

Злобин В.К.
Еремеев В.В.

Обработка аэрокосмических изображений



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 004.932
ББК 22.343
368

Злобин В. К., Еремеев В. В. **Обработка аэрокосмических изображений.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 288 с. — ISBN 5-9221-0739-9.

В монографии рассматриваются современные методы и информационные технологии компьютерной обработки аэрокосмических изображений, получаемых с помощью различных систем дистанционного зондирования Земли. Основное внимание уделено математическому описанию и алгоритмизации базовых технологий межотраслевой обработки данных дистанционного зондирования Земли, а именно технологий геометрической и радиометрической обработки аэрокосмических снимков, пространственной привязки изображений земной поверхности, комплексирования разнометрической видеoinформации и формирования по серии перекрывающихся снимков аэрокосмических карт. Рассмотрены вопросы эффективной системной организации технологий обработки аэрокосмических изображений.

Для специалистов, работающих в области обработки аэрокосмических изображений поверхности Земли, аспирантов и студентов старших курсов.

Табл. 17. Ил. 99. Библиогр. 130 назв.

ISBN 5-9221-0739-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2006

© В. К. Злобин, В. В. Еремеев, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Основные задачи междотраслевой обработки изображений земной поверхности	9
§ 1.1. Общие принципы формирования, обработки и распространения данных дистанционного зондирования Земли	9
§ 1.2. Геометрическая обработка изображений	17
§ 1.3. Пространственная привязка изображений	23
§ 1.4. Радиометрическая обработка	28
§ 1.5. Комплексирование изображений	34
§ 1.6. Концептуальные положения по построению базовых технологий обработки данных ДЗЗ	42
Глава 2. Методы и алгоритмы геометрической обработки данных дистанционного зондирования Земли	47
§ 2.1. Геометрическая модель космической съемки	47
§ 2.2. Геометрическая модель самолетной съемки	53
§ 2.3. Типовые модели сканирующих устройств	58
§ 2.4. Организация поэлементных координатных преобразований	64
§ 2.5. Расчет параметров кусочно-блинейной координатной обработки	71
§ 2.6. Спектральный анализ процессов формирования и геометрической обработки изображений	77
§ 2.7. Методика оценки точности и яркостной интерполяции	83
§ 2.8. Метрологическое обеспечение процесса геометрической обработки изображений	87
Глава 3. Методы и технологии пространственной привязки изображений	94
§ 3.1. Пространственная привязка по данным навигационных систем ГЛОНАСС/GPS	94
§ 3.2. Технология пространственной привязки по электронным картам	97
§ 3.3. Регрессионная технология прецизионной пространственной привязки	105
§ 3.4. Автоматический поиск одноименных сюжетов на снимке и электронной карте	110
§ 3.5. Пространственная привязка снимков от геостационарных спутников по диску Земли	115
§ 3.6. Привязка изображений по наземным ориентирам	121
§ 3.7. Пространственная привязка изображений по звездам	132

Глава 4. Радиометрическое обеспечение данных ДЗЗ	139
§ 4.1. Типовая схема формирования и радиометрической обработки изображений	139
§ 4.2. Фильтрация импульсных и групповых помех	141
§ 4.3. Компенсация низкочастотных яркостных искажений	144
§ 4.4. Коррекция спектральных искажений	147
§ 4.5. Устранение структурных искажений по данным бортовой калибровки и статистического анализа	152
§ 4.6. Статистический отбор данных	158
§ 4.7. Коррекция структурных искажений на основе сопоставления функций распределения	164
§ 4.8. Сравнительный анализ алгоритмов статистической коррекции структурных искажений	170
§ 4.9. Коррекции структурных искажений на основе анализа одноименных объектов	173
§ 4.10. Модификация алгоритма коррекции структурных искажений на неоднородных изображениях	181
§ 4.11. Метрологическая аттестация технологий радиометрической коррекции	185
Глава 5. Методы и технологии комплексирования спектрозональных изображений	190
§ 5.1. Геометрическое объединение синхронно формируемых изображений	190
§ 5.2. Геометрическое комплексирование разновременных изображений	197
§ 5.3. Фотометрическое выравнивание совмещаемых изображений	203
§ 5.4. Комплексирование спектрозональных изображений	210
§ 5.5. Комплексирование разносекторальной информации на основе стохастической модели изображений	217
§ 5.6. Комплексирование субпиксельно смещенных изображений на основе яркостной интерполяции	222
§ 5.7. Алгебраическое комплексирование субпиксельно смещенных изображений	229
§ 5.8. Комплексирование разносекторальных субпиксельно смещенных изображений	234
Глава 6. Системная организация процессов обработки данных ДЗЗ	238
§ 6.1. Управление процессами обработки данных ДЗЗ в реальном времени	238
§ 6.2. Модели планирования процессов обработки данных ДЗЗ	245
§ 6.3. Модели обработки видеоданных в однородных многопроцессорных системах	248
§ 6.4. Однородные вычислительные модели многопроцессорной обработки изображений	253
§ 6.5. Управление распределенной памятью	257
§ 6.6. Организация межпроцессорного взаимодействия	261
§ 6.7. Каталогизация данных ДЗЗ	266
§ 6.8. Программная реализация процессов обработки данных ДЗЗ	273
Список литературы	279

ВВЕДЕНИЕ

Обработка изображений является достаточно обширной областью знаний, которая динамично развивается во многих важных практических приложениях. По этой тематике издан ряд фундаментальных книг [6, 18, 56, 63, 65, 71, 72, 81, 83], в которых изложены теоретические основы формирования, восприятия, обработки и анализа изображений. В настоящей книге не ставится задача повторения известных теоретических положений. Главная цель книги — это системное изложение математических основ и технологий компьютерной обработки аэрокосмических изображений, получаемых с помощью различных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Эта важная сфера приложения теории обработки изображений, с одной стороны, базируется на ее общих положениях, с другой стороны — требует развития и конкретизации в виде проблемно ориентированных методов, алгоритмов и информационных технологий.

В предлагаемой читателю монографии представлены результаты научных исследований и опытно-конструкторских разработок, которые более 30 лет ведутся в Рязанской государственной радиотехнической академии коллективами НИИ обработки аэрокосмических изображений и кафедры ЭВМ. В последние годы работы в данном направлении проводятся этими коллективами в рамках Федеральной космической программы России, Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база», грантов и программ Российского Фонда фундаментальных исследований и Министерства образования и науки Российской Федерации.

Дистанционные исследования Земли — одно из приоритетных направлений космической деятельности России. Изображения, получаемые с помощью различных систем ДЗЗ, после соответствующей обработки находят эффективное применение в гидрометеорологии, охране окружающей среды, картографии, геологии, сельском и лесном хозяйствах, экологии, мониторинге чрезвычайных ситуаций, военной разведке и многих других областях человеческой деятельности [14, 57, 69]. В настоящее время в мире созданы и успешно эксплуатируются крупные национальные и межгосударственные космические системы исследования Земли, такие как NOAA, Landsat (США), Spot (Франция), «Ресурс-О1», «Метеор-3М» (Россия) и др. [14, 16, 54, 55, 70, 99, 100, 109]. Они позволяют выполнить съемку территорий в видимом, инфракрасном и радиолокационном диапазонах спектра с пространственным разрешением от 1 км до 10–30 м. В ближайшие годы планируются запуски космических аппаратов нового поколения, которые обеспечат многозональную съемку с разрешением 2 метра и выше и периодичностью обновления информации 2–4 суток.

Однако аэрокосмические снимки в исходном виде не могут быть использованы по назначению, поскольку содержат значительные геометрические и яркостные искажения по отношению к наблюдаемой сцене. Необходимо выполнить их коррекцию с целью получения таких изображений, по которым с максимальной возможной точностью можно оценивать геометрические, энергетические и спектральные характеристики объектов земной поверхности.

Согласно устоявшейся концепции использования данных ДЗЗ комплексную обработку аэрокосмической видеoinформации признано целесообразным выполнять в две стадии. На первой стадии производится так называемая межотраслевая обработка, в результате которой изображения приводятся к стандартному виду, удовлетворяющему всех потребителей по геометрической точности, радиометрическому качеству и форме представления. В процессе межотраслевой обработки выполняются геометрическая коррекция и преобразование изображений в заданные картографические проекции; пространственная привязка снимков к местности; радиометрическая коррекция и комплексирование разномасштабных видеоданных с целью улучшения их качества; каталогизация материалов съемки и обеспечение сетевого доступа к ним; выдача потребителям обработанных изображений в соответствии с общепринятыми международными стандартами. Для выполнения межотраслевой обработки привлекаются десятки различных параметров и характеристик, определяемых в ходе предполетных испытаний съемочной аппаратуры и в процессе ее эксплуатации; измерения параметров орбиты и углов ориентации аэрокосмического аппарата; опорная геометрическая и радиометрическая информация и другие сведения. На второй стадии с использованием нормализованных изображений выполняется тематическая (целевая) обработка в интересах решения задач конкретной отрасли, региона, научного учреждения или органа управления.

В настоящей книге рассматриваются вопросы, связанные, главным образом, с межотраслевой обработкой данных ДЗЗ. Термин «межотраслевая обработка» несет две смысловые нагрузки. Во-первых, он определяет весьма устойчивый набор перечисленных выше задач, без решения которых невозможно целевое использование материалов аэрокосмической съемки. Во-вторых, этот термин отражает общепризнанную экономически обоснованную концепцию централизованного обеспечения заинтересованных потребителей нормализованными аэрокосмическими изображениями, с тем чтобы освободить их от необходимости детального изучения весьма сложных процессов ДЗЗ и самостоятельной реализации дорогостоящих технологий коррекции изображений.

В становлении и развитии наземных средств межотраслевой обработки материалов аэрокосмической съемки можно выделить три этапа [21, 26].

Первый этап охватывает 70-е годы. В это время в нашей стране и США создаются первые образцы систем цифровой обработки аэрокосмических снимков на базе ЭВМ и устройств ввода и вывода изображений барабанного типа. К числу лучших отечественных образцов того времени относилась система «Схема» [6, 28]. Эта система в 1972 г. была установлена в Госцентре «Природа» и несколько лет использовалась для проектирования и отработки новых технологий картографирования поверхности Земли по результатам аэрокосмических съемок. Первые попытки решить задачи геометрической и радиометрической коррекции изображений поставили перед разработчиками ряд сложных научно-технических проблем, поскольку производительность ЭВМ в то время измерялась десятками тысяч операций в секунду, емкость оперативной памяти — десятками Кбайт, а информационная емкость типового аэрокосмического изображения составляла десятки Мбайт. В рамках системы «Схема» были реализованы новые прогрессивные методы и технологии обработки изображений [6, 27, 29, 48], не потерявшие ценности до настоящего времени, а именно: методы высокоскоростной геометрической коррекции изображений; методы эффективной организации видеoinформационного обмена между оперативной и внешней памятью ЭВМ; аналитико-регрессионная технология преобразования изображений в картографические проекции. Однако время преобразования типового

аэрокосмического изображения с размерами $18 \times 18 \text{ см}^2$ составляло более 15 часов и обработка каждого снимка представляла собой уникальную операцию.

В 1976 г. с участием авторов создана высокопроизводительная система обработки аэрокосмических снимков «Модель», включающая в себя ЭВМ ЕС-1030, три однотипных телевизионных устройства ввода-вывода изображений и прикладное программное обеспечение [1, 2, 3, 34, 96]. В 1976–1981 гг. эта система использовалась в Центральном НИИ геодезии, аэросъемки и картографии для отработки новых процессов составления карт. Коррекция изображений в данной системе осуществлялась с помощью специальных видеопроцессоров, которые входили в состав устройств ввода-вывода и обеспечивали движение электронных лучей в телевизионных трубках по строго рассчитанным траекториям. При этом в процессе геометрической трансформации видеоданные передавались с устройства ввода изображений, минуя память ЭВМ, сразу же на устройство вывода для фоторегистрации на пленку. Время обработки типового снимка было сокращено до полутора часов. В разработку систем «Схема» и «Модель» значительный вклад внесли А.А. Ануркин, Б.В. Костров, Ю.Н. Кирилин, М.Н. Криворотько и др.

Второй этап охватывает 80-е годы. В это время в нашей стране сложилась явная диспропорция в развитии средств обработки аэрокосмической видеоинформации и средств ее получения. Существующие в то время системы обработки изображений не удовлетворяли потребителей по производительности, в результате чего громадные объемы ценной аэрокосмической видеоинформации не находили должного практического использования. В 1980–1982 гг. в рамках создания новых систем ДЗЗ формируется государственная концепция развития их наземной инфраструктуры. Правительством принимается решение о создании в Москве, Новосибирске, Хабаровске и Ташкенте мощных региональных центров межотраслевой обработки данных ДЗЗ с целью централизованного оперативного обеспечения потребителей материалами аэрокосмической съемки. Для оснащения этих центров впервые в отечественной практике был налажен серийный выпуск мультипроцессорных систем типа ПС-2000/2100, в которых сотни однотипных процессоров были ориентированы на обработку различных потоков видеоданных под управлением единого для всех процессоров потока команд. Такие системы обеспечивали производительность от 200 млн. до 1,5 млрд. коротких операций в секунду. На передний план выдвинулась проблема организации на базе однородных мультипроцессорных систем высокопроизводительных технологий обработки изображений, основанных на эффективном распараллеливании вычислительных ресурсов на трех уровнях: внутрипроцессорном, межпроцессорном и общесистемном. Такие технологии были разработаны в 1985–1987 гг. и внедрены в Главном центре приема и обработки спутниковой информации (г. Долгопрудный Моск. обл.), где до 1993 г. в рамках системы «Микрон» постоянно совершенствовались и использовались для обработки видеоданных, принимаемых со спутников серии «Ресурс-01» [21, 24, 31, 32, 50]. В создании технологий мультипроцессорной обработки данных ДЗЗ активное участие приняли М.С. Здобнов, А.В. Нелин, Н.В. Середа и др.

Третий этап развития систем обработки данных ДЗЗ охватывает период с начала 90-х годов до настоящего времени. Для обработки материалов аэрокосмической съемки стали широко использоваться персональные компьютеры и рабочие станции повышенной производительности, различного рода сканеры, плоттеры, дигитайзеры. Благодаря доступности этих средств для многочисленных пользователей, а также развитию телекоммуникационных средств распространения видеоданных, создалась предпосылка для активного применения результатов аэрокосмического

мониторинга Земли в различных отраслях науки и техники и в разных регионах страны. Наиболее важными стали задачи получения изображений с высоким пространственным разрешением, их высококачественной обработки, проектирования технологий высокоточной геодезической привязки данных ДЗЗ, картографирования обширных территорий по серии перекрывающихся снимков, создания различных приложений для геоинформационных систем. В этот период Рязанской государственной радиотехнической академией в кооперации с Российским НИИ космического приборостроения, Научным центром оперативного мониторинга Земли, НИИ точных приборов и другими организациями Федерального космического агентства создано семейство систем межотраслевой обработки изображений [35, 39, 40, 128]: NormSat, NormScan, NoaaSat, NormSatReg, BankSat, TmVision и др. (рис. 1 цветной вклейки). В настоящее время эти системы эксплуатируются в Федеральном центре Роскосмоса в Москве; отраслевых центрах Росгидромета в Обнинске, Долгопрудном, Новосибирске; региональном центре в Ханты-Мансийске. В рамках этих систем впервые в отечественной практике реализованы замкнутые технологии межотраслевой обработки данных ДЗЗ, которые обеспечивают генерацию выходной информационной продукции в соответствии с принятыми в мировой практике уровнями обработки, оценку качества видеoinформации, каталогизацию и сетевой доступ потребителей к электронным каталогам и архивам видеоданных.

В создание систем этого поколения значительный вклад внесли А.Е. Кузнецов, В.И. Нефедов, В.И. Побаруев, Г.А. Козлов, А.Э. Москвитин, О.А. Пресняков, Д.В. Борисов, А.А. Воронин, А.М. Кочергин, С.В. Антонушкина, В.М. Васильев, М.В. Курбасов, В.Г. Новоселов, Д.И. Федоткин. Авторы выражают им и другим сотрудникам НИИ обработки аэрокосмических изображений свою глубокую признательность.

Авторы выражают благодарность Г.А. Кузнецовой, взявшей на себя основной труд по оформлению книги.

Изложение принципов построения систем нового поколения, методов и технологий обработки данных ДЗЗ в этих системах составляет основное содержание настоящей книги.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

§ 1.1. Общие принципы формирования, обработки и распространения данных дистанционного зондирования Земли

Принципы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Дистанционные исследования поверхности Земли основаны на измерении с аэрокосмических аппаратов геометрических, энергетических и спектральных характеристик объектов наблюдаемой сцены [7, 14, 57, 69, 87]. С этой целью на спутниках устанавливаются различные по принципу действия сканирующие устройства, которые в процессе полета осуществляют съемку земной поверхности в видимой, инфракрасной и радиолокационной областях спектра. Как правило, съемка выполняется одновременно несколькими сканирующими устройствами в различных спектральных диапазонах, и цифровая видеoinформация передается на наземные пункты приема и обработки. Изображение, полученное некоторым датчиком в k -м спектральном диапазоне ($k = \overline{1, K}$), представляет собой таблицу (массив) отчетов яркости $B_k(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, образующих матрицу $\mathbf{B}_k = [B_k(m, n)]$, где m, n — соответственно номера столбцов и строк. При одновременной съемке в K спектральных диапазонах образуется набор изображений $B(m, n) = \{B_k(m, n), k = \overline{1, K}\}$, которые формируются в процессе сканирования точек земной поверхности в результате интегрирования и преобразования лучистой энергии:

$$B_k(m, n) = \int_0^{\infty} E(X, Y, Z, \lambda) S_k(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}, \quad (1.1)$$

где $E(X, Y, Z, \lambda)$ — спектральная яркость точки земной поверхности с координатами (X, Y, Z) , соответствующей элементу изображения с координатами (m, n) ; $S_k(\lambda)$ — спектральная чувствительность датчика в k -м спектральном диапазоне; λ — длина волны излучения. Каждый отдельный элемент изображения $B_k(m, n)$ далее будем обозначать как b_{kmn} или $b_k(m, n)$. Если при рассмотрении тех или иных вопросов не имеет значения, в каком спектральном диапазоне получено изображение, то индекс k будем опускать, например, вместо $B_k(m, n)$, b_{kmn} , $b_k(m, n)$ будем использовать обозначения $B(m, n)$, b_{mn} , $b(m, n)$.

Дистанционное изучение объектов земной поверхности основано на оценке их геометрических, энергетических и спектральных характеристик по результатам обработки и анализа спектральных изображений $B_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$. Точность такой оценки определяется тем, насколько точно установлено соответствие между спектральной яркостью точек земной поверхности $E(X, Y, Z, \lambda)$ и элементами изображений $B_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$. Такое соответствие может быть охарактеризо-

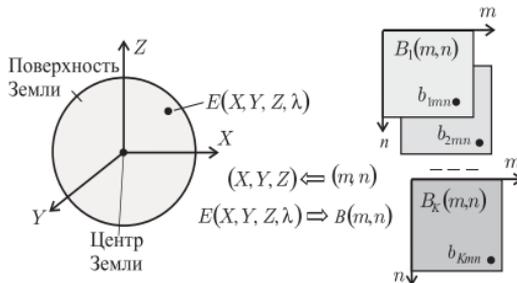


Рис. 1.1. Получение спектрозональных изображений

вано двумя частными и независимыми соответствиями (рис. 1.1): координатным $(m, n) \leftrightarrow (X, Y, Z)$ и яркостным $\{B_k(m, n), k = \overline{1, K}\} \leftrightarrow E(X, Y, Z, \lambda)$.

Геометрические модели. Прямое координатное соответствие в общем виде определяется как

$$X = F_X(m, n), \quad Y = F_Y(m, n), \quad Z = F_Z(m, n), \quad (1.2)$$

где F_X, F_Y, F_Z — функции, описывающие процесс сканирования точек земной поверхности в условиях движения летательного аппарата. Эти функции определяются законом перемещения спутника или самолета по орбите, законом сканирования (визирования) точек Земли конкретным датчиком, углами ориентации летательного аппарата и механизмом опроса приемников лучистой энергии.

После определения функций F_X, F_Y, F_Z яркостное соответствие между одноименными точками изображения и земной поверхности можно охарактеризовать некоторым оператором F_B :

$$B(m, n) = F_B[E(X, Y, Z, \lambda)]. \quad (1.3)$$

Геометрическая структура изображений $B_k(m, n), k = \overline{1, K}$, зависит от многих детерминированных и случайных факторов. Детерминированные факторы можно описать аналитически, они, главным образом, определяют вид функций F_X, F_Y, F_Z . Действие случайных факторов можно учесть, лишь привлекая опорную координатную информацию, например сопоставляя координаты одноименных точек на изображениях $B_k(m, n), k = \overline{1, K}$, и электронной карте $K(x, y)$, зарегистрированной в некоторой системе координат xy . Задача координатной обработки состоит в том, чтобы путем геометрического трансформирования изображений $B_k(m, n), k = \overline{1, K}$, получить набор таких изображений $D(x, y) = \{D_k(x, y), k = \overline{1, K}\}$, которые в максимальной степени совпадали бы по геометрии с картой $K(x, y)$. В данном случае карта рассматривается как наиболее точная геометрическая модель отображения точек земной поверхности на плоскость.

Формально процесс координатной обработки можно определить в виде прямого геометрического соответствия

$$x = F(m, n), \quad y = G(m, n), \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (1.4)$$

или в виде обратного соответствия

$$m = f(x, y), \quad n = g(x, y), \quad x = \overline{1, X}, \quad y = \overline{1, Y}, \quad (1.5)$$

где (m, n) и (x, y) — соответственно координаты одноименных точек на исходном

$B(m, n)$ и преобразованном $D(x, y)$ изображениях; F, G и f, g — прямые и обратные функции геометрической обработки.

Следовательно, для геометрической обработки данных ДЗЗ необходимо знать три координатных соответствия, представленных на следующей схеме:

$$\begin{array}{ccc} (X, Y, Z) & \xleftarrow{X=F_X(m,n), Y=F_Y(m,n), Z=F_Z(m,n)} & (m, n) & \xrightarrow{x=F(m,n), y=G(m,n)} & (x, y), \\ & & \text{---} & & \uparrow \\ & & x=f_x(X, Y, Z), & & y=f_y(X, Y, Z) \end{array}$$

На этой схеме функции F_X, F_Y, F_Z определяют процесс формирования изображения $B(m, n)$; функции F, G определяют процесс координатной обработки и формирования нормализованного изображения $D(x, y)$; функции f_x, f_y определяют координатное соответствие одноименных точек на поверхности Земли и карте. Функции f_x, f_y описаны в сферической геодезии и математической картографии, их можно представить в общем виде как

$$x = f_x(X, Y, Z), \quad y = f_y(X, Y, Z). \tag{1.6}$$

Прямое геометрическое соответствие (1.4) с учетом (1.6) определяется как

$$\begin{aligned} x &= F(m, n) = f_x[F_X(m, n), F_Y(m, n), F_Z(m, n)], \\ y &= G(m, n) = f_y[F_X(m, n), F_Y(m, n), F_Z(m, n)]. \end{aligned} \tag{1.7}$$

Определить (1.5) можно, обратив выражение (1.7), либо найти из (1.6) $X = f_X(x, y), Y = f_Y(x, y), Z = f_Z(x, y)$; из (1.2) $m = F_m(X, Y, Z), n = F_n(X, Y, Z)$, и затем

$$\begin{aligned} m &= F_m(f_X(x, y), f_Y(x, y), f_Z(x, y)), \\ n &= F_n(f_X(x, y), f_Y(x, y), f_Z(x, y)). \end{aligned} \tag{1.8}$$

Таким образом, для нахождения функций геометрической обработки необходимо решить две задачи. Во-первых, описать геометрию формирования изображений в виде функций F_X, F_Y, F_Z . Во-вторых, необходимо построить технологию численного обращения весьма сложных функций двух или трех переменных.

Геометрию изображения $B(m, n)$ определяют три фактора [38, 58]: закон движения летательного аппарата, закон сканирования (визирования) точек Земли с учетом углов ориентации спутника или самолета, механизм опроса светочувствительных элементов видеодатчика. Первые два процесса для любого момента времени t в общем виде описываются фундаментальным векторным уравнением

$$\mathbf{R}(t) = \boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{r}(t), \tag{1.9}$$

где $\mathbf{R}(t)$ — вектор положения сканируемой точки на поверхности Земли, определяющий в данный момент времени t координаты точки $\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}[X_T(t), Y_T(t), Z_T(t)]$ в геодезической системе координат, центр которой совпадает с центром Земли (рис. 1.2); $\boldsymbol{\eta}(t)$ — вектор положения летательного аппарата в той же системе координат, $\boldsymbol{\eta}(t) = \boldsymbol{\eta}[X_O(t), Y_O(t), Z_O(t)]$; $\mathbf{r}(t)$ — вектор визирующего луча, соединяющий центр масс летательного аппарата (X_O, Y_O, Z_O) со сканируемой точкой (X_T, Y_T, Z_T) . Третий процесс (механизм опроса датчика) определяет функциональную связь между координатами (m, n) и моментом времени t формирования элементов изображения $b(m, n)$ с этими координатами.

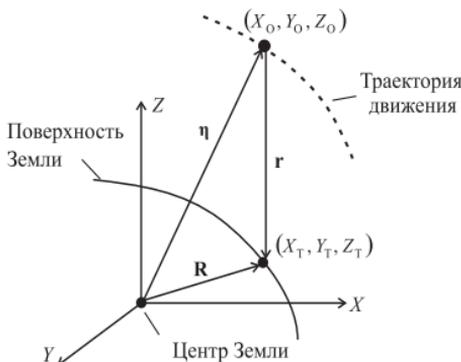


Рис. 1.2. Векторный треугольник, определяющий положение точки Земли

Обычно элементы матрицы изображения $B(m, n)$ регистрируются равномерно во времени. В этом случае

$$t = t_n + \frac{m-1}{M-1}T + (n-1)(T + \Delta T), \quad (1.10)$$

где t_n — время регистрации начальной точки изображения $b(1,1)$, T — время формирования одной строки, ΔT — межстрочная пауза. С учетом (1.10) из (1.9) следует функциональная связь между координатами одноименных точек земной поверхности и изображения:

$$\mathbf{R}[X_T(m, n), Y_T(m, n), Z_T(m, n)] = \boldsymbol{\eta}(m, n) + \mathbf{r}(m, n). \quad (1.11)$$

Основными характеристиками процесса геометрической обработки являются точность и скорость. Точность обработки определяется, главным образом, точностью описания процесса формирования изображения в виде функций $X = F_X(m, n)$, $Y = F_Y(m, n)$, $Z = F_Z(m, n)$. Они полностью определяют закон координатной обработки, поскольку необходимые для этого функции перехода от координат точек Земли (X, Y, Z) к географическим координатам (λ, φ) , а от них — к картографическим (x, y) достаточно подробно описаны в литературе [51, 64, 77].

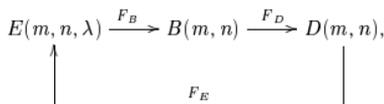
Но даже при абсолютно точном описании процесса формирования изображения на практике часто не удается установить достаточно точного соответствия между координатами точек Земли (X, Y, Z) и одноименными точками на скорректированном снимке (x, y) . Основными причинами остаточных искажений являются:

- неточность оценки параметров орбиты летательного аппарата и углов его ориентации,
- неточность задания конструктивных и технических характеристик сканирующих устройств и их изменение в процессе эксплуатации.

Произвести уточнение закона сканирования поверхности Земли можно лишь на основе сопоставления координат одноименных точек на исходном снимке и карте, выступающей в качестве опорной координатной основы.

Радиометрические модели. При радиометрической обработке в качестве объектов преобразования выступают значения энергетической яркости точек наблюдаемой сцены, измеренные в нескольких спектральных диапазонах. В идеальном

случае процесс формирования изображений видеодатчиком должен описывается выражением (1.1). На практике этот процесс сопровождается действием многих искажающих факторов, в результате чего соотношение (1.1) существенно нарушается. Основная задача радиометрической коррекции изображений $B(m, n) = \{B_k(m, n), k = \overline{1, K}\}$ состоит в получении по ним таких новых изображений $D(m, n) = \{D_k(m, n), k = \overline{1, K}\}$, по которым с максимально возможной точностью можно оценивать энергию и спектральный состав излучения от различных объектов земной поверхности. В самом общем виде процесс формирования и радиометрической коррекции видеоданных можно представить следующей схемой:



где $F_B = \{F_{Bk}, k = \overline{1, K}\}$ — функции, описывающие преобразование спектральной яркости $E(m, n, \lambda)$ точек Земли в набор яркостей спектрального изображения; $F_D = \{F_{Dk}, k = \overline{1, K}\}$ — функции радиометрической коррекции; F_E — оператор, устанавливающий обратное соответствие между скорректированными изображениями $D_k(m, n), k = \overline{1, K}$, и спектральной яркостью $E(m, n, \lambda)$. Здесь $E(m, n, \lambda)$ с учетом выражений (1.2) соответствует $E(X, Y, Z, \lambda)$.

После радиометрической коррекции изображений достигаются равенства

$$D_k(m, n) = \int_0^{\infty} E(m, n, \lambda) S_k(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}. \quad (1.12)$$

На основе (1.12) становится возможным решить обратную задачу: оценить $E(m, n, \lambda)$ по $D_k(m, n), k = \overline{1, K}$. Следовательно, для оценки $E(m, n, \lambda)$ необходимо:

- найти функции F_B , т. е. описать в сигнальном пространстве процесс формирования изображений $B_k(m, n), k = \overline{1, K}$;
- по F_B определить корректирующие функции F_D ;
- выполнить яркостную коррекцию спектральных изображений $B_k(m, n) \rightarrow D_k(m, n), k = \overline{1, K}$;
- оценить $E(m, n, \lambda)$ по $D_k(m, n), k = \overline{1, K}$.

Действие искажающих факторов можно описать в системе координат изображения (m, n) , считая что геометрическое соответствие между координатами точек Земли (X, Y, Z) и координатами одноименных точек изображения (m, n) установлено. Процессы искажения и радиометрической коррекции видеоданных представим как

$$E(m, n, \lambda) \xrightarrow{\Phi_A(E, \lambda)} E_A(m, n, \lambda) \xrightarrow{\Phi_C(E_A, \lambda)} E_C(m, n) \xrightarrow{\Phi_B(E_C, m, n)} B(m, n) \xrightarrow{\Phi_D(B, m, n)} D(m, n). \quad (1.13)$$

Функция $\Phi_A(E, \lambda)$ описывает процесс прохождения через атмосферу лучистой энергии $E(m, n, \lambda)$ от поверхности Земли. В результате на вход сканера поступает излучение $E_A(m, n, \lambda)$, отличающееся от $E(m, n, \lambda)$ по амплитуде и спектральному составу. С помощью оптической системы датчика входной поток лучистой энергии $E_A(m, n, \lambda)$ разделяется на K спектральных потоков $E_C(m, n) =$

$= \{E_{Ck}(m, n), k = \overline{1, K}\}$, которые поступают на входы K приемников лучистой энергии. Этот процесс может быть определен набором функций $\Phi_C(E_A, \lambda) = \{\Phi_{Ck}(E_A, \lambda), k = \overline{1, K}\}$, характеризующих для каждого спектрального диапазона коэффициент пропускания лучистой энергии с длиной волны λ . В каждом спектральном канале датчика осуществляется преобразование лучистой энергии в электрический сигнал, его пространственная дискретизация и квантование по уровню, в результате чего формируется набор спектральнональных изображений $B(m, n) = \{B_k(m, n), k = \overline{1, K}\}$. Этот процесс можно описать набором функций $\Phi_B(E_C, m, n) = \Phi_B(E_C, n) = \{\Phi_{Bkn}(E_C), k = \overline{1, K}, n = \overline{1, N}\}$, где $\Phi_{Bkn}(E_C)$ — передаточная характеристика элементарного приемника излучения с номером n в k -м спектральном диапазоне.

В тракте формирования изображения можно выделить два крупных звена и определить для них характерные искажающие факторы. Первое звено — это передающая среда и условия наблюдения. Основными искажающими факторами здесь выступают: неравномерность освещения и отражения излучения точек земной поверхности и атмосферные искажения. Второе звено видеотракта — это сканирующее устройство. Искажения, вносимые видеодатчиком, обусловлены: неравномерностью передачи лучистой энергии в фокальную плоскость датчика; флюктуациями передаточных характеристик приемников излучения (так называемые структурные искажения); неидеальностью данных бортовой калибровки, которые используются в качестве опорной радиометрической информации; нелинейностью спектральных чувствительностей датчика в различных спектральных каналах.

Различают две постановки задачи радиометрической коррекции изображений. При первой постановке необходимо найти такие функции $\Phi_D(B, m, n) = \{\Phi_{Dk}(B_k, m, n), k = \overline{1, K}\}$ и по ним получить такие изображения $D(m, n) = \{D_k(m, n), k = \overline{1, K}\}$, которые позволяли бы наиболее точно оценить функцию спектральной яркости $E(m, n, \lambda)$, т. е. свойства земной поверхности. Формально задача сводится к нахождению функций $\Phi_D(B, m, n) = \{\Phi_{Dk}(B_k, m, n), k = \overline{1, K}\}$, при которых минимизируется функционал

$$R_\Phi = \min_{\Phi_D} \{T [E(m, n, \lambda) - \Phi_D(\Phi_B(\Phi_C(\Phi_A(E(m, n, \lambda)))))]\}, \quad (1.14)$$

где T — некоторая мера близости. В этом случае при радиометрической коррекции компенсируются искажения, вызванные атмосферными явлениями.

При второй постановке задачи требуется получить изображения $D(m, n) = \{D_k(m, n), k = \overline{1, K}\}$, которые бы содержали информацию как об излучении земной поверхности $E(m, n, \lambda)$, так и о состоянии атмосферы. В этом случае задача состоит в нахождении таких функций $\Phi_D(B, m, n)$, при которых

$$R_\Phi = \min_{\Phi_D} \{T [E(m, n, \lambda) - \Phi_D(\Phi_B(\Phi_C(E(m, n, \lambda)))))]\}, \quad (1.15)$$

т. е. функция пропускания атмосферы $\Phi_A(E, \lambda)$ при радиометрической коррекции изображений в данном случае не учитывается. Эта постановка задачи характерна для межотраслевой обработки данных ДЗЗ.

Таким образом, основная задача радиометрической обработки состоит в том, чтобы сформировать корректирующие функции $\Phi_D(B, m, n) = \{\Phi_{Dk}(B_k, m, n), k = \overline{1, K}\}$, обработать по ним изображения $B(m, n) = \{B_k(m, n), k = \overline{1, K}\}$ и получить такие изображения $D(m, n) = \{D_k(m, n), k = \overline{1, K}\}$, которые несли бы в себе максимально точную информацию о наблюдаемой сцене и атмосфере.

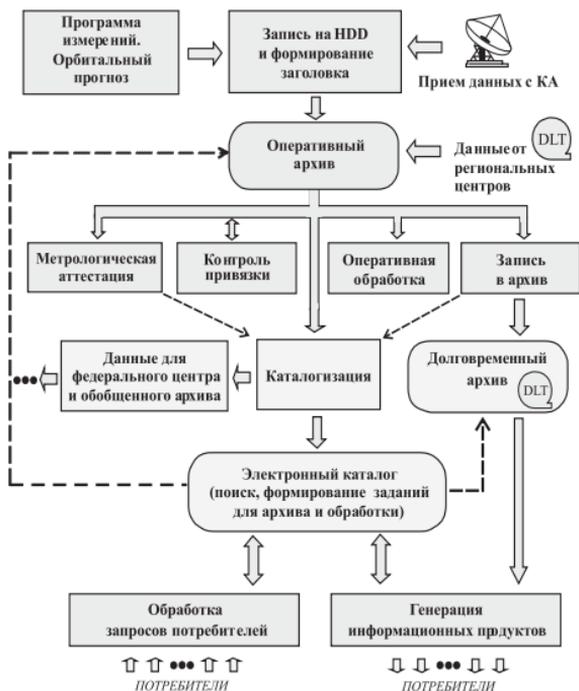


Рис. 1.3. Технологическая схема приема данных ДЗЗ, каталогизации и обслуживания потребителей

Центры обработки. В соответствии с современным представлением процесс межотраслевой обработки связан с решением ряда системных вопросов, начиная от аттестации поступающих от антенных комплексов видеоданных и кончая распространением потребителям откорректированных изображений. Анализ показывает, что технологии межотраслевой обработки наиболее комплексно решаются в рамках космических систем Landsat и Spot, имеющих более чем 20-летнюю историю становления и развития. Среди отечественных аналогов заслуживает внимания система межотраслевой обработки, созданная в Федеральном космическом агентстве [37, 39] в рамках проектов «Ресурс-О1», «Океан-О» и «Метеор-3М» (рис. 1.3).

В этой системе поступающие от антенных комплексов данные ДЗЗ в режиме реального масштаба времени записываются на жесткие диски подсистемой приема и регистрации изображений. Здесь информация в исходном виде, в структуре так называемого файл-потока, дополняется заголовком, содержащим сведения о составе потока, условиях съемки, траектории космического аппарата (КА) и др. После этого файл-поток по локальной вычислительной сети перепиывается на мощный файловый сервер, на базе которого реализован оперативный архив.

Файл-потоки в оперативном архиве хранятся ограниченный период времени, в течение которого над ними выполняются следующие технологические операции:

- контроль геодезической привязки и радиометрических показателей;
- каталогизация и занесение в долговременный архив;
- генерация выходной продукции по срочным заказам.

При исполнении заявок потребителей поиск и отбор для дальнейшей обработки данных ДЗЗ производится с помощью электронного каталога, предоставляющего доступ к базе скатых изображений по сети Интернет/Инtranет. По результатам поиска формируются задания на выборку информации из оперативного или долговременного архивов, после чего производится обработка по схеме формирования стандартных информационных продуктов.

В системах ДЗЗ принято различать аэрокосмический и наземный сегменты. Аэрокосмический сегмент включает спутники, самолеты, сканирующие устройства и датчики самого различного назначения и принципа действия, бортовые запоминающие устройства, радиопередатчики и каналы связи. Наземный сегмент — это пункты приема данных ДЗЗ, центры управления и планирования сеансов связи, центры межотраслевой обработки и архивации данных, телекоммуникационные средства передачи данных, наземные и космические средства навигационного обеспечения, центры тематической обработки и интерпретации материалов съемки.

В системах ДЗЗ важная роль отводится федеральным, отраслевым и региональным центрам приема и обработки спутниковой информации. Основной задачей *федеральных центров* является эффективная эксплуатация всех действующих систем ДЗЗ — это организация планирования сеансов связи с учетом заявок потребителей; взаимодействие с наземными и космическими средствами навигационного обеспечения; прием и размещение спутниковой информации в государственных архивах; эффективное обеспечение потребителей данными ДЗЗ. *Отраслевые центры* решают задачи в интересах конкретных ведомств. Здесь также необходимо организовать прием, межотраслевую обработку и хранение спутниковой информации, но центр тяжести перемещается на решение задач тематической обработки материалов аэрокосмической съемки применительно к конкретной предметной области. *Региональные центры*, по существу, решают те же отраслевые задачи, но не для всей страны, а для конкретной территории (области, региона, края и т.п.). При этом используются отраслевые службы, закрепленные за субъектами Российской Федерации. Таким образом, несмотря на функциональные различия федеральные, отраслевые и региональные центры решают ряд общих задач, а именно прием, межотраслевую обработку, архивацию, каталогизацию данных и информационное обеспечение потребителей. Это обстоятельство является одной из основных предпосылок для создания базовых методов и технологий для решения рассмотренных выше задач на федеральном, отраслевом и региональном уровнях.

Несмотря на внешнюю простоту формального определения процесса межотраслевой обработки в виде представленных выше соотношений его реализация сопряжена с решением сложных научно-технических вопросов. Возникающие при этом проблемы, с одной стороны, обусловлены особенностями процесса межотраслевой обработки, с другой стороны, исключительно высокими требованиями, предъявляемыми потребителями к результатам обработки. Здесь разумно выделить два уровня решаемых задач: математическое описание процедур межотраслевой обработки и организацию вычислительных и информационных процессов в системах обработки. Задачи первого уровня составляют метрологическое обеспечение процесса межотраслевой обработки; уровень их решения во многом определяет точность геометрической коррекции, географической привязки снимков и их радиометрическое качество. В вычислительном отношении это весьма сложные и многообразные задачи,

для их решения привлекаются различного рода данные предполетных испытаний, оперативная измерительная и калибровочная информация, передаваемая в общем потоке с видеоданными, опорная картографическая и навигационная информация.

Задачи второго уровня связаны с достижением максимальной производительности систем обработки изображений в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Современные системы ДЗЗ [14, 39] передают за один сеанс связи видеоданные объемом 1 Гбайт и более со скоростью порядка 2 Мбайт/с. Ставится задача межотраслевой обработки подобных информационных потоков в темпе их приема, либо с незначительным замедлением, с тем чтобы выполнять нормализацию принятых данных до следующего сеанса связи со спутником, т. е. примерно за 1,5 часа. Еще более высокие требования к скорости обработки предъявляют геостационарные системы ДЗЗ. В соответствии с международным соглашением серия геостационарных спутников располагается вдоль экватора, неподвижно по отношению к наблюдаемой поверхности Земли. С помощью этих спутников осуществляется наблюдение всего диска Земли в нескольких спектральных диапазонах видимой области спектра (обычно в 3-х) и в 7-9 диапазонах инфракрасной области спектра. Информация объемом порядка 1 Гбайт передается через каждые 30 минут на наземные центры. Необходимо выполнять обработку этой информации за 3-5 минут с тем, чтобы передавать откорректированные изображения на спутник для их последующей ретрансляции на наземные пункты приема.

Только при грамотном решении задач первого и второго уровней может идти речь об эффективном использовании систем ДЗЗ и оперативном информационном обеспечении потребителей.

§ 1.2. Геометрическая обработка изображений

Обработка по прямому закону. Геометрическая нормализация изображений является одним из основных процессов межотраслевой обработки. В общем виде этот процесс представляет собой формирование на основе искаженного изображения $B(m, n)$, заданного в узлах квадратной решетки с координатами (m, n) , $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, нормализованного цифрового изображения $D(x, y)$, $x = \overline{1, X}$, $y = \overline{1, Y}$. Геометрическую обработку можно осуществить двумя способами: используя законы прямого (1.4) или обратного (1.5) координатного соответствия. Обработка по прямому закону может быть представлена следующей последовательностью операций:

$$B(m, n) \xrightarrow{F, G} B(x^*, y^*) \xrightarrow{L_n} D^*(x, y) \xrightarrow{L_x} D(x, y). \quad (1.16)$$

С помощью функций F, G осуществляется геометрическое трансформирование отсчетов изображения $B(m, n)$ в плоскость xy , в которой формируется нормализованное изображение $D(x, y)$. В результате из квадратно-дискретизованного изображения $B(m, n)$ при последовательном изменении $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$ формируется дискретное изображение:

$$B(x^*, y^*) = \begin{cases} B(m, n) & \text{при } x^* = F(m, n), \quad y^* = G(m, n), \\ 0 & \text{при } x^* \neq F(m, n), \quad y^* \neq G(m, n), \end{cases} \quad (1.17)$$

где $B(x^*, y^*) \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$; (x^*, y^*) — координаты узлов криволинейной решетки (x^*, y^* — действительные числа).

Оператор L_b описывает процесс восстановления в плоскости xy непрерывного изображения $D^*(x, y)$ по дискретным отсчетам изображения $B(x^*, y^*)$:

$$D^*(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B(m, n) H(x - F(m, n), y - G(m, n)), \quad (1.18)$$

где $H(x, y)$ — интерполирующая функция, а x, y в данном случае принимают действительные значения в области определения изображения $D(x, y)$.

Оператор L_d описывает процесс дискретизации и квантования изображения $D^*(x, y)$ в узлах регулярной квадратной решетки с координатами $x = \overline{1, X}, y = \overline{1, Y}$, в результате чего формируется цифровое нормализованное изображение:

$$D(x, y) = \begin{cases} \text{ent}[D^*(x, y) + 0,5], & x \in \{1, 2, 3, \dots, X\} \text{ и } y \in \{1, 2, 3, \dots, Y\}; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1.19)$$

Обработка по обратному закону. В данном случае процесс геометрической обработки описывается следующей последовательностью операций:

$$B(m, n) \xrightarrow{L_b} B^*(m^*, n^*) \xrightarrow{f, g} D^*(x, y) \xrightarrow{L_k} D(x, y). \quad (1.20)$$

Оператор L_b определяет процесс восстановления непрерывного изображения по отсчетам изображения $B(m, n)$, заданным в узлах квадратной решетки:

$$B^*(m^*, n^*) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B(m, n) H(m^* - m, n^* - n), \quad (1.21)$$

где m^*, n^*, B^* принимают действительные значения.

По функциям f, g для $x = \overline{1, X}, y = \overline{1, Y}$ осуществляется расчет координат точек (m^*, n^*) на изображении $B^*(m^*, n^*)$ и измерение в них значений яркости. Тем самым формируются действительные значения отсчетов изображения $D^*(x, y)$, которые с помощью оператора квантования L_k оцифровываются:

$$D(x, y) = \text{ent}[D^*(x, y) + 0,5]. \quad (1.22)$$

Таким образом, процессы геометрической обработки по технологическим схемам (1.16) и (1.20) сводятся к трем операциям:

- координатным преобразованиям с использованием прямого (1.4) или обратного (1.5) соответствия;
- передаче отсчетов яркости из плоскости исходного в плоскость преобразованного изображения;
- восстановлению элементов изображения по отсчетам, заданным в узлах прямоугольной или криволинейной решетки.

Производительность и геометрическая точность систем межотраслевой обработки во многом определяется способами и методами реализации этих операций.

Сравнение способов обработки. Каждый из рассмотренных способов имеет достоинства и недостатки. Достоинством обработки с использованием прямого координатного соответствия (1.4) является то, что естественным образом описываются процессы формирования и коррекции изображений по схеме $(m, n) \rightarrow t \rightarrow$

$\rightarrow (X, Y, Z) \rightarrow (\lambda, \varphi) \rightarrow (x, y)$, где $t, (X, Y, Z), (\lambda, \varphi), (x, y)$ — соответственно время формирования элемента изображения с координатами (m, n) , геодезические, географические и картографические координаты одноименной точки Земли. В отличие от этого, при геометрической обработке с использованием обратного координатного соответствия (1.5) необходимо выполнить переход от функций F, G к функциям f, g . Однако технологии обработки по прямому закону свойственны два серьезных недостатка. Во-первых, при переносе точек изображения $B(m, n)$ в процессе последовательного изменения $m = 1, 2, 3, \dots, M, n = 1, 2, 3, \dots, N$ в плоскость xy на изображении $D(x, y)$ могут возникать так называемые «пустоты», когда для отдельных точек не определены значения яркости. Это требует принятия специальных мер по заполнению «пустот». Во-вторых, при прямом способе обработки более сложно реализуется процедура яркостной интерполяции, поскольку восстановление изображения $D(x, y)$ осуществляется по отсчетам, расположенным в узлах криволинейной решетки. Поэтому на практике геометрическая обработка чаще всего реализуется на основе обратного соответствия (1.5). Пусть по (1.5) для целочисленных значений (x, y) получены действительные значения координат $m^* = f(x, y), n^* = g(x, y)$. В общем случае точку (m^*, n^*) окружают четыре элемента изображения $B(m, n)$ с целочисленными координатами $(m_0 = \text{ent } m^*, n_0 = \text{ent } n^*), (m_0 + 1, n_0), (m_0, n_0 + 1), (m_0 + 1, n_0 + 1)$. Из этих четырех узлов ближайшим к точке (m^*, n^*) будет узел с координатами $\hat{m} = \text{ent}(m^* + 0,5), \hat{n} = \text{ent}(n^* + 0,5)$. Наиболее часто используются три процедуры яркостной интерполяции [103, 113].

Восстановление яркости по ближайшему отсчету:

$$D(x, y) = B(\hat{m}, \hat{n}). \quad (1.23)$$

Восстановление по четырем ближайшим отсчетам:

$$D(x, y) = (1 - \varepsilon_m)(1 - \varepsilon_n) B(m_0, n_0) + \varepsilon_m(1 - \varepsilon_n) B(m_0 + 1, n_0) + (1 - \varepsilon_m)\varepsilon_n B(m_0, n_0 + 1) + \varepsilon_m\varepsilon_n B(m_0 + 1, n_0 + 1), \quad (1.24)$$

где $\varepsilon_m = m^* - m_0, \varepsilon_n = n^* - n_0$.

Восстановление по шестнадцати ближайшим отсчетам:

$$D(x, y) = \sum_{i=-1}^2 \sum_{j=-1}^2 B(m_0 + i, n_0 + j) P_i S_j, \quad (1.25)$$

где

$$\begin{aligned} P_{-1} &= \varepsilon_m(1 - \varepsilon_m)^2, & S_{-1} &= -\varepsilon_n(1 - \varepsilon_n)^2, \\ P_0 &= 1 - \varepsilon_m^2(2 - \varepsilon_m), & S_0 &= 1 - \varepsilon_n^2(2 - \varepsilon_n), \\ P_1 &= \varepsilon_m(1 + \varepsilon_m - \varepsilon_m^2), & S_1 &= \varepsilon_n(1 + \varepsilon_n - \varepsilon_n^2), \\ P_2 &= -\varepsilon_m^2(1 - \varepsilon_m), & S_2 &= -\varepsilon_n^2(1 - \varepsilon_n). \end{aligned}$$

Приведенные процедуры яркостной интерполяции соответствуют аппроксимациям нулевого, первого и третьего порядков идеально восстанавливающей функции [72]

$$H(m, n) = \frac{\sin \pi m}{\pi m} \frac{\sin \pi n}{\pi n},$$

которая практически не реализуема.

Организация геометрической обработки. Возможны три технологии геометрической обработки изображений: аналитическая; регрессионная и комбинированная. При аналитической технологии полагают, что функции (1.4) и (1.5) достаточно точно описывают процессы формирования и коррекции изображений, а влияние на точность обработки неучтенных случайных искажений не значимо. В этом случае процесс геометрической коррекции реализуется по схемам (1.16) или (1.20).

Однако на практике эти допущения часто не выполняются по двум причинам: во-первых, функции (1.4), (1.5) неточно описывают реальный процесс формирования изображений; во-вторых, этот процесс сопровождается значительными искажениями случайной природы. В этом случае решить поставленную задачу можно с помощью регрессионной технологии.

Она строится на основе определения координат множества одноименных точек на исходном изображении (m_i, n_i) , $i = \overline{1, I}$, и на карте (x_i, y_i) . Искомые функции координатной обработки $F(x, y)$, $G(x, y)$ или $f(m, n)$, $g(m, n)$ находятся в виде полиномов, коэффициенты которых определяются по методу наименьших квадратов (МНК) из условий:

$$\sum_{i=1}^I (x_i - F(m_i, n_i))^2 = \min, \quad \sum_{i=1}^I (y_i - G(m_i, n_i))^2 = \min$$

или

$$\sum_{i=1}^I (m_i - f(x_i, y_i))^2 = \min, \quad \sum_{i=1}^I (n_i - g(x_i, y_i))^2 = \min.$$

Поскольку координатные соответствия (1.4) и (1.5) описываются на практике весьма сложными нелинейными функциями, то для их полиномиального приближения требуется найти координаты десятков и сотен опорных точек (x_i, y_i) , что связано с большими временными затратами. Процесс поиска одноименных точек на снимке и карте трудно поддается автоматизации. Поэтому, в отличие от аналитической, регрессионная технология не может быть использована для оперативной обработки данных ДЗЗ.

Компромиссное решение обеспечивает комбинированная (аналитико-регрессионная) технология, при которой поставленная цель реализуется в два этапа. На первом этапе изображение $B(m, n)$ по аналитическим функциям (1.4) преобразуется в изображение $D(x^*, y^*)$, которое по геометрии более соответствует карте $K(x, y)$. Затем сопоставляются одноименные точки (x_i^*, y_i^*) изображения $D(x^*, y^*)$ и карты (x_i, y_i) , и в классе простейших функций F^* , G^* определяется геометрическое соответствие (x_i^*, y_i^*) и (x_i, y_i) . Для этого требуется небольшое число сопоставляемых точек. В результате находятся поправки к преобразованиям (1.4) в виде функций $x = F^*(x^*, y^*)$, $y = G^*(x^*, y^*)$. Окончательно закон геометрической обработки определяется как

$$x = F^*(F(m, n), G(m, n)), \quad y = G^*(F(m, n), G(m, n)). \quad (1.26)$$

При обработке с использованием обратного координатного соответствия (1.5) на первом этапе карта $K(x, y)$ преобразуется в плоскость исходного изображения к виду $K(m^*, n^*)$, где $m^* = f(x, y)$, $n^* = g(x, y)$. Затем на основе сопоставления одноименных точек преобразованной карты (m_i^*, n_i^*) и исходного изображения (m_i, n_i) по МНК находятся корректирующие функции в виде $m = f^*(m^*, n^*)$, $n =$

$= g^*(m^*, n^*)$. В итоге, уточненный закон геометрической обработки определяется как

$$m = f^*(f(x, y), g(x, y)), \quad n = g^*(f(x, y), g(x, y)). \quad (1.27)$$

Основным достоинством аналитической технологии нормализации изображений является то, что она обеспечивает оперативную обработку данных в темпе их поступления по каналу связи, так как для расчетного времени начала съемки по (1.4) или (1.5) могут быть вычислены необходимые параметры обработки. Определенные трудности связаны лишь с тем, что измерение ряда параметров, уточняющих геометрию съемки, например углов ориентации летательного аппарата и параметров орбиты, осуществляется в процессе сканирования земной поверхности. Эти измерения передаются по радиоканалу в общем потоке с видеоданными. Поэтому до сеанса связи со спутником или самолетом точно рассчитать параметры геометрической обработки, используя соотношения (1.4) или (1.5), не представляется возможным. Выход из данного положения указывает идея комбинированной модели геометрической обработки.

Здесь важно отметить два обстоятельства. Во-первых, результаты измерения параметров орбиты и углов ориентации летательного аппарата лишь незначительно отличаются от их номинальных значений. Дополнительный учет измерений этих параметров приводит, главным образом, к плоско-параллельному смещению, развороту и изменению масштаба изображения, т. е. к его линейным координатным преобразованиям. Во-вторых, измеряемые в процессе съемки параметры выступают в качестве входных переменных функций (1.4) и (1.5).

С учетом этих замечаний законы координатной обработки (1.4) и (1.5) могут быть представлены в виде:

$$x = F(m, n; \mathbf{e}), \quad y = G(m, n; \mathbf{e}); \quad (1.28)$$

$$m = f(x, y; \mathbf{e}), \quad n = g(x, y; \mathbf{e}), \quad (1.29)$$

где $\mathbf{e} = (\varepsilon_i; i = 1, 2, 3, \dots)$ — вектор отклонений измеряемых параметров p_i от номинальных значений.

В силу малости компонентов вектора \mathbf{e} из (1.28) и (1.29) в первом приближении следует:

$$x = F(m, n) + \sum_i \frac{\partial F}{\partial p_i} \varepsilon_i, \quad y = G(m, n) + \sum_i \frac{\partial G}{\partial p_i} \varepsilon_i; \quad (1.30)$$

$$m = f(x, y) + \sum_i \frac{\partial f}{\partial p_i} \varepsilon_i, \quad n = g(x, y) + \sum_i \frac{\partial g}{\partial p_i} \varepsilon_i. \quad (1.31)$$

Частные производные при номинальных значениях параметров p_i в выражениях (1.27), (1.28) можно оценить до сеанса связи со спутником через конечные разности и заблаговременно рассчитать параметры обработки. В принципе, по такой же схеме можно реализовать и более сложные нелинейные модели учета результатов измерений, оценивая частные производные более высоких порядков.

При организации геометрической обработки с использованием обратного координатного соответствия (1.5) возникает необходимость определения на основе (1.4) значений координат (m, n) для заданных значений (x, y) . Это сводится к численному решению системы двух нелинейных уравнений (1.4). Довольно просто и эффективно решить эту задачу можно с помощью метода Ньютона. Согласно этому методу

на $(i + 1)$ -й итерации уточненные значения искомым координат (m_{i+1}, n_{i+1}) для заданных значений (x, y) рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} m_{i+1} &= m_i + \frac{G'_{n_i}(F_i - x) - F'_{n_i}(G_i - y)}{F'_{m_i}G'_{n_i} - F'_{n_i}G'_{m_i}}, \\ n_{i+1} &= n_i + \frac{F'_{m_i}(G_i - y) - G'_{m_i}(F_i - x)}{F'_{m_i}G'_{n_i} - F'_{n_i}G'_{m_i}}, \end{aligned} \quad (1.32)$$

где $F_i = F(m_i, n_i)$, $G_i = G(m_i, n_i)$. Первый индекс в обозначениях производных указывает на аргумент, по которому дифференцируется соответствующая функция, а второй индекс — на номер итерации и соответствующие значения аргументов (m_i, n_i) , при которых вычисляются производные, например $F'_{m_i} = \partial F(m_i, n_i) / \partial m$. Производные в (1.32) оцениваются через конечные разности. Для реальных законов обработки $\partial F(m, n) / \partial m \gg \partial F(m, n) / \partial n$, $\partial G(m, n) / \partial n \gg \partial G(m, n) / \partial m$. Поэтому дискриминант системы уравнений (1.4) на i -й итерации, $\Delta_i = F'_{m_i}G'_{n_i} - F'_{n_i}G'_{m_i}$, всегда отличен от нуля и решение системы быстро сходится. Известно [10], что погрешности оценки корней системы уравнений (1.4) убывают по мере возрастания номера итерации i по квадратичному закону.

Поэлементная обработка. Непосредственное использование выражений (1.4) или (1.5) для определения всех элементов изображения $D(x, y)$ приводит к исключительно большому вычислительным затратам, поскольку законы геометрической обработки описываются весьма сложными многоэтапными координатными преобразованиями, а размерность лишь отдельного изображения может составлять 100 млн. отсчетов и более. В то же время функции (1.4), (1.5) на достаточно малых участках, порядка 100×100 отсчетов, могут быть представлены в виде простейших преобразований. Это создает основу для построения двухэтапной технологии геометрической обработки.

На первом этапе исходное изображение $B(m, n)$ разбивается на прямоугольные фрагменты с размерами $\Delta_m \times \Delta_n$ и по (1.4) осуществляется пересчет координат угловых точек фрагментов $m_{ij} = \Delta_m i$, $n_{ij} = \Delta_n j$ в плоскость xy : $x_{ij} = F(m_{ij}, n_{ij})$, $y_{ij} = G(m_{ij}, n_{ij})$. В результате область определения изображения $D(x, y)$ покрывается неодинаковыми четырехугольными фрагментами. Затем для каждого исходного фрагмента с координатами углов (m_{ij}, n_{ij}) , $(m_{ij} + \Delta_m, n_{ij})$, $(m_{ij} + \Delta_m, n_{ij} + \Delta_n)$, $(m_{ij}, n_{ij} + \Delta_n)$ и одноименного фрагмента в плоскости xy с координатами углов (x_{ij}, y_{ij}) , $(x_{i+1,j}, y_{ij})$, $(x_{i+1,j}, y_{i+1,j+1})$, $(x_{ij}, y_{i,j+1})$ находится аффинное или билинейное приближение функций геометрической обработки $x = F_{ij}(m, n)$, $y = G_{ij}(m, n)$, $m_{ij} \leq m \leq m_{ij} + \Delta_m$, $n_{ij} \leq n \leq n_{ij} + \Delta_n$.

На втором этапе по найденным простейшим функциям осуществляется перенос всех элементов изображения $B(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, в плоскость xy . Аналогичным образом можно организовать обработку при использовании обратного координатного соответствия (1.5).

Таким образом, процесс геометрической обработки может быть представлен в виде сложных, но редких координатных преобразований (1.4) или (1.5), число которых в тысячи раз меньше общего числа точек изображения, и в виде простейших массовых преобразований всех элементов изображения. В результате скорость обработки, главным образом, определяется временем выполнения массовых преобразований. При этом необходимая точность обработки обеспечивается соответствующим выбором размеров фрагментов Δ_m и Δ_n . Чем меньше Δ_m и Δ_n , тем, в принципе, выше

точность приближения функций (1.4). Однако при определенных размерах Δ_m и Δ_n их дальнейшее уменьшение бессмысленно, поскольку погрешность приближения становится меньше шага пространственной дискретизации изображения.

§ 1.3. Пространственная привязка изображений

Привязка по орбитальным данным. Геометрические искажения изображений проявляются двояко. Во-первых, в виде внутрикадровых искажений длин, площадей и углов по отношению к однозначным характеристикам объектов земной поверхности, закон их коррекции определяют функции (1.4) или (1.5). Во-вторых, искажения проявляются в виде ошибки определения положения всего снимка в географической или картографической системах координат, главным образом в виде смещения и поворота изображения. Коррекцию подобных искажений принято называть геодезической или пространственной привязкой изображений. Конечная цель этой операции состоит в том, чтобы каждому элементу изображения поставить в соответствие географические или картографические координаты, т. е. осуществить его привязку к поверхности Земли.

Основными причинами неточной пространственной привязки данных ДЗЗ являются погрешности измерений параметров орбиты и углов ориентации летательного аппарата. Параметры орбиты определяются с помощью наземных и космических навигационных средств, а углы ориентации — с помощью соответствующих бортовых измерительных систем. Результаты измерений в соответствии с выражениями (1.28) или (1.29) учитываются при геометрической коррекции изображений, тем самым обеспечивается их начальная пространственная привязка с точностью, определяемой точностью измерений параметров орбиты и углов ориентации.

Традиционно параметры орбиты спутников определяются с помощью наземных навигационных средств [51, 55]. Для этