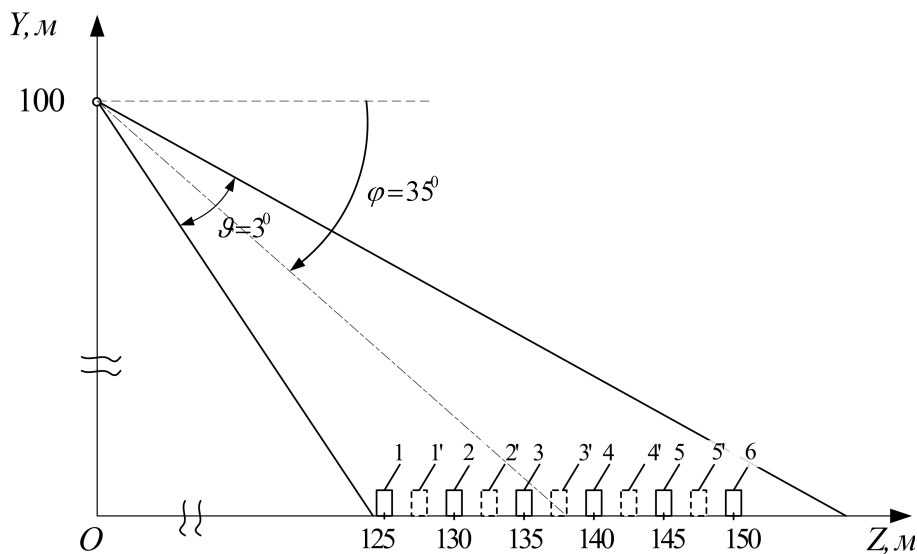


Рис. 4. Схема локации ПП с возможными вариантами расположения на ней объектов

ционирования СР использована совокупность локальных целевых функций $\{\langle P_r \rangle, P_{\min}, P_e, P_u\}$, где P_u функционал, характеризующий степень полезности информации, выдаваемой СР пилоту ЛА. Учитывая бóльшую информативность решения второй ситуационной задачи, были выбраны следующие значения P_u : для первой ситуационной задачи $P_{u1} = 0,2$, а для второй $P_{u2} = 1$. При этом целевая функция скалярного критерия качества имеет вид

$$\mathcal{K} = 0,360 \langle P_r \rangle + 0,262 P_{\min} + 0,125 (1 - P_e) + 0,253 P_u.$$

Установлено, что наибольшее значение целевой функции критерия качества $\mathcal{K}_1 = 0,698$ при уровне шума, не превышающем 0,1 от максимального значения сигнала, и при $N_\xi^\circ = 100$ зашумленных реализациях каждого из сигналов эталонного множества обеспечивает СР с параметрами $Q = 80$, $\Delta = 0,001$. Для решения второй ситуационной задачи при уровне шума, не превышающем 0,1 от максимального значения сигнала, и при $N_\xi^\circ = 1000$ зашумленных реализациях каждого из сигналов эталонного множества наилучшее качество $\mathcal{K}_1 = 0,882$ обеспечивает СР с параметрами $Q = 100$, $\Delta = 0,001$.

Результаты вычислительного эксперимента позволили сделать следующие выводы.

1. Сравнение размерностей пространства векторов признаков, полученных путем имитационного моделирования функционирования СР и максимизации функционала (5), подтвердило состоятельность разработанной методики выбора оптимальных параметров СР.

2. Подтверждена целесообразность использования для расчета ИХР ПП с расположенными на ней местными предметами модели, включающей аналитическое определение ИХР облучаемого участка ПП в сочетании с конечноэлементным подходом для определения ИХР местных предметов. Эта модель позволяет существенно сократить время вычисления ИХР сцены.

Для оценки наилучшего качества функционирования СР в наихудших условиях для рассматриваемых ситуационных задач сформированы множества \tilde{X}_1, \tilde{X}_2 векторов признаков, учитывающие возможные изменения параметров рассеяния излучения ПП и поверхностей объектов (рис. 5). При этом для первой ситуационной задачи значение целевой функции синтезированного критерия качества увеличилось и составило $\mathcal{K}_1 = 0,818$, а для второй задачи это значение возросло в меньшей степени и составило $\mathcal{K}_2 = 0,931$. Таким образом, полученные значения являются нижней гранью того интервала значений целевой функции скалярного критерия качества, которые могут быть достигнуты при использовании данной СР для решения обеих рассмотренных ситуационных задач.

