

На правах рукописи

КОСТОУСОВ Андрей Викторович

**ЗАДАЧА НАВИГАЦИИ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ
ИЗОБРАЖЕНИЯМ ТОЧЕЧНЫХ ОРИЕНТИРОВ**

05.13.18 — математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург — 2006

Работа выполнена на кафедре информатики и процессов управления Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор В.Е. Третьяков.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник А.Л. Агеев;

кандидат технических наук,
доцент М.П. Трухин.

Ведущая организация: Российский федеральный ядерный центр —
— Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики,
РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск).

Защита состоится ____ октября 2006 года в ____ на заседании диссертационного совета К 212.286.01 при Уральском государственном университете им. А.М. Горького по адресу: 620083, Екатеринбург, К-83, пр. Ленина, 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Автореферат разослан «____» сентября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор

В.Г. Пименов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблемы управления сложными динамическими системами в условиях неполной информации многие годы служат предметом исследований Свердловской школы математической теории процессов управления. В работах Н.Н. Красовского, А.Б. Куржанского, Ю.С. Осипова, А.И. Субботина, В.Е. Третьякова были сформированы научные направления, определившие тематику и методы исследований в широком круге задач динамики и управления. Традиционной особенностью выполняемых по этой тематике работ является постоянное внимание, уделяемое прикладным аспектам теории. Наряду с исследованиями фундаментального характера, закладывающими основы для будущих приложений, широкое развитие получили теоретические и прикладные работы, направленные на создание программных средств и разработку адекватного математического аппарата для анализа конкретных классов задач управления и наблюдения.

К таким задачам относится навигация движущихся объектов по геофизическим полям (полю рельефа, аномальным магнитному и гравитационному полям Земли, полю радиолокационного контраста), которая в течение последних 30 лет является интенсивно развивающейся областью научных исследований и технических разработок. Проблемам навигации по геофизическим полям и изучению их свойств посвящены работы В.К. Баклицкого, И.Н. Белоглазова, В.И. Бердышева, В.Л. Гасилова, Г.И. Джанджгавы, С.П. Дмитриева, В.Б. Костоусова, А.А. Красовского, О.А. Степанова, В.П. Тарасенко, Г.П. Чигина и др.

Использование поля радиолокационного контраста (РЛК) естественных и искусственных земных покровов для целей высокоточной навигации обусловлено следующими факторами: потенциально высокой информативностью (в том числе на равнинных участках местности, где рельеф не информативен); технической проработанностью основных компонент измерителей; возможностью построения кадрового измерителя поля с малым временем визирования. Однако практическое внедрение корреляционно-экстремальных систем навигации по полю РЛК осложняется рядом обстоятельств. Среди них главные — нестабильность поля РЛК (зависимость от погодных, сезонных условий и т.д.) и сложность построения эталона поля, обусловленная сильной зависимостью интенсивности принятого сигнала от условий визирования и отсутствием прямых измерений поля РЛК в предполагаемых зонах коррекции.

За последние годы в развитии радиолокационной и вычислительной техники произошел качественный скачок: на порядок увеличилась разрешающая способность радиолокаторов; бортовые вычислительные системы стали более мощными, благодаря чему появилась возможность решать сложные задачи, связанные с обработкой радиолокационных изображений (РЛИ), в реальном

масштабе времени. В связи с этим у разработчиков навигационных систем появился реальный спрос на алгоритмическое обеспечение, позволяющее эффективно решать задачи, возникающие в контексте навигации по РЛИ.

Диссертация посвящена исследованию задачи навигации движущегося объекта по радиолокационным изображениям сцен точечных ориентиров. Она продолжает исследования, начатые в работах В.Л. Гасилова, Н.Н. Красовского, Ю.С. Осипова¹. Тесно связанным с тематикой диссертации вопросам моделирования и распознавания РЛИ посвящены работы С.Г. Зубковича, Г.С. Кондратенкова, Ю.А. Мельника, М. Сколника, Я.Д. Ширмана, Е.А. Штагера и др.

Цель работы заключается в создании алгоритмического и программного обеспечения для исследования задачи навигации движущегося объекта по радиолокационным изображениям точечных ориентиров на местности. Для этого разрабатываются методы моделирования радиолокационных изображений сцен на основе их трехмерных геометрических моделей, предлагаются и исследуются алгоритмы навигации по точечным ориентирам, проводится исследование информативности точечных сцен, создается моделирующий программный комплекс для всестороннего численного исследования задачи навигации движущихся объектов по радиолокационным изображениям.

Методы исследования. Используются методы вычислительной геометрии, теория построения и анализа алгоритмов, методы решения экстремальных задач, теория оценивания, методы компьютерного моделирования, современные методы проектирования и разработки программных комплексов.

Научная новизна. Полученные в диссертации результаты являются новыми. Разработан алгоритм моделирования РЛИ трехмерных сцен на основе лучевого метода в сочетании с использованием понятия радиолокационных текстур. В отличие от известных методов алгоритм позволяет учесть переотражения радиосигнала. Предложены и исследованы новые алгоритмы решения задачи навигации по точечным ориентирам и разработан подход к оценке локальной информативности точечных сцен. Созданный для апробации предложенных моделей и алгоритмов программный комплекс «РЛ-Навигация» разработан с применением технологии распределенных вычислений.

Теоретическая и практическая ценность. Полученные в диссертации результаты по моделированию РЛИ, разработке и исследованию алгоритмов навигации по точечным ориентирам, исследованию навигационных свойств точечных сцен, а также способы реализации современных принципов построения программных комплексов могут найти применение при проектировании и реализации систем навигации по РЛИ. Разработанный программный ком-

¹Гасилов В.Л., Красовский Н.Н., Осипов Ю.С. *Задачи повышения точности навигации движущихся объектов.* // Тез. докл. Всесоюзной Школы по проблемам математического обеспечения и архитектуры бортовых вычислительных систем. — 1988. — Ташкент. — С. 6.

плекс был внедрен в отраслевой организации, где с его помощью производилось моделирование РЛИ и оценивание информативности сцен.

Апробация работы. Исследования, проведенные в диссертации, были поддержаны грантами РФФИ 04-07-90120 и 06-01-00229. Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и региональных конференциях: Региональные молодежные конференции «Проблемы теоретической и прикладной математики» (Екатеринбург, Кунгурка — 2003, 2004 гг.), Всероссийская конференция «Актуальные проблемы прикладной математики и механики» (Екатеринбург — 2003 г.), 10th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigational Systems (Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электроприбор» — 2003 г.), Всероссийская конференция «Высокопроизводительные вычисления и технологии» (Ижевск — 2003 г.), X International Scientific-Research Conference RLNC-2004 (Воронеж, НПФ «САКВОЕЕ» — 2004 г.), II Международная конференция «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО'2004 (Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН — 2004 г.), I Всероссийская научно-техническая конференция «Радиовысотометрия-2004» (Екатеринбург — 2004 г.); на научных семинарах отдела дифференциальных уравнений и отдела прикладных проблем управления ИММ УрО РАН, кафедры информатики и процессов управления Уральского государственного университета; на совещаниях с участием представителей РФЯЦ ВНИИТФ (г. Снежинск).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ [1–11], из них 3 статьи в рецензируемых журналах, 5 статей в сборниках трудов конференций и 2 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав основного содержания, приложения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 174 страницы машинописного текста, из них 43 страницы занимает приложение; диссертация содержит 47 рисунков, 1 таблицу и 111 ссылок на литературные источники.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели, указаны научная новизна, практическое значение и апробация проведенных исследований.

Первая глава диссертации посвящена моделированию радиолокационных изображений на основе исходной информации о сцене. Математическая модель радиолокационного изображения представлена в разделе 1.1.

Пусть в некоторой «глобальной» декартовой системе координат задан радиолокатор: его положение задано радиус-вектором l , ориентация — единич-

ными векторами d^f (направление обзора) и d^u (направление верха), мгновенная скорость — вектором v . Обозначим через d^v единичный вектор, коллинеарный v . Пусть визируемая сцена задана в виде некоторой поверхности.

С радиолокатором связывается локальная сферическая система координат такая, что положение локатора определяет начало координат этой системы, а каждая точка пространства характеризуется расстоянием до радиолокатора ($r \in [0, \infty)$), и двумя углами: азимут ($\varphi \in [-\pi, \pi]$) — это угол между вектором d^f и проекцией радиус-вектора, соответствующего данной точке, на плоскость, перпендикулярную вектору d^u ; угол места ($\vartheta \in [0, \pi]$) — это угол между вектором d^u и радиус-вектором, соответствующим данной точке.

Радиолокационные отражательные свойства сцены задаются в виде функции $T(r, \varphi, \vartheta)$, называемой *радиолокационной текстурой* сцены, следующим образом. Если луч, выходящий из начала координат новой сферической системы в направлении, заданном углами (φ, ϑ) , пересекает поверхность сцены и ближайшая к началу координат точка пересечения находится от него на расстоянии r , тогда значение $T(r, \varphi, \vartheta)$ полагается равным коэффициенту отражения в этой точке поверхности сцены; для всех остальных точек указанного луча полагается $T(r, \varphi, \vartheta) = 0$. Если данный луч не пересекает поверхность сцены, то для всех точек этого луча также полагается $T(r, \varphi, \vartheta) = 0$. Коэффициент отражения в точке поверхности сцены показывает, какая доля сигнала, пришедшего от радиолокатора, переизлучается в обратном направлении в данной точке. Введенное таким образом понятие радиолокационной текстуры играет ту же роль, что и понятие удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР)², которое также применяется для описания отражательных свойств поверхностей в теоретических работах по радиолокации.

Результатом моделирования РЛИ является дальностно-азимутальный портрет $I(r, \varphi)$ — функция мощности отраженного сценой радиосигнала в зависимости от дальности и азимута, с которых он принимается. То есть для заданных r и φ функция $I(r, \varphi)$ показывает мощность отраженной радиоволны, пришедшей с направления, соответствующего азимуту φ , с расстояния r . Сечение дальностно-азимутального портрета при фиксированном азимуте называется дальностным портретом, соответствующим этому азимуту.

Рассматриваются два метода формирования радиолокационного изображения для двух различных типов радиолокаторов: для сканирующих радиолокаторов (то есть локаторов, работающих в режиме реальной апертуры³) и для радиолокаторов, работающих в режиме синтезированной апертуры³. В основе обоих методов формирования РЛИ лежит *уравнение дальности ра-*

²Мельник Ю.А., Зубкович С.Г., Степаненко В.Д. и др. *Радиолокационные методы исследования Земли*. — М.: Сов. Радио, 1980.

³Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. *Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов*. — М.: «Радиотехника», 2005.

диолокации⁴, которое устанавливает зависимость мощности отраженного сигнала на входе радиолокатора от его параметров, дальности до облучаемого объекта и его отражательных характеристик.

Формирование РЛИ в режиме реальной апертуры происходит за счет сканирования в азимутальной плоскости. При сканировании ось диаграммы направленности антенны радиолокатора поворачивается, занимая последовательно положения, соответствующие различным азимутам на РЛИ; таким образом, каждый дальностный портрет обрабатывается независимо. Формирование дальностно-азимутального портрета (I_s) в этом случае описывается следующей формулой:

$$I_s(r, \varphi) = \int_0^\pi \frac{Q (T * G^2) (r, \varphi, \vartheta)}{(4\pi r^2)^2} d\vartheta, \quad (1)$$

где $Q = \frac{P_{rad}\lambda^2}{4\pi}$, P_{rad} — мощность излучения радиолокатора, λ — длина волны. Под интегралом стоит свертка радиолокационной текстуры с квадратом диаграммы направленности антенны⁴ G :

$$(T * G^2) (r, \varphi, \vartheta) = \int_{-\pi}^{\pi} T(r, \phi, \vartheta) G^2(\varphi - \phi, \vartheta) d\phi.$$

Интегрирование по переменным ϕ и ϑ означает, что при каждом положении оси диаграммы направленности антенны в процессе сканирования радиолокатор принимает и суммирует сигналы, приходящие со всех направлений.

В случае радиолокатора, работающего в режиме синтезированной апертуры, формирование изображения происходит при неподвижном угловом положении диаграммы направленности антенны и основано на использовании эффекта Доплера. Развертка изображения по азимуту обеспечивается за счет зависимости величины доплеровского смещения частоты отраженного сигнала от угла между вектором скорости радиолокатора и направлением, с которого принимается сигнал. Поэтому в данном случае формирование РЛИ происходит в два этапа. Сначала формируется дальностно-частотный портрет — аналог дальностно-азимутального портрета, где вместо азимута первым аргументом функции выступает величина доплеровского смещения частоты. Затем полученный дальностно-частотный портрет преобразуется в дальностно-азимутальный портрет.

Более подробное описание модели РЛИ в случае режима синтезированной апертуры состоит в следующем. Вводится новая система координат, связанная с радиолокатором, в которой каждая точка пространства характеризуется тройкой (r, β, f_d) : r — это по-прежнему расстояние от точки до радиолокатора ($r \in [0, \infty)$); f_d — это величина доплеровского смещения частоты

⁴Сколник М. *Введение в технику радиолокационных систем*. — М.: «Мир», 1965.

отраженного радиосигнала, который радиолокатор принимает с направления на данную точку; β — это угол между вектором d_{\perp}^v и проекцией радиус-вектора, соответствующего данной точке, на плоскость, перпендикулярную вектору d^v ($\beta \in [-\pi, \pi]$). Вектор d_{\perp}^v — произвольно выбранный вектор, принадлежащий плоскости, перпендикулярной вектору d^v . Величина доплеровского смещения частоты определяется по формуле:

$$f_d = \frac{2|v|}{\lambda} \cos \alpha, \quad (2)$$

где α — это угол между вектором d^v и радиус-вектором, соответствующим данной точке ($\alpha \in [0, \pi]$); $|v|$ — это модуль вектора скорости радиолокатора.

Тройка (r, β, α) задает сферическую систему координат, переход к которой от исходной системы (r, φ, ϑ) осуществляется поворотом. Кроме того, формула (2) задает взаимно-однозначное соответствие между доплеровским смещением частоты f_d и углом α на всей области его возможных значений ($\alpha \in [0, \pi]$). Таким образом, имеется взаимно-однозначное соответствие между тройками координат (r, φ, ϑ) и (r, β, f_d) , соответствующими одной и той же точке пространства.

Формирование дальностно-частотного портрета $J(r, f_d)$ описывается следующей формулой:

$$J(r, f_d) = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{QT(r, \beta, f_d)G^2(\beta, f_d)}{(4\pi r^2)^2} d\beta; \quad (3)$$

здесь в функциях $T(\cdot)$ и $G(\cdot)$ была произведена замена переменных. Преобразование дальностно-частотного портрета J в дальностно-азимутальный портрет I_d имеет вид: $I_d(r, \varphi) = J(r, f_d(\varphi, \frac{\pi}{2}))$, поскольку азимутальной плоскости, в которой формируется РЛИ, соответствует значение угла места $\vartheta = \frac{\pi}{2}$.

Описанные математические модели РЛИ отражают только «амплитудный» аспект процесса распространения радиосигнала, поскольку смысл интегрирования в формулах (1) и (3) заключается в суммировании *мощностей* элементарных отраженных сигналов. Для того, чтобы учесть фазы отраженных радиоволн, необходимо перейти к суммированию *полей* этих волн, то есть их векторов напряженности. Учитывая, что мощность радиоволны пропорциональна квадрату амплитуды ее вектора напряженности, для замены (1) и (3) в диссертации предлагаются следующие формулы⁵:

$$I'_s(r, \varphi) = \left| \int_0^{\pi} \int_{\varphi - \frac{\Delta\varphi}{2}}^{\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}} \int_{r - \frac{\Delta r}{2}}^{r + \frac{\Delta r}{2}} \frac{\sqrt{Q(T * G^2)(\rho, \phi, \vartheta)}}{4\pi r^2} \exp \left\{ j \frac{4\pi \rho}{\lambda} \right\} d\rho d\phi d\vartheta \right|^2, \quad (4)$$

⁵Формулы (4) и (5) получены в условиях отсутствия фазовых сдвигов при отражениях радиоволн.

$$J'(r, f_d) = \left| \int_{-\pi}^{\pi} \int_{f_d - \frac{\Delta f_d}{2}}^{f_d + \frac{\Delta f_d}{2}} \int_{r - \frac{\Delta r}{2}}^{r + \frac{\Delta r}{2}} \frac{\sqrt{QT(\rho, \beta, \delta)} G(\beta, \delta)}{4\pi r^2} \exp \left\{ j \frac{4\pi \rho}{\lambda} \right\} d\rho d\delta d\beta \right|^2, \quad (5)$$

где Δr — это разрешение радиолокатора по дальности, $\Delta\varphi$ — разрешение сканирующего радиолокатора по азимуту, Δf_d — разрешение радиолокатора, работающего в режиме синтезированной апертуры, по частоте, j — мнимая единица. Пары внутренних интегралов в этих формулах означают суммирование полей радиоволн, отраженных точками участка сцены, который соответствует элементу разрешения радиолокатора.

Шумы приемника моделируются при помощи аддитивного гауссового шума — случайной величины N , имеющей нулевое среднее и некоторую дисперсию σ_N ; N добавляется к $I_s(r, \varphi)$ (или к $I'_s(r, \varphi)$) в случае сканирующего радиолокатора и к $J(r, f_d)$ (или к $J'(r, f_d)$) в случае радиолокатора, работающего в режиме синтезированной апертуры.

Использование трехмерной модели сцены в качестве исходных данных для формирования РЛИ является одной из основных особенностей предлагаемой модели РЛИ. В разделе 1.2 описывается применяемая иерархическая модель сцены. На верхнем уровне иерархии находится понятие *сцены*. Сцена содержит в себе *объекты*. Понятие *объекта* является ключевым — это контейнер, который выполняет две функции: с одной стороны, он содержит геометрическую информацию о части моделируемой сцены в виде примитивов, а с другой — служит средством структурирования модели сцены. Допускается наличие объектов без геометрических примитивов, которые содержат только дочерние объекты.

Вся информация о геометрии сцены сосредоточена в геометрических примитивах. Примитивы могут быть как простыми фигурами, такими как треугольник, плоскость, сфера, параллелепипед, конус и т.п., так и более сложными образованиями: например, рельеф, заданный матрицей высот, моделируется специальным примитивом. Кроме описания геометрии примитивы используются для задания отражательных свойств поверхностей моделируемых ими участков сцены.

Радиолокаторы, с помощью которых требуется построить радиолокационные изображения сцены, также включаются в сцену в виде объектов специального вида, которые не содержат геометрических примитивов и дочерних объектов. Описания радиолокаторов включают значения всех параметров моделирования РЛИ.

В разделе 1.3 описывается вычислительный алгоритм формирования РЛИ, использующий трехмерную модель сцены и радиолокационные текстуры, ко-

торый составляет основной результат первой главы. Для формирования одного дальностного портрета (в случае режима реальной апертуры) или всего дальностно-частотного портрета (в случае режима синтезированной апертуры) используется известный в компьютерной графике *метод обратной трассировки лучей*⁶. Термин «обратная трассировка» означает, что лучи трассируются в направлении, обратном направлению распространения излучения (радиоволн). Для моделирования отражательных свойств поверхностей объектов сцены используются значения УЭПР основных типов поверхностей из справочника отражательных свойств поверхностей (БД ОСП), а также диффузно-зеркальная модель отраженного излучения⁷.

Поскольку на практике время синтеза радиолокационного изображения может быть значительным, искажения РЛИ, обусловленные движением радиолокатора, становятся существенными. Для их подавления в модель РЛИ был добавлен механизм компенсации траекторных искажений.

В заключительном разделе 1.4 первой главы приводятся результаты численного моделирования радиолокационных изображений трехмерной сцены, полученные при помощи программного комплекса «РЛ-Навигация». Примеры визуального и радиолокационного изображений одной и той же сцены приведены на рис. 1 и на рис. 2 соответственно. На основе проведенных численных экспериментов по моделированию РЛИ сделан вывод о том, что основное влияние на формирование модельного РЛИ оказывают следующие параметры модели: геометрические и отражательные характеристики поверхностей объектов сцены, учет переотражений радиосигнала и компенсация траекторных искажений.

Во **второй главе** рассматривается задача навигации движущегося объекта по радиолокационным изображениям точечных ориентиров. В первых двух ее разделах обсуждается постановка задачи навигации по РЛИ в общем и по РЛИ точечных ориентиров в частности.

Пусть в горизонтальной плоскости xOz по заданной программной траектории движется объект, способный при помощи бортового радиолокатора формировать РЛИ окружающей трехмерной сцены в виде дальностно-азимутальных портретов. Пусть в некоторый момент времени, называемый моментом коррекции, объект находится в заранее известной *зоне неопределенности* Q , заданной в виде квадрата на плоскости xOz , размеры которого определяются максимально возможной неопределенностью положения движущегося объекта в этот момент (рис. 3). Кроме того, пусть известны максимальные пределы отклонения $\Delta\Phi$ направления оси визирования радиолокатора в момент коррекции от заданного программного направления. Пусть

⁶Роджерс Д. *Алгоритмические основы машинной графики*. — М.: «Мир», 1989.

⁷Форсайт Д., Понс Ж. *Компьютерное зрение. Современный подход*. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.



Рис. 1: Трехмерная модель сцены

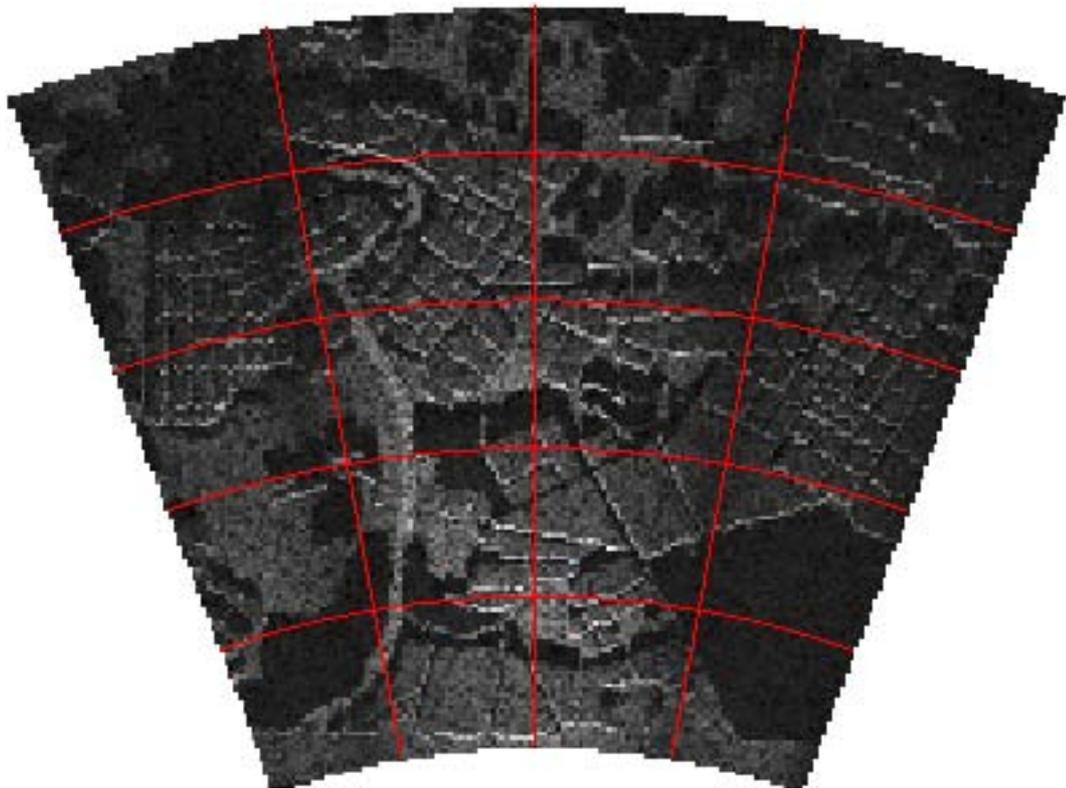


Рис. 2: РЛИ в режиме синтезированной апертуры без учета переотражений

начало системы координат xOz совпадает с программным положением радиолокатора в момент коррекции, а ось x совпадает с программным направле-

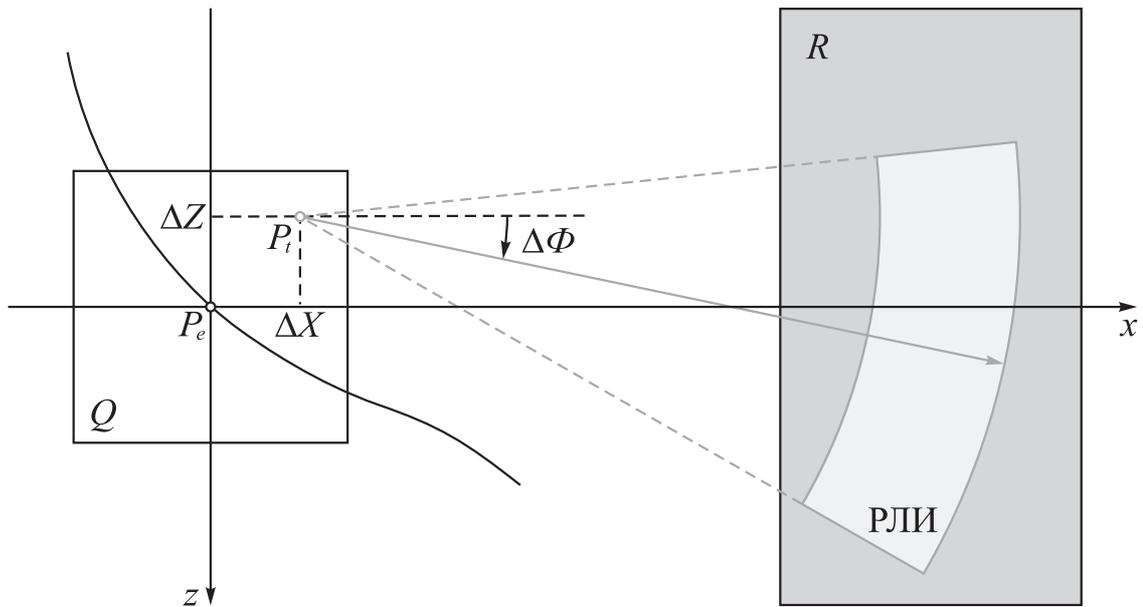


Рис. 3: Постановка задачи навигации по РЛИ

нием его оси визирования в этот момент. Моменту коррекции соответствует точка P_e (рис. 3) программной траектории, которая является центром зоны неопределенности Q . Точка P_t — это истинное положение движущегося объекта в момент коррекции. Отклонение по координатам x и z истинного положения радиолокатора от программного обозначается через $(\Delta X, \Delta Z)$, а через $\Delta\Phi$ обозначается угловое отклонение направления оси визирования радиолокатора от ее программного положения.

Для коррекции навигационных параметров назначается *район ориентирования* R на плоскости xOz — это заранее выбранный участок местности, который заведомо будет содержать фрагмент сцены, засвечиваемый радиолокатором при формировании РЛИ в момент коррекции. Район ориентирования выбирается таким образом, чтобы на нем присутствовали в достаточном количестве радиолокационные ориентиры — устойчивые контрастные радиолокационные цели. Требуется на основе сопоставления заранее подготовленного эталона района ориентирования и полученного радиолокационного изображения его фрагмента найти параметры $(\Delta X, \Delta Z, \Delta\Phi)$. Эта задача называется *задачей навигации по РЛИ*. Сформулированная задача относится к классу задач навигации по геофизическим полям⁸ и является развитием постановок, изучавшихся в Институте математики и механики УрО РАН^{9,10}.

Для использования методов навигации по структурированным геофизи-

⁸Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. *Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем*. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.

⁹Бердышев В.И. *Полиномиальная аппроксимация, связанная с навигацией по геофизическим полям*. // Доклады Академии наук. Сер. Математика. — 1992. — Т. 325, № 6. — С. 1099–1102.

¹⁰Гасилов В.Л., Костоусов В.Б. *Задача идентификации параметров движения объекта на основе обработки изображения внешнего информационного поля*. // Изв. РАН, сер. Техническая Кибернетика. — 1994. — № 3. — С. 78–86.

ческим полям, к которым относятся сцены точечных ориентиров, необходим этап предварительной обработки текущих изображений, заключающийся в выделении на них структурных элементов наблюдаемого поля. В рассматриваемом случае сцен точечных ориентиров данный этап заключается в преобразовании РЛИ в виде дальностно-азимутального портрета в *точечное изображение*, то есть изображение, которое задано набором пар координат выделенных на РЛИ точечных особенностей. На последующих этапах алгоритмы решения соответствующих задач оперируют именно точечными эталонным (ЭИ) и текущим (ТИ) изображениями. В разделе 2.3 предложен и исследован алгоритм выделения точечных особенностей на РЛИ, который является модификацией порогового алгоритма обработки изображений¹¹; произведена оценка его вычислительной сложности.

Для решения задачи навигации по точечным ориентирам предлагается разбить задачу навигации на две подзадачи. Сначала решается задача «грубого поиска» путем сопоставления текущего точечного изображения с эталоном, то есть путем поиска соответственных точек ТИ и ЭИ. Для этого в разделе 2.4 предложен и исследован алгоритм сопоставления точечных изображений, который строит соответствие между их точками, стараясь максимизировать количество соответственных точек, минимизировав при этом сумму расстояний между ними; получены оценки его вычислительной сложности; сформулированы достаточные условия, при которых предложенный алгоритм находит глобально оптимальное решение.

Затем решается задача «локального поиска», когда на основе соответствия между точками ТИ и ЭИ, полученного на предыдущем шаге, вычисляется искомый вектор $(\Delta X, \Delta Z, \Delta \Phi)$ навигационных параметров движущегося объекта. Решению этой задачи посвящен раздел 2.5.

В качестве меры близости двух точечных изображений, между которыми задано соответствие, используется следующий функционал:

$$\mathcal{F} = \sum_{i=1}^m \{(x'_i - x_i)^2 + (z'_i - z_i)^2\}, \quad (6)$$

где (x'_i, z'_i) — это координаты i -й соответственной точки первого изображения, (x_i, z_i) — координаты i -й соответственной точки второго изображения, а m — это количество пар соответственных точек. Формулы, описывающие преобразование системы координат точечного изображения, обусловленное смещением датчика и поворотом его оси обзора, имеют вид:

$$\begin{aligned} x' &= (z - \Delta Z) \sin \Delta \Phi + (x - \Delta X) \cos \Delta \Phi, \\ z' &= (z - \Delta Z) \cos \Delta \Phi - (x - \Delta X) \sin \Delta \Phi. \end{aligned} \quad (7)$$

Задача локального поиска сводится к нахождению вектора $(\Delta X, \Delta Z, \Delta \Phi)$, на котором достигается минимум функционала (6), где в качестве коорди-

¹¹Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*. — М.: Техносфера, 2005.

нат точек первого изображения берутся преобразованные по формулам (7) координаты точек ЭИ, а в качестве координат точек второго — координаты точек ТИ. Решение поставленной задачи дает следующая теорема:

Теорема 2.1. Пусть задано истинное соответствие между точками эталонного и текущего изображений, состоящее из $m > 1$ пар соответственных точек, то есть точки из каждой пары соответствуют одному ориентиру сцены. Пусть (x_i^0, z_i^0) — это координаты i -й соответственной точки эталонного изображения (они заданы в исходной системе координат), а (x_i, z_i) — координаты i -й соответственной точки текущего изображения (они заданы в смещенной системе координат), $i = 1, \dots, m$. Пусть $\Delta\Phi \in (-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2})$ и $V \neq 0$ (определение V см. ниже). Тогда решение задачи навигации по точечным ориентирам в смысле поиска вектора $(\Delta X, \Delta Z, \Delta\Phi)$, доставляющего минимум функционала

$$\mathcal{F}(\Delta X, \Delta Z, \Delta\Phi) = \sum_{i=1}^m \left\{ [(z_i^0 - \Delta Z) \sin \Delta\Phi + (x_i^0 - \Delta X) \cos \Delta\Phi - x_i]^2 + [(z_i^0 - \Delta Z) \cos \Delta\Phi - (x_i^0 - \Delta X) \sin \Delta\Phi - z_i]^2 \right\},$$

существует, является единственным и вычисляется по формулам:

$$\Delta\Phi = \arctan \frac{U}{V}, \quad (8)$$

$$\Delta X = \bar{x}_0 - \bar{x} \cos \Delta\Phi + \bar{z} \sin \Delta\Phi, \quad (9)$$

$$\Delta Z = \bar{z}_0 - \bar{x} \sin \Delta\Phi - \bar{z} \cos \Delta\Phi, \quad (10)$$

где

$$U = \overline{z_0 x} - \bar{z}_0 \bar{x} - \overline{x_0 z} + \bar{x}_0 \bar{z}, \quad V = \overline{z_0 z} - \bar{z}_0 \bar{z} + \overline{x_0 x} - \bar{x}_0 \bar{x};$$

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i, \quad \bar{z} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_i, \quad \bar{x}_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^0, \quad \bar{z}_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_i^0,$$

$$\overline{x_0 z} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^0 z_i, \quad \overline{z_0 x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_i^0 x_i, \quad \overline{x_0 x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^0 x_i, \quad \overline{z_0 z} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_i^0 z_i.$$

Достаточные условия, при которых $V \neq 0$, получены в утверждении 2.6:

Утверждение 2.6. Обозначим через p_i^0 вектор (x_i^0, z_i^0) , через p_i — вектор (x_i, z_i) и через \bar{p}_0 — вектор (\bar{x}_0, \bar{z}_0) . Пусть существует такое вещественное число $\delta > 0$, что для всех $i = 1, \dots, m > 1$ справедливо $p_i \in O_\delta(p_i^0)$ ¹², и пусть выполнено любое из двух следующих условий. Либо $\bar{p}_0 \notin O_\delta(p_i^0)$ для всех $i = 1, \dots, m$. Либо, если $\bar{p}_0 \in O_\delta(p_{i^-}^0)$ для некоторого индекса i^- , то $O_\delta(p_i^0) \cap O_\delta(p_{i^-}^0) = \emptyset$ для всех $i \neq i^-$. Тогда существует такое вещественное число $\alpha > 0$, что $V > \alpha$.

В разделе 2.6 развивается подход к определению локальной информативности точечной сцены, основанный на оценивании ошибки навигации на этапе

¹²Символ $O_\delta(p)$ обозначает замкнутую евклидову δ -окрестность точки p , то есть для любого $q \in O_\delta(p)$ выполнено $|p - q| \leq \delta$, где $|s| = \sqrt{x^2 + z^2}$ для $s = (x, z)$.

локального поиска. Предложенный подход позволяет получить оценки ошибки навигации, линейные по отношению к ошибкам эталона и измеренного фрагмента. Такие оценки и методика их использования для непрерывного скалярного геофизического поля были впервые предложены В.Л. Гасиловым¹. Случай структурированного поля исследовался в работах В.Л. Гасилова и В.Б. Костоусова¹⁰, В.И. Бердышева и В.Б. Костоусова¹³.

Для получения оценки ошибки навигации конкретизируется модель ошибок эталонного и текущего изображений точечной сцены. Предполагается, что структурные возмущения ЭИ и ТИ отсутствуют, то есть на них не появляются новые ориентиры и не исчезают старые. Возмущения эталона и измеренного фрагмента заключаются лишь в сравнительно малом смещении ориентиров относительно некоторого «истинного» положения: $x_{i\varepsilon} = x_i + \varepsilon_{ix}$, $z_{i\varepsilon} = z_i + \varepsilon_{iz}$; $x_{i\varepsilon}^0 = x_i^0 + \varepsilon_{ix}^0$, $z_{i\varepsilon}^0 = z_i^0 + \varepsilon_{iz}^0$. Вектор ошибок $(\varepsilon_{1x}, \dots, \varepsilon_{mx}; \varepsilon_{1z}, \dots, \varepsilon_{mz}; \varepsilon_{1x}^0, \dots, \varepsilon_{mx}^0; \varepsilon_{1z}^0, \dots, \varepsilon_{mz}^0)$ обозначен через ε . Вводятся величины \bar{x}_ε , \bar{z}_ε , $\bar{x}_{0\varepsilon}$, $\bar{z}_{0\varepsilon}$, U_ε и V_ε , для вычисления которых используются выражения из формулировки теоремы 2.1, куда вместо исходных координат точек ЭИ и ТИ подставляются значения с ошибками. Решение задачи навигации, полученное с помощью формул (8)–(10) по ошибочным данным, обозначается через $(\Delta X_\varepsilon, \Delta Z_\varepsilon, \Delta \Phi_\varepsilon)$. Через $\delta_{\Delta \Phi}(\varepsilon)$, $\delta_{\Delta X}(\varepsilon)$ и $\delta_{\Delta Z}(\varepsilon)$ обозначены соответствующие компоненты линейной части разложения по формуле Тейлора разности между ошибочным и истинным решениями. Явные выражения для этих функций получены в теореме 2.2:

Теорема 2.2. Пусть V_ε (как функция ε) отделена от 0 в некоторой окрестности точки $\varepsilon = 0$. Тогда линейная часть разложения по формуле Тейлора разности между решением задачи навигации $(\Delta X_\varepsilon, \Delta Z_\varepsilon, \Delta \Phi_\varepsilon)$, полученным по ошибочным данным, и истинным решением (8)–(10) вычисляется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \delta_{\Delta \Phi}(\varepsilon) &= \frac{1}{m(U^2+V^2)} \times \\ &\times \left[\sum_{i=1}^m \{V(z_i^0 - \bar{z}_0) - U(x_i^0 - \bar{x}_0)\} \varepsilon_{ix} + \sum_{i=1}^m \{-V(x_i^0 - \bar{x}_0) - U(z_i^0 - \bar{z}_0)\} \varepsilon_{iz} + \right. \\ &\left. + \sum_{i=1}^m \{-V(z_i - \bar{z}) - U(x_i - \bar{x})\} \varepsilon_{ix}^0 + \sum_{i=1}^m \{V(x_i - \bar{x}) - U(z_i - \bar{z})\} \varepsilon_{iz}^0 \right], \quad (11) \end{aligned}$$

$$\delta_{\Delta X}(\varepsilon) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \varepsilon_{ix}^0 - \frac{\cos \Delta \Phi}{m} \sum_{i=1}^m \varepsilon_{ix} + \frac{\sin \Delta \Phi}{m} \sum_{i=1}^m \varepsilon_{iz} + S \delta_{\Delta \Phi}(\varepsilon), \quad (12)$$

$$\delta_{\Delta Z}(\varepsilon) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \varepsilon_{iz}^0 - \frac{\sin \Delta \Phi}{m} \sum_{i=1}^m \varepsilon_{ix} - \frac{\cos \Delta \Phi}{m} \sum_{i=1}^m \varepsilon_{iz} - T \delta_{\Delta \Phi}(\varepsilon), \quad (13)$$

где $S = \bar{x} \sin \Delta \Phi + \bar{z} \cos \Delta \Phi$, $T = \bar{x} \cos \Delta \Phi - \bar{z} \sin \Delta \Phi$.

Теорема 2.3 и ее следствие позволяют оценивать дисперсию ошибки решения задачи навигации, получаемого по формулам (8)–(10), в случае малых некоррелированных ошибок в эталонном и текущем изображениях:

¹³Бердышев В.И., Костоусов В.Б. *Навигация движущихся объектов по геофизическим полям.* // Современная математика и ее приложения. Институт кибернетики АН Грузии. — 2005. — Т. 26. — С. 15–41.

Теорема 2.3. Пусть выполнены условия теоремы 2.2. Если рассматривать все ε_{ix} , ε_{iz} , ε_{ix}^0 , ε_{iz}^0 как попарно независимые случайные величины, имеющие одинаковые дисперсии σ_ε^2 , то дисперсии линейных частей $\delta_{\Delta\Phi}$, $\delta_{\Delta X}$ и $\delta_{\Delta Z}$ ошибки навигации, заданных формулами (11)–(13), имеют вид:

$$\sigma_{\Delta\Phi}^2 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{m(U^2+V^2)} \sum_{i=1}^m \frac{(x_i^0 - \bar{x}_0)^2 + (z_i^0 - \bar{z}_0)^2 + (x_i - \bar{x})^2 + (z_i - \bar{z})^2}{m},$$

$$\sigma_{\Delta X}^2 = \frac{2\sigma_\varepsilon^2}{m} + S^2 \sigma_{\Delta\Phi}^2, \quad \sigma_{\Delta Z}^2 = \frac{2\sigma_\varepsilon^2}{m} + T^2 \sigma_{\Delta\Phi}^2.$$

Следствие 2.1. В условиях теоремы 2.3 для нулевого решения ($\Delta X = 0$, $\Delta Z = 0$, $\Delta\Phi = 0$) дисперсии компонент ошибки навигации имеют вид:

$$\sigma_{\Delta\Phi}^2 = \frac{2\sigma_\varepsilon^2}{mV_0}, \quad \sigma_{\Delta X}^2 = \frac{2\sigma_\varepsilon^2}{m} \left\{ 1 + \frac{\bar{z}_0^2}{V_0} \right\}, \quad \sigma_{\Delta Z}^2 = \frac{2\sigma_\varepsilon^2}{m} \left\{ 1 + \frac{\bar{x}_0^2}{V_0} \right\}, \quad (14)$$

где $V_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i^0 - \bar{x}_0)^2 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (z_i^0 - \bar{z}_0)^2$.

В заключительном разделе 2.7 второй главы приводится описание и результаты проведенного численного эксперимента по моделированию решения задачи навигации движущегося объекта по РЛИ точечных ориентиров. Эксперимент показал пригодность предложенных алгоритмов для решения поставленной задачи, а также подтвердил правильность полученных оценок локальной информативности точечных сцен. В частности, в ходе проведения численного эксперимента для $m = 11$, $\sigma_\varepsilon = 1$, $\bar{x}_0 = 10000$, $\bar{z}_0 = 500$ были получены следующие результаты. СКО компонент ошибки навигации, вычисленные по формулам (14), имеют вид: $\sigma_{\Delta\Phi} = 0.15^\circ$, $\sigma_{\Delta X} = 0.4$, $\sigma_{\Delta Z} = 22$. Статистический эксперимент при 100 испытаниях привел к следующим оценкам тех же СКО: $\hat{\sigma}_{\Delta\Phi} = 0.1^\circ$, $\hat{\sigma}_{\Delta X} = 0.3$, $\hat{\sigma}_{\Delta Z} = 15$, что согласуется с теоретическими результатами.

Третья глава диссертации посвящена программному комплексу «РЛ-Навигация», который был создан для исследования задачи навигации по радиолокационным изображениям. При его разработке использовались современные технологии и средства создания программного обеспечения. В частности, широко применялись принципы объектно-ориентированного программирования¹⁴, использовались паттерны проектирования¹⁵ и технологии параллельных/распределенных вычислений.

В разделе 3.1 описывается архитектура программного комплекса. Исходными данными для моделирования РЛИ является электронная карта местности. Специальный конвертер позволяет преобразовать электронную карту в файл описания соответствующей трехмерной сцены (или просто *файл сцены*).

¹⁴Буч Г. *Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++*. — СПб.: «Невский Диалект», 1998.

¹⁵Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влссидес Дж. *Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования*. — СПб.: Питер, 2001.

Полученный файл сцены можно загрузить в OpenGL-просмотрщик, который обеспечивает визуализацию трехмерных сцен. В частности, в нем реализовано перемещение наблюдателя и управление источниками освещения.

Также файл сцены можно загрузить в приложение «RL-console», которое позволяет моделировать радиолокационные изображения построенной сцены и производить на ней статистические эксперименты по навигации движущихся объектов с использованием РЛИ. При формировании РЛИ для инициализации радиолокационных текстур, отвечающих за моделирование отражательных характеристик объектов сцены, программный модуль «RL-console» обращается к справочнику отражательных свойств поверхностей (БД ОСП).

В ходе проведения статистического эксперимента по навигации движущегося объекта с использованием РЛИ блок, реализующий собственно логику навигационного эксперимента, обращается к моделирующему РЛИ СОМ-объекту для формирования текущих изображений; а также, в зависимости от типа эксперимента, он обращается либо к блокам выделения точечных особенностей, сопоставления точечных изображений и решения навигационной задачи по точечным ориентирам в случае использования для навигации точечных особенностей на РЛИ, либо к блокам выделения границ и решения навигационной задачи по линейным ориентирам в случае использования для навигации ярко выраженных границ на РЛИ.

Важным свойством разработанной моделирующей системы «RL-console» является возможность использования распределенных вычислений в сети машин под управлением операционных систем семейства Windows 2000/XP/2003, которая была реализована при помощи технологии DCOM¹⁶. В результате, выделенное управляющее приложение позволяет организовать моделирование РЛИ сразу на нескольких подчиненных машинах одновременно. Данная возможность оказывается особенно полезной при проведении статистических навигационных экспериментов, когда требуется формировать текущее изображение сцены для нескольких положений радиолокатора в зоне неопределенности. Поскольку этап формирования текущего РЛИ является самым трудоемким при моделировании процесса решения задачи навигации, распараллеливание счета именно на этом участке позволяет существенным образом (в разы) ускорить проведение навигационных экспериментов. Вопросы организации распределенных вычислений рассматриваются в разделе 3.2.

В качестве внешнего формата представления информации о сцене был выбран XML¹⁷ — текстовый язык разметки, идеально приспособленный для описания структурированной в виде дерева информации. Для определения фор-

¹⁶Бокс Д. *Сущность технологии СОМ. Библиотека программиста.* — СПб.: Питер, 2001.

¹⁷*Extensible Markup Language (XML).* — <http://www.w3.org/xml>.

мата XML-представления трехмерных сцен (то есть формата файлов сцен) использовались XML-схемы¹⁸; его описание приводится в разделе 3.3.

В разделе 3.4 описывается структура и наполнение разработанной базы данных отражательных свойств поверхностей, в которой хранятся исходные данные для моделирования при помощи радиолокационных текстур процесса отражения радиосигнала от поверхностей объектов сцены.

В **приложении** содержится подробное описание реализации основных компонентов программного комплекса «РЛ-Навигация», связанных с моделированием РЛИ. При описании классов и отношений между ними используются принятые в языке UML (Unified Modeling Language)¹⁹ средства статического представления моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена исследованию задачи навигации движущегося объекта по радиолокационным изображениям сцен точечных ориентиров. Ниже перечислены основные результаты, полученные в работе:

- Предложен развитый механизм геометрического моделирования трехмерных сцен, который позволяет строить сцены с произвольной степенью подробности. Разработан основанный на XML формат внешнего представления моделей сцен.
- На основе лучевого метода разработан вычислительный алгоритм формирования радиолокационных изображений трехмерных сцен, использующий для моделирования отражательных свойств поверхностей объектов сцены понятие радиолокационных текстур. Разработана структура базы данных отражательных свойств поверхностей и осуществлено ее наполнение данными из справочника.
- Предложены и исследованы алгоритмы выделения точечных особенностей на РЛИ и сопоставления точечных изображений. Решена задача навигации по точечным ориентирам, получены оценки локальной информативности точечных сцен.
- Создан моделирующий программный комплекс «РЛ-Навигация»: спроектирована его архитектура и реализованы основные компоненты, включая механизм организации распределенных вычислений. Программный комплекс позволяет формировать радиолокационные изображения трехмерных сцен, а также производить статистические эксперименты по навигации движущихся объектов с использованием этих РЛИ.

Данные результаты составляют основу личного вклада диссертанта в работы, выполненные в соавторстве.

¹⁸ XML Schema. — <http://www.w3.org/xml/schema.html>.

¹⁹ UMLTM Resource Page. — <http://www.uml.org>.

*Публикации по теме диссертации

- [1] Костоусов В.Б., Костоусов А.В., Онучин И.Г. *Моделирование процесса наведения движущихся объектов по радиолокационным изображениям.* // Гироскопия и навигация. — 2004. — № 2 (45). — С. 37–47.
- [2] Kostousov A.V., Kostousov V.B. *High Precision Navigation of Moving Vehicles by Means of Radar Images.* // Dynamical Systems and Control Problems: proc. Steklov Inst. Math. — 2005. — Suppl. 1. — С. S152–S162. — (Тр. ИММ УрО РАН; т. 11, № 1).
- [3] Костоусов А.В. *Математическая модель радиолокационного изображения.* // Вестник Уральского государственного технического университета — УПИ. Серия радиотехническая. Теория и практика радиолокации земной поверхности. — 2005. — № 19 (71). — С. 75–83.
- [4] Костоусов А.В., Онучин И.Г. *Моделирование радиолокационных изображений.* // Сб. «Проблемы теоретической и прикладной математики». Труды 34-й Региональной молодежной конференции. Екатеринбург: УрО РАН. — 2003. — С. 269–273.
- [5] Костоусов В.Б., Костоусов А.В., Онучин И.Г. *Моделирование системы навигации и наведения по радиолокационным изображениям.* // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и механики». Екатеринбург: УрО РАН. — 2003. — С. 46–47.
- [6] Kostousov V.B., Kostousov A.V., Onuchin I.G. *Simulation of moving objects guidance by radar images.* // Materials of the 10th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigational Systems. CSRI "Electropribor". — 2003. — С. 121–127.
- [7] Костоусов В.Б., Костоусов А.В., Онучин И.Г. *Применение распределенных вычислений в задаче моделирования радиолокационных изображений.* // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Высокопроизводительные вычисления и технологии» ВВТ-2003. Ижевск. — 2003. — С. 89–94.
- [8] Костоусов А.В., Костоусов В.Б. *Восстановление параметров движения датчика точечных изображений.* // Сб. «Проблемы теоретической и прикладной математики». Труды 35-й Региональной молодежной конференции. Екатеринбург: УрО РАН. — 2004. — С. 279–283.
- [9] Kostousov A.V., Kostousov V.B., Bobkov I.I., Vazhenin V.G. *Surface and cover reflecting characteristics database Radiolocation Navigation Communications.* // Proceedings of X International Scientific-Research Conference RLNC-2004. V. 3. Voronezh. NPF "SAKVOEE". — 2004. — С. 142–148.
- [10] Костоусов В.Б., Костоусов А.В. *Применение параллельных вычислений в задаче восстановления движения по точечным изображениям.* // Труды II Международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО'2004. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. — 2004. — С. 213–220.
- [11] Костоусов В.Б., Костоусов А.В., Нестеров М.Ю. *Алгоритм коррекции траектории движущегося объекта по радиолокационным изображениям точечных ориентиров.* // Труды I Всероссийской НТК «Радиовысотометрия-2004». Екатеринбург: Изд.-во АМБ. — 2004. — С. 80–85.