

На правах рукописи

ПРЕСНЯКОВ Олег Александрович

**СИСТЕМА СТРУКТУРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ
И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ОТ ВИДЕОДАТЧИКОВ СКАНОВОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2007

Работа выполнена
в Рязанском государственном радиотехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Еремеев Виктор Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кириллов Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент
Светников Олег Григорьевич

Ведущая организация: **Центральный НИИ Машиностроения
г. Королев Московской области**

Защита состоится **21 ноября 2007 года в 12 час.** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу:

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан 5 октября 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.01
к.т.н., доцент

Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) находят эффективное применение во многих отраслях народного хозяйства: гидрометеорологии, контроле окружающей среды, геологии, сельском и лесном хозяйствах, военной разведке и др. Однако в исходном виде изображения, формируемые с помощью различных систем ДЗЗ, не могут быть использованы по назначению, поскольку имеют значительные геометрические искажения по отношению к объектам наблюдаемой сцены. Первоочередной задачей при наземной обработке видеоданных является их геометрическая коррекция с целью получения изображений, по которым становится возможным с высокой точностью измерять геометрические характеристики объектов земной поверхности – геодезические координаты, длины, углы, площади и др.

Основными характеристиками систем ДЗЗ являются их разрешающая способность и полоса обзора. Традиционно улучшение этих характеристик осуществлялось путем разработки видеодатчиков с повышенным числом фотоприемных элементов. Такие датчики, как правило, конструировались на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-линеек) с максимально возможным числом светочувствительных элементов. Это очень длительный и трудоемкий технологический путь, следуя по которому нельзя удовлетворить растущие требования потребителей к разрешающей способности и полосе обзора съемки. Поэтому в последние годы в практику дистанционного зондирования стали активно внедряться видеодатчики сканового типа (системы ДЗЗ «Аркон», «Terra», «LandSat», «Монитор-Э», «Ресурс-ДК» и др.). Такие датчики строятся с использованием двух подходов.

При *первом подходе* в фокальной плоскости датчика в поперечном направлении относительно траектории полета спутника устанавливаются несколько ПЗС-линеек с небольшим перекрытием полей обзора. В результате периодического опроса в процессе движения спутника каждая ПЗС-линейка формирует изображение в виде так называемого скана. Соседние сканы имеют различные смещения в кадровом (вдоль полета спутника) и небольшое перекрытие в строчном направлениях (вдоль направления размещения ПЗС-линеек). В данном случае достигается многократное повышение эффективной полосы обзора датчика.

При *втором подходе* изображение формируется ПЗС-линейкой, установленной вдоль направления полета спутника, путем периодического перемещения сканирующих лучей фотоприемников в поперечном направлении, обычно это осуществляется с помощью вращающегося или качающегося зеркала. В данном случае изображение состоит из горизонтальных перекрывающихся полос (сканов).

Характерной особенностью скановых изображений, формируемых в процессе полета спутника, является изменение по сложным законам перекрытия сканов, которое зависит от многих факторов: параметров орбиты и углов ориентации спутника; режимов работы сканера (маневры спутника и программное отклонение поля зрения датчика); рельефа местности и др. Действие этих факторов приводит к нарушению структуры изображения в виде геометрических разрывов объектов наблюдаемой сцены вдоль линии соприкосновения сканов.

В связи с этим остро стоит проблема получения из отдельных перекрывающихся сканов единого непрерывного изображения в заданной картографической проекции. Решению этой задачи посвящена настоящая диссертационная работа.

Степень разработанности темы. Вопросы геометрической коррекции структурно непрерывных (не скановых) изображений достаточно широко освещены в трудах Арманда Н.А., Асмуса В.В., Журкина И.Г., Злобина В.К., Лукьященко В.И., Лупяна Е.А., Полищука Г.М., Чернявского Г.М., Kronberg P., Pratt W., Rosenfeld A. и других отечественных и зарубежных ученых. Работы этих авторов составляют научно-методическую основу для решения задач, поставленных в диссертации.

Впервые попытка сформулировать и решить задачу геометрической коррекции скановых изображений сделана разработчиками аппаратуры ЕТМ, установленной на космической системе «LandSat» (США). В печати имеются сообщения, что наземными центрами осуществляется геометрическая обработка изображений от этого датчика. Однако алгоритмы и технология решения этой задачи не представлены ни в технической документации, ни в публикациях.

В нашей стране датчик сканового типа, включающий 64 ПЗС-линейки с перекрывающимися полями обзора, впервые реализован в рамках системы ДЗЗ «Аркон». Технология, разработанная для обработки изображений от этого датчика, предполагает участие оператора при совмещении изображений отдельных сканов, и поэтому характеризуется низкими производительностью и уровнем автоматизации.

В настоящее время в России спроектированы системы ДЗЗ «Монитор-Э», «Ресурс-ДК» и др., в которых используются датчики сканового типа, основанные на различных принципах действия. Возникла необходимость создания технологии обработки скановых изображений, не зависящей от конкретных реализаций датчиков и условий их эксплуатации. В рамках космических проектов «Океан-О», «Аркон», «Монитор-Э» и «Ресурс-ДК» Рязанским государственным радиотехническим университетом при участии автора разработаны методы и технологии обработки изображений от этих систем. В настоящей диссертации представлены результаты исследований в части решения задачи геометрической коррекции скановых изображений.

Цель диссертации состоит в разработке алгоритмов, информационных технологий и программной системы высокоскоростной прецизионной геометрической обработки скановых изображений, получаемых от датчиков различного принципа действия.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

- аналитическое описание процессов формирования скановых изображений, максимально ориентированное на последующую прецизионную коррекцию видеоданных;
- разработка математической модели, технологии и алгоритмов пространственно-временного восстановления скановых изображений от датчиков различного принципа действия;

- разработка алгоритмов и технологии получения из отдельных сканов единого непрерывного изображения в заданной картографической проекции;
- проектирование программной системы геометрической обработки скановых изображений.

Научная новизна работы предопределяется тем, что в практику ДЗЗ в последние годы стали активно внедряться принципиально новые видеодатчики сканового принципа действия. Процесс формирования скановых изображений сопровождается действием специфичных детерминированных и случайных искажающих факторов. Это потребовало адекватного аналитического описания процесса скановой съемки, проектирования алгоритмов и технологий обработки видеоданных от датчиков сканового типа.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

- математическая модель пространственно-временного восстановления скановых изображений, основанная на аналитическом описании функционирования виртуального датчика не сканового принципа действия с той же полосой обзора;
- математическая модель геометрического соответствия элементов исходных сканов и структурно восстановленного изображения, позволяющая организовать высокоскоростную технологию геометрической коррекции видеоданных при заданной точности обработки;
- алгоритмы компенсации случайных остаточных искажений, основанные на корреляционном анализе перекрывающихся частей сканов и сопоставлении с опорными изображениями и электронными картами;
- алгоритмы и информационная технология преобразования скановых изображений в картографическую проекцию, основанные на использовании преимуществ прямого и обратного законов координатного соответствия и обеспечивающие высокие скорость и точность обработки;
- результаты анализа влияния различных искажающих факторов на точность структурного восстановления скановых изображений, на основе которых построены адекватные модели формирования скановых видеоданных.

Практическая ценность работы состоит в том, что на базе предложенных моделей, алгоритмов и технологий разработан ряд программных систем структурного восстановления и геометрической обработки скановых изображений – системы OrthoScan, PlanetaMeteo, NormScan, OrthoNormScan и др. Эти системы использованы для обработки данных от космических аппаратов «Аркон», «Терра», «Монитор-Э» и «Ресурс-ДК».

Реализация и внедрение. Диссертационная работа выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках гранта Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-08004), НИР № 2-03Г, НИР № 13-03Г, ОКР 4-00, ОКР № 20-03. Результаты диссертационной работы в виде математического и программного обеспечения внедрены в ФГУП «НИИ точных приборов» и Научно-исследовательском Центре космической гидрометеорологии «Планета», что подтверждается актами.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 7 международных и 8 всероссийских научных конференциях: международных конференциях «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань-2000, 2003 – 2 доклада, 2007 – 3 доклада); международных конференциях «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань-1999, 2001 – 2 доклада, 2002 – 2 доклада, 2005); всероссийских конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань-1999, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2007); всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва-2003).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 26 работ: 4 статьи, 20 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях, разделы в двух отчетах по НИР, прошедших госрегистрацию.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст работы содержит 126 стр., 43 рисунка и 8 таблиц. Список литературы на 13 стр. включает 121 наименование. В приложении на 2 стр. приведены акты внедрения результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ проблемы структурного восстановления и геометрической обработки скановых изображений от различных типов датчиков. Определены направления исследований по созданию эффективных технологий обработки скановой видеоинформации.

В результате изучения находящихся в эксплуатации и проектируемых датчиков сканового типа выполнена их систематизация. Выделены два типа датчиков. Датчики первого типа содержат в фокальной плоскости набор ПЗС-линеек с перекрытием полей обзора. В результате формируется изображение из набора перекрывающихся по сложным законам полос (рис. 1).



Рис. 1. Фрагмент изображения от сканового датчика первого типа

Датчики второго типа формируют изображение одной ПЗС-линейкой путем периодического перемещения сканирующего поля в поперечном направлении относительно движения спутника. В этом случае изображение состоит из горизонтальных перекрывающихся полос. Для этих типов датчиков получены формальные описания процесса формирования скановых изображений.

Проведен анализ возможных вариантов обработки скановых изображений. Обоснована целесообразность использования двух технологий. Первая состоит из этапов совмещения сканов и коррекции объединенного изображения, она наиболее эффективна при большом числе сканов и значительных остаточных структурных искажениях. Вторая технология включает этапы геометрической коррекции сканов и их совмещения, и обеспечивает более высокие радиометрическое качество и скорость обработки при малом числе сканов и незначительных остаточных межскановых искажениях.

Выполнен анализ двух вариантов решения задачи геометрической обработки скановых изображений. В первом варианте обработка осуществляется с использованием прямых функций координатного соответствия:

$$x = F_{xi}(m_i, n_i), \quad y = F_{yi}(m_i, n_i), \quad i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

где F_{xi} , F_{yi} – функции, описывающие координатное соответствие точек i -го скана (m_i, n_i) и одноименных точек (x, y) результирующего изображения. В этом случае обработка осуществляется по схеме

$$B_i(m_i, n_i) \xRightarrow{L_k} B_{ki}(x, y) \xRightarrow{L_b} B_{bi}(x, y) \xRightarrow{L_d} D(x, y), \quad (2)$$

где L_k , L_b , L_d – соответственно операторы геометрического трансформирования видеоданных, восстановления непрерывного изображения и дискретизации. Выявлен недостаток этого варианта, связанный с вычислительной сложностью реализации оператора L_b , что не позволяет организовать высокоскоростную обработку.

Во втором варианте обработка осуществляется с использованием обратных функций координатного соответствия:

$$m_i = f_{mi}(x, y), \quad n_i = f_{ni}(x, y), \quad i = \overline{1, I}, \quad (3)$$

по схеме

$$B_i(m_i, n_i) \xRightarrow{L_b^{-1}} B_{bi}^*(m_i, n_i) \xRightarrow{L_d^{-1}} B_{ki}^*(m_i, n_i) \xRightarrow{L_k^{-1}} D(x, y), \quad (4)$$

где L_b^{-1} , L_d^{-1} , L_k^{-1} – операторы, выполняющие те же функции, что и L_b , L_d , L_k , но с использованием обратных функций преобразования. Но и этот вариант оказался неэффективным для обработки скановых видеоданных, поскольку требует формирования для каждого скана интерполяционной решетки.

Близок к обработке по обратному закону алгоритм трансформирования, использующийся для обработки данных зарубежного спутника «LandSat». По-

пытка применить его для обработки данных с российского спутника «Монитор-Э» оказалась неудачной, так как этот алгоритм обладает крайне низким быстродействием в случае значительных межскановых смещений.

Недостатки рассмотренных вариантов определили необходимость разработки новых подходов, обеспечивающих более высокую точность и скорость обработки скановых изображений.

По результатам выполненного анализа определены три направления научных исследований, которые составляют основу диссертационной работы.

Первое направление связано с разработкой новых моделей формирования и структурного восстановления скановых изображений. Задачи этого направления нацелены на адекватное аналитическое описание основных искажающих факторов и процесса их устранения.

Второе направление связано с разработкой алгоритмов и технологий уточнения параметров, определяющих систематические и случайные структурные искажения, с целью их последующей прецизионной коррекции.

Третье направление исследований направлено на повышение технических характеристик системы обработки скановых изображений, прежде всего, скорости, точности и обеспечение инвариантности ее структуры по отношению к различным конструкциям скановых датчиков.

Во второй главе выполнена разработка математических моделей формирования и структурного восстановления скановых изображений.

Представлено аналитическое описание характерных структурных искажений, определяющих сложный характер взаимных перекрытий сканов: влияния вращения Земли, рельефа местности и изменения углов ориентации космического аппарата. Модели этих искажений позволили адекватно описать процесс формирования скановых изображений и их коррекции.

Разработана модель формирования изображения виртуальным датчиком не сканового принципа действия, который имеет те же параметры съемки земной поверхности. Эта модель является принципиально новой. Существовавшие ранее модели предполагали выбор базового изображения и присоединение к нему остальных, что при большом числе объединяемых изображений приводит к накоплению ошибки. Для двух рассмотренных выше типов датчиков сканового принципа действия получено единое математическое описание процесса формирования структурно восстановленного изображения в виде следующей схемы координатных преобразований:

$$\mathbf{u}_\phi \xrightarrow{\mathbf{F}_o} \mathbf{u}_o \xrightarrow{\mathbf{F}_\partial} \mathbf{u}_\partial \xrightarrow{\mathbf{F}_л} \mathbf{u} \xrightarrow{\mathbf{F}_3} \mathbf{x}, \quad (5)$$

где \mathbf{u}_ϕ , \mathbf{u}_o , \mathbf{u}_∂ , \mathbf{u} – векторы сканирующего луча соответственно в системах координат фокальной плоскости, объектива, датчика и Гринвичской вращающейся системе; \mathbf{x} – координаты точки пересечения сканирующего луча с поверхностью Земли. Получены развернутые аналитические соотношения для функций координатных преобразований \mathbf{F}_o , \mathbf{F}_∂ , $\mathbf{F}_л$, \mathbf{F}_3 .

Разработаны математические модели процесса структурного восстановления скановых изображений. Эти модели основаны на определении функций координатного соответствия между точками структурно восстановленного изображения и точками исходных сканов по схеме:

$$(m, n) \xrightarrow{F_\varphi, F_\lambda} (\varphi, \lambda) \xrightarrow{F_x, F_y} (x, y) \xrightarrow{G_{mi}, G_{ni}} (m_i, n_i), \quad i = \overline{1, I}, \quad (6)$$


где (m, n) , (φ, λ) , (x, y) , (m_i, n_i) – координаты одноименных точек соответственно на структурно восстановленном изображении, в геодезической системе координат, в картографической проекции и в системе координат i -го скана; F_φ, F_λ – функции, описывающие последовательность координатных преобразований (5); F_x, F_y – функции преобразования координат из геодезической системы в картографическую, в которой снимок имеет минимальные геометрические искажения; G_{mi}, G_{ni} – функции, определяющие процесс преобразования точек из картографической системы координат в системы координат сканов.

Принципиально важным конструктивным элементом процесса структурного восстановления по схеме (6) является использование на промежуточной стадии преобразования видеоданных в косую квадратно-цилиндрическую систему координат (функции F_x, F_y). Получены соотношения для расчета параметров этой системы координат, обеспечивающие минимум геометрических искажений для каждого скана:

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{Z_N}{\sqrt{X_N^2 + Y_N^2}}\right), \quad \lambda_n = \arctg(Y_N/X_N),$$

$$X_N = Y_1 Z_2 - Z_1 Y_2, \quad Y_N = Z_1 X_2 - X_1 Z_2, \quad Z_N = X_1 Y_2 - Y_1 X_2, \quad (7)$$

где φ_n, λ_n – геодезические координаты полюса косой сферической системы, (X_1, Y_1, Z_1) и (X_2, Y_2, Z_2) – геоцентрические координаты, соответствующие середине первой и последней строк изображения. Это позволило достаточно просто организовать процесс обращения функций преобразования $(m_i, n_i) \rightarrow (x, y)$, т.е. получение функций G_{mi}, G_{ni} в схеме (6).

В целом процесс преобразования $(m, n) \rightarrow (m_i, n_i)$ по схеме (6) описывается сложными в вычислительном отношении выражениями, которые не могут быть непосредственно использованы для обработки. В связи с этим решена задача аппроксимации этих функций, что позволило при заданной точности обработки достичь многократного повышения скорости. Показано, что для датчика с несколькими ПЗС-линейками положение скана в плоскости структурно восстановленного изображения по обеим координатам с высокой точностью описывается двумерными полиномами второго порядка. Дисперсионный анализ ошибок аппроксимации показал, что такой подход обеспечивает высокую точ-

ность этого процесса, порядка 0,06 пикселя. Для датчиков с оптико-механической разверткой положение скана в плоскости структурно восстановленного изображения имеет вид «бабочки». Показано, что в данном случае адекватной моделью геометрического соответствия являются двумерные полиномы третьего порядка. Это также подтверждено результатами дисперсионного анализа, точность аппроксимации составила порядка 0,015 пикселя.

Для организации прецизионной обработки скановых изображений высокого разрешения принципиально важным вопросом является учет рельефа местности. Получены соотношения, описывающие влияние рельефа на величину перекрытия сканов. Они основаны на расчете для точек изображений геодезических широты, долготы и высоты. Разработан алгоритм переноса сканов в плоскость структурно восстановленного изображения в виде последовательности преобразований координат точек результирующего снимка (m, n) в геодезические координаты (B_0, L_0, H_0) , затем в координаты точек исходных сканов (m_i, n_i) . Последние определяются итерационным решением системы уравнений

$$m_i = m_i + \Delta m, \quad n_i = n_i + \Delta n, \quad (8)$$

$$\text{где } \Delta m = \frac{(B_0 - B) \frac{\partial L}{\partial m_i} - (L_0 - L) \frac{\partial B}{\partial m_i}}{\frac{\partial B}{\partial n_i} \frac{\partial L}{\partial m_i} - \frac{\partial B}{\partial m_i} \frac{\partial L}{\partial n_i}}, \quad \Delta n = \frac{-(B_0 - B) \frac{\partial L}{\partial m_i} + (L_0 - L) \frac{\partial B}{\partial n_i}}{\frac{\partial B}{\partial n_i} \frac{\partial L}{\partial m_i} - \frac{\partial B}{\partial m_i} \frac{\partial L}{\partial n_i}},$$

B, L – геодезические широта и долгота, рассчитанные для точки (m_i, n_i) на эллипсоиде с возвышением H_0 .

Третья глава посвящена разработке алгоритмов и технологий уточнения параметров совмещения сканов на основе корреляционного анализа областей их перекрытия и сопоставления с опорными изображениями и электронными картами.

Выполнен анализ известных методов идентификации одноименных объектов на паре космических изображений поверхности Земли. Показано, что в исходном виде они не обеспечивают необходимую точность и надежность идентификации при решении задач структурного восстановления скановых изображений. В связи с этим, применительно к скановым изображениям разработаны модификации корреляционных алгоритмов, включающие процедуры многокритериальной отбраковки ложных результатов до уровня 3% и процедуры повышения точности идентификации до 0,2 – 0,3 пикселя.

Предложена и исследована двухэтапная аналитико-регрессионная технология высокоточной оценки параметров структурного восстановления скановых изображений. На первом этапе параметры оцениваются по аналитической модели процесса формирования сканового изображения, на втором этапе осуществляется уточнение этих параметров на основе автоматической идентификации одноименных точек на совмещаемых сканах. В целом эта технология описывается следующими соотношениями:

$$m_i = F_{mi}(m, n) = (m - m_{oi}) / \cos \alpha_i + A_m(m, n) + \hat{A}_m(m, n),$$

$$n_i = F_{ni}(m, n) = n - n_{oi} + (m - m_{oi}) \sin \alpha_i + A_n(m, n) + \hat{A}_n(m, n),$$

где (m_{oi}, n_{oi}) и α_i – установочные параметры i -й ПЗС-линейки – её положение и угол поворота; $A_m(m, n)$, $A_n(m, n)$ – полиномы, описывающие систематические смещения по осям m, n ; $\hat{A}_m(m, n)$, $\hat{A}_n(m, n)$ – полиномы, определяемые на основе корреляционного поиска одноименных точек $(\hat{m}_{ik}, \hat{n}_{ik})$, (m_k, n_k) , $k = \overline{1, K}$, в перекрывающихся частях всех сканов по методу наименьших квадратов из условий:

$$\sum_{k=1}^K [\hat{m}_{ik} - F_{mi}(m_k, n_k)]^2 = \min, \quad \sum_{k=1}^K [\hat{n}_{ik} - F_{ni}(m_k, n_k)]^2 = \min.$$

Для прецизионного геометрического совмещения сканов необходимо иметь точные измерения установочных параметров ПЗС-линеек в фокальной плоскости. Однако на практике это требование часто не выполняется, к тому же в процессе эксплуатации геометрическое положение ПЗС-линеек может изменяться. Это обнаружено, например, на спутнике «Ресурс-ДК». Поэтому важной задачей является уточнение установочных параметров ПЗС-линеек на основе анализа искаженных скановых изображений.

Предложена оригинальная технология уточнения положения ПЗС-линеек на основе корреляционного анализа видеоданных из перекрывающихся частей сканов и сопоставления снимков с топографическими картами. Эта технология включает три этапа. На первом этапе осуществляется корреляционный поиск одноименных точек в перекрывающихся частях сканов. На основе найденных координат одноименных точек составляются уравнения

$$x_i^n - x_{i+1}^n = p_i, \quad y_{i+1}^n - y_i^n = s_i, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad (9)$$

где (x_i^n, y_i^n) , (x_{i+1}^n, y_{i+1}^n) – координаты соответственно левого и правого краев i -й ПЗС-линейки в фокальной плоскости; s_i , p_i – соответственно расстояние между i -й и $(i+1)$ -й ПЗС-линейками по направлению полета и их перекрытие, рассчитанные по данным корреляционного анализа.

На втором этапе на основе корреляционного совмещения сканов с некоторым опорным изображением, например, взятым из другого спектрального диапазона, определяются углы разворота α_i между i -й и $(i+1)$ -й ПЗС-линейками. С учетом малости этих углов при длине ПЗС-линейки L :

$$y_{i+1}^n - y_i^n = y_i^n - y_{i+1}^n + L\alpha_i, \quad i = \overline{1, N-1}; \quad x_i^n - x_{i+1}^n = L, \quad i = \overline{1, N}. \quad (10)$$

Выражения (9), (10) содержат $(4N-3)$ независимых уравнения относительно $4N$ искомым параметров (x_i^n, y_i^n) , (x_{i+1}^n, y_{i+1}^n) , $i = \overline{1, N}$. Приняв одну из ПЗС-линеек за базовую, составляется система из $(4N-4)$ линейных уравнений

для определения $(4N - 4)$ неизвестных.

На третьем этапе для повышения точности решения поставленной задачи привлекаются топографические карты. На основе измерений одноименных точек на сканах и карте составляются дополнительные уравнения, стабилизирующие процесс оценки установочных параметров.

Разработаны модели коррекции остаточных структурных искажений. Систематические ошибки устраняются при помощи полиномиальной модели. Порядок этой модели определяется на основе проверки ее адекватности с помощью критерия Фишера. При наличии динамических искажений, обусловленных, например, рельефом, обоснована целесообразность использования кусочно-полиномиальных моделей коррекции (триангуляционной и типа «резинная пленка»), которые обеспечивают точное совмещение в заданных точках. Триангуляционная модель основана на разбиении области определения снимка на треугольники, вершинами которых являются одноименные точки совмещаемых изображений. При этом на гранях треугольников возможны изломы объектов. В случае, когда они недопустимы, рекомендовано использовать модель типа «резинная пленка», которая обеспечивает гладкий характер преобразований изображения во всей области его определения.

В четвертой главе разработаны технологии и система обработки скановых изображений, которые обеспечивают высокую точность и скорость и нечувствительны к различным типам датчиков сканового принципа действия.

Прежде всего, решены вопросы ускорения процесса обработки на основе аппроксимации сложных в вычислительном отношении функций геометрического соответствия исходных сканов и результирующего изображения. Выполнен анализ двух вариантов решения этой задачи. При первом варианте геометрическая обработка выполняется на основе кусочно-билинейной аппроксимации этого процесса. В данном случае результирующее изображение разбивается на равновеликие прямоугольники, в пределах которых используются функции обратного билинейного соответствия. Получены необходимые соотношения для организации этого процесса.

Второй вариант основан на кусочно-линейной аппроксимации функций координатной обработки. В этом случае исходное изображение разбивается на равновеликие треугольники, в пределах которых обработка выполняется по линейному закону (рис. 2) $m = f_m(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y$, $n = f_n(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y$.

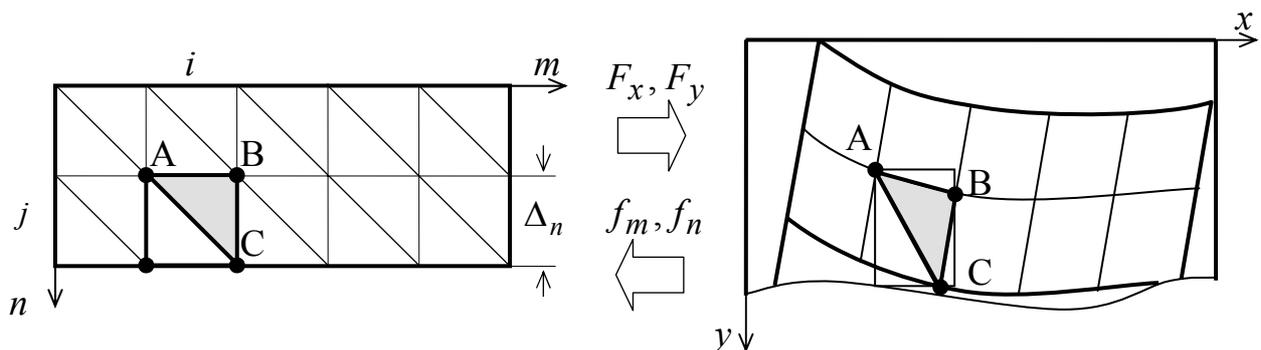


Рис.2. Кусочно-линейная аппроксимация функций координатной обработки

Коэффициенты этих преобразований определяются как

$$\mathbf{a} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{m}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{n}, \quad \text{где } \mathbf{H} = \begin{vmatrix} 1 & x_A & y_A \\ 1 & x_B & y_B \\ 1 & x_C & y_C \end{vmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{m} = \begin{vmatrix} m_A \\ m_B \\ m_C \end{vmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{vmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{n} = \begin{vmatrix} n_A \\ n_B \\ n_C \end{vmatrix}.$$

Показано, что кусочно-билинейную технологию целесообразно применять при трансформировании структурно восстановленных изображений, а кусочно-линейную – при трансформировании исходных сканов.

Решен принципиально важный вопрос высокоскоростной организации видеоинформационного обмена между различными уровнями памяти при обработке скановых изображений. Традиционно используемый подход основан на строчной организации буфера оперативной памяти, и при малом ее ресурсе не обеспечивает высокой скорости обработки. Поэтому применительно к обработке скановых видеоданных разработана тейловая организация оперативной памяти, которая мало критична к ее ресурсу.

На базе рассмотренных алгоритмов, моделей и технологий спроектирована система обработки скановых изображений (рис. 3), которая при заданной точности обеспечивает высокую скорость обработки скановых изображений и, что очень важно, не критична к различным конструкциям датчиков сканового типа.

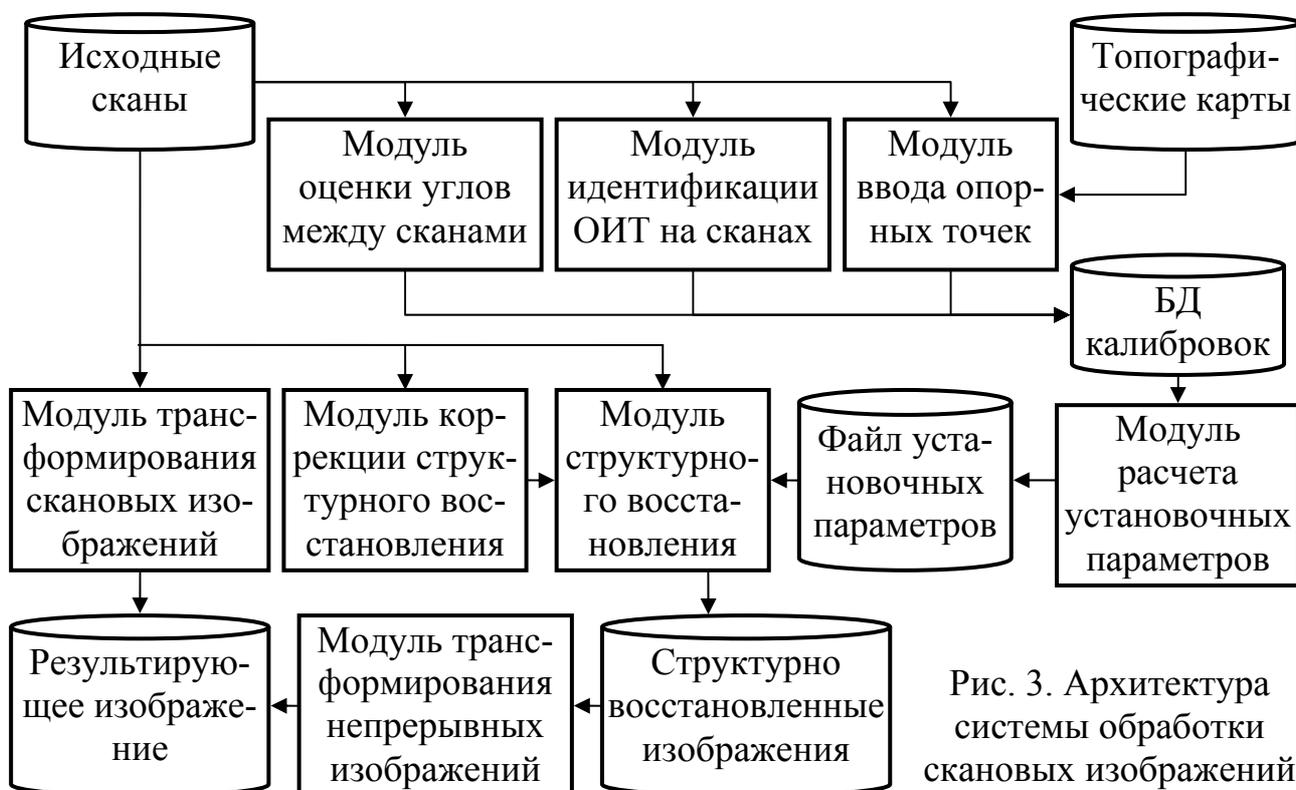


Рис. 3. Архитектура системы обработки скановых изображений

Программные модули реализованы на языках программирования Pascal и C++, в средах программирования MS Visual C++ 6.0, MS Visual Studio.NET 2003, Bordland Delphi 3 и предназначены для функционирования в рамках сис-

тем обработки данных ДЗЗ в операционных средах MS Windows 98/NT/2000/XP.

Архитектура представленной системы положена в основу создания программных комплексов OrthoScan, PlanetaMeteo, NormScan, OrthoNormScan, которые получили эффективное внедрение в космических проектах «Аркон», «Terra», «Монитор-Э», «Ресурс-ДК» и др.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Выполнена систематизация видеодатчиков сканового принципа действия. Разработаны общие геометрические модели формирования и обработки скановых изображений. Выполнен анализ этих моделей с точки зрения точности геометрического совмещения сканов. Формально описаны искажающие факторы, сопутствующие процессу формирования скановых изображений, и их влияние на точность получения обработанных изображений.

2. Выполнен анализ различных технологий структурного восстановления и геометрического трансформирования скановых изображений в картографические проекции. Определены основные направления исследований по организации эффективных технологий обработки скановых изображений, обеспечивающих высокие точность и скорость решения этой задачи. Обосновано комбинированное использование на различных этапах обработки прямого и обратного законов геометрического преобразования скановых изображений.

3. Выполнен анализ основных искажающих факторов, влияющих на процесс пространственно-временного восстановления скановых изображений. По результатам этого анализа разработана математическая модель структурного восстановления скановых изображений от датчиков различного принципа действия. Модель основана на аналитическом описании процессов формирования исходных сканов, структурно восстановленных изображений и координатного соответствия между ними. Эта модель положена в основу технологии структурного восстановления скановых изображений.

4. Разработаны алгоритмы аппроксимации функций геометрического соответствия сканов и структурно восстановленного изображения, учитывающие особенности процессов формирования и пространственно-временного восстановления скановых изображений. Эти алгоритмы положены в основу построения высокоскоростной технологии геометрической обработки данных от датчиков сканового принципа действия.

5. Разработана математическая модель структурного восстановления скановых изображений с учетом влияния рельефа местности. В ее основу положены аналитические соотношения, устанавливающие связь между координатами исходных сканов и структурно восстановленного изображения с учетом цифровой модели рельефа. Эта модель позволяет выполнить высокоточное совмещение сканов в условиях значительных перепадов высот местности в районе съемки.

6. Предложена и исследована двухэтапная аналитико-регрессионная технология высокоточной оценки параметров структурного восстановления скановых изображений. На первом этапе параметры оцениваются на основе аналитической модели процесса формирования сканового изображения, на втором этапе – выполняется автоматическая идентификация одноименных точек на совмещаемых сканах и на этой основе осуществляется уточнение модели структурного восстановления. В рамках этой технологии разработаны алгоритмы уточнения результатов идентификации с СКО 0,2 пикселя, а также процедуры отбраковки ошибочных измерений до уровня 3 %.

7. Разработана методика уточнения установочных параметров ПЗС-линеек, размещаемых в фокальной плоскости датчика сканового типа, на основе комплексного корреляционного анализа сканов, опорного изображения из другого спектрального канала и электронной карты. Методика позволяет с точностью до 0,5 пикселя оценить параметры расположения ПЗС-линеек в фокальной плоскости датчика и качественно решить задачу геометрического объединения сканов в единое непрерывное изображение.

8. Разработаны полиномиальная и кусочно-полиномиальные модели структурного восстановления скановых изображений для случаев наличия и отсутствия априорной информации о взаимном геометрическом соответствии сканов в условиях значительных случайных межскановых искажений. Определены условия адекватности этих моделей реальным искажающим факторам и выработаны рекомендации по выбору той или иной модели и ее порядка. Предложена модификация полиномиальной модели, основанная на вовлечении в регрессию краевых точек изображения, что позволило повысить точность совмещения сканов от 2 до 10 раз.

9. Разработан алгоритм и информационная технология сегментации объектов на скановых изображениях, основанная на анализе спектрально-векторизации границ объектов. Технология позволяет надежно выделять облачные образования на изображениях и исключать соответствующие им участки при идентификации опорных точек местности, что в 3-3,5 раза повысило надежность точного совмещения одноименных участков изображений.

10. Разработаны алгоритмы поэлементных геометрических преобразований скановых изображений, основанные на кусочно-билинейном и кусочно-аффинном представлениях сложных законов обработки и обеспечивающие высокую скорость обработки порядка 2-х операций сложения на 1 пиксель и точность 0,5 шага пространственной дискретизации.

11. Предложен алгоритм организации видеоинформационного обмена при координатных преобразованиях скановых изображений. Алгоритм основан на фрагментарной («тейловой») буферизации в оперативной памяти результатов геометрической обработки, что позволило организовать процесс обработки в темпе поступления видеоинформации в вычислительную систему.

12. Рассмотрены принципы построения системы структурного восстановления и геометрической обработки изображений, основу которой составляют

разработанные в диссертации математические модели, алгоритмы и технологии преобразования видеоданных от датчиков сканового принципа действия. Реализованы четыре модификации системы – OrthoScan, PlanetaMeteo, NormScan и OrthoNormScan, которые введены в опытную эксплуатацию и используются для обработки скановых изображений от космических систем ДЗЗ «Аркон», «Terra», «Монитор-Э» и «Ресурс-ДК».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Пресняков О.А. Моделирование процесса синтеза изображений от датчиков, имеющих субпиксельное смещение полей зрения. // Тез. докл. 4-й всероссийск. научно-технической конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 1999. С. 65.

2. Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Пресняков О.А. Повышение информативности изображений земной поверхности путем комплексирования разнозональной видеоинформации. // Тез. докл. 8-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» Рязань, 1999. С. 115.

3. Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Пресняков О.А. Алгоритм автоматизированного выделения объектов на многозональных спутниковых изображениях // ЭВМ и информационные технологии: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА, 2000. С. 21–26.

4. Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Новоселов В.Г., Пресняков О.А. Геометрическое совмещение разномасштабных изображений. // Тез. докл. 3-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2000. С. 271 – 272.

5. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А. Структурное восстановление информации, полученной несколькими линейками фотоприемников с перекрывающимися зонами обзора. // Тез. докл. 10-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, 2001. С. 232 – 233.

6. Пресняков О.А. Программный модуль автоматизированного аннотирования изображений. // Тез. докл. 10-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» Рязань, 2001. С. 243.

7. Еремеев В.В., Пресняков О.А. Технология получения цветных спутниковых изображений высокого разрешения. // Тез. докл. 6-й всероссийск. научно-технической конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2001. С. 111–113.

8. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А. Модели геометрического соответствия совмещаемых изображений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2002. №2. С. 119–128.

9. Пресняков О.А. Некоторые аспекты реализации геопривязки в ГИС // Тез. докл. 11-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2002. С. 161-163.

10. Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Пресняков О.А. Модели коррекции высокочастотных геометрических искажений сканерных снимков земной поверхности // Тез. докл. 7-й всероссийск. научно-технической конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2002. С. 169.

11. Пономарев А.Ю., Пресняков О.А. Коррекция высокочастотных геометрических искажений на самолетных сканерных снимках // Тез. докл. 11-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, 2002. С. 154 –156.

12. Пономарев А.Ю., Пресняков О.А. Устранение высокочастотных геометрических искажений на самолетных сканерных снимках. Рязань: РГРТА, 2003. 10 с. Деп. в ВИМИ 25.03.03, № ДО-8921.

13. Пресняков О.А. Структурное восстановление информации от датчиков сканового типа. // Тез. докл. 4-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2003. С. 313.

14. Пресняков О.А. Геометрическая обработка изображений поверхности земли от датчиков сканового типа // Тез. докл. 8-й всероссийск. научно-технической конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2003. С. 169.

15. Кареев А.В., Нефедов В.И., Пресняков О.А. Технология оперативного монтажа изображений от гидрометеорологических спутников // Тез. докл. 4-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2003. С. 310–312.

16. Пресняков О.А. Комплексование спутниковых изображений от датчиков, работающих в режиме синхронной съемки // Тез. докл. всероссийск. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2003. С. 105.

17. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Лось В.В., Пресняков О.А. Структурное восстановление изображений, формируемых многоматричными сканирующими датчиками. // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах. Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА, 2004. С. 88 – 96.

18. Пресняков О.А. Математическая модель структурного восстановления скановых изображений. // Тез. докл. 9-й всероссийск. научно-технической

конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2004. С. 169.

19. Межведомственная система сбора, обработки и распространения данных ДЗЗ: Отчет о НИР (заключительный) / РГРТА; Рук. Злобин В. К. – Тема № 2-03Г; № ГР 01200302099, Инв. № 02200501093. Рязань, 2004. 180 с. Соисполн. Пресняков О.А.

20. Методы и базовые технологии межотраслевой обработки данных дистанционного зондирования Земли: Отчет о НИР (заключительный) / РГРТА; Рук. Злобин В. К. – Тема № 13-03Г; № ГР 01200501427, Инв. № 02200501067. Рязань, 2004. 150 с. Соисполн. Пресняков О.А.

21. Пресняков О.А. Синтез многоканального изображения местности со сложным рельефом // Тез. докл. 10-й всероссийск. научно-технической конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2005. С. 116.

22. Пресняков О.А., Козлов Е.П. Автоматическое выделение водных объектов на растровых картах // Тез. докл. 14-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, 2005. С. 215.

23. Каплин А.В., Козлов Е.П., Пресняков О.А. Определение установочных параметров ПЗС-линеек в многоэлементных сканирующих устройствах. // Тез. докл. 12-й всероссийск. научно-технической конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2007. С.68–69.

24. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Пресняков О.А., Светелкин П.Н. Геометрическое комплексирование спектрональных изображений при цветосинтезе. // Тез. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2007. С. 254–255.

25. Борисов Д.В., Кузнецов А.Е., Нефедов В.И., Пресняков О.А., Сухов А.А. Алгоритмы геометрической коррекции изображений высокого пространственного разрешения. // Тез. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2007. С. 255–257.

26. Побаруев В.И., Пресняков О.А. Унифицированная система для построения растровых ГИС. // Тез. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2007. С. 331–334.

Пресняков Олег Александрович

**СИСТЕМА СТРУКТУРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ
И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ОТ ВИДЕОДАТЧИКОВ СКАНОВОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.10.2007 г. Формат бумаги 60 × 84 1/16.

Бумага офисная. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ЗАО «Колорит»,
г. Рязань, Первомайский проспект, д. 37/1.