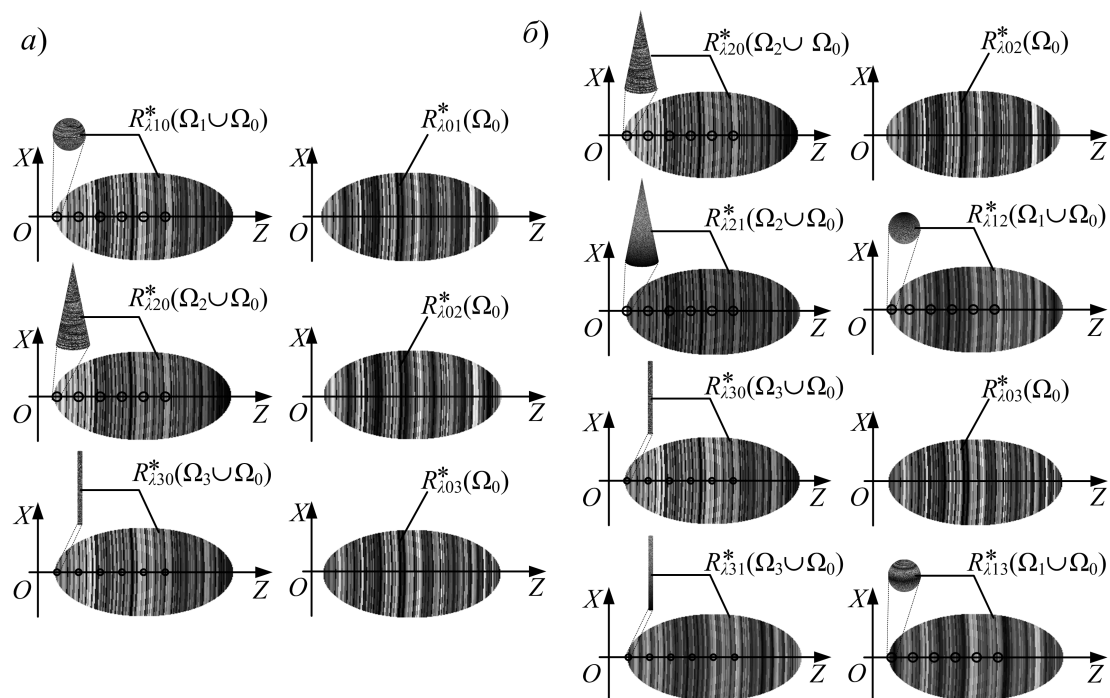


Рис. 5. Распределения коэффициентов рассеяния по поверхностям объектов и ПП, полученные для первой (а) и для второй (б) ситуационных задач

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты, полученные в работе, состоят в следующем.

1. Построена и теоретически обоснована математическая модель дальностного портрета подстилающей поверхности с расположенными на ней объектами, разработан и реализован алгоритм расчета таких дальностных портретов.

2. Разработана методика определения максимальных допустимых размеров сторон конечных элементов, аппроксимирующих поверхности объектов, при которых ошибка расчета импульсных характеристик рассеяния не будет превышать заданного значения.

3. Разработана методика моделирования сигнала на выходе фотодетектора в случае регистрации излучения малой интенсивности.

4. Реализована идея синтеза глобального скалярного критерия качества функционирования системы распознавания, на основе которого сформулирована задача оптимизации параметров систем распознавания и разработано соответствующее программное обеспечение.

5. Построенные модели и разработанное программное обеспечение использованы для оптимизации параметров систем распознавания для двух ситуационных задач. Полученные в ходе имитационного моделирования процесса распознавания результаты подтвердили адекватность разработанных моделей и эффективность предложенных алгоритмов.

Проведенные в работе исследования и полученные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Построенная математическая модель дальностного портрета подстилающей поверхности с расположенными на ней объектами позволяет проводить расчет дальностного портрета путем сочетания аналитического представления ИХР облучаемого участка ПП и конечноэлементной аппроксимации поверхностей расположенных на нем объектов.

2. Найденная функциональная зависимость относительной ошибки расчета ИХР объектов от размера сторон конечных элементов, аппроксимирующих поверхности объектов, позволяет определить максимальный размер сторон конечных элементов, обеспечивающих ошибку расчета импульсных характеристик рассеяния, не превышающую заданного значения.

3. Разработанная математическая модель выходного тока фотодетектора в режиме регистрации излучения малой интенсивности позволяет находить реализации тока методами имитационного моделирования.

4. Синтезированный глобальный скалярный критерий качества функционирования системы распознавания позволяет не только проводить сравнение различных систем распознавания между собой, но и определять оптимальные значения параметров систем распознавания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ПРЕДСТАВЛЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Бурый Е.В., Смирнова Ю.Л. Формирование репрезентативного множества векторов признаков для обучения системы распознавания типов летательных аппаратов методом моделирования распределений коэффициентов рассеяния их поверхностей // Математическое моделирование. – 2004. – Т. 16, № 4. – С. 80-88.

2. Бурый Е.В., Смирнова Ю.Л. Влияние квантового характера регистрации излучения малой интенсивности на погрешность измерения расстояний в импульсной лазерной локации // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 12. – С. 1147-1150.

3. Определение направления вектора скорости летательного аппарата относительно подстилающей поверхности по дальностному портрету, регистрируемому бортовой лазерной локационной системой / Е.В. Бурый, И.К. Волков, В.Н. Рождествин, Ю.Л. Смирнова // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2005. – Т. 2, № 4-5. – С. 21-28.

4. Бурый Е.В., Смирнова Ю.Л. Анализ устойчивости распознавания объектов в оптическом диапазоне при изменении характеристик рассеяния их поверхностей // Нейрокомпьютеры и их применение: Труды VIII Всеросс. конф. – М., 2002. – С. 86-87.

5. Смирнова Ю.Л. Лазерная дальномерная станция как составная часть аэрокосмической системы // Аэрокосмические технологии: Материалы Первой международной научно-технической конф., посвященной 90-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея. – М., 2004. – С. 38-42.

6. Перспективы применения метода анализа дальностных портретов объектов в импульсной лазерной локации / Е.В. Бурый, А.К. Дибижев, В.Н. Рождествин, Ю.Л. Смирнова // Образование через науку: Тез. докл. международного симпозиума. – М., 2005. – С. 118-123.

7. Исследование и разработка основных узлов лазерной локационной системы воздушного базирования для распознавания воздушных объектов в интересах ВВС. Теоретические исследования устойчивости процесса распознавания объектов по дальностным портретам к изменению отражательных характеристик их поверхностей. Отчет о НИР (промежуточ.) / НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана; Руководитель Бурый Е.В. – ЛО28297/4; Инв. № РЛМ-164/01. – М., 2001. – Ч. 4. – 105 с.

8. Исследование и разработка основных узлов лазерной локационной системы воздушного базирования для распознавания воздушных объектов в интересах ВВС. Теоретические исследования и разработка методов распознавания реальных объектов, проведения экспериментальных исследований и оценки параметров атмосферы. Отчет о НИР (итоговый) / НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана; Руководитель Бурый Е.В. – ЛО28297/5; Инв. № РЛМ-88/02. – М., 2002. – Ч. 5. – 89 с.

9. Исследование лазерной интегрированной системы распознавания воздушных объектов и обнаружения препятствий. Теоретические исследования и расчет энергетического потенциала бортового лазерного дальномера, обеспечивающего распознавание тестовых воздушных объектов и наземных препятствий. Отчет о НИР (промежуточ.) / НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана; Руководитель Бурый Е.В. – Л210503/1; Инв. № РЛМ-27/03. – М., 2003. – Ч. 1. – 70 с.

10. Исследование и разработка системы распознавания ракурсов удаленных объектов по дальностным портретам при малой интенсивности регистрируемого лазерного излучения. Отчет о НИР (итоговый) / НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана; Руководитель Бурый Е.В. – 1.01.04 Д; Инв. № РЛМ-18/04. – М., 2004. – 91 с.

Подписано к печати . Заказ № .

Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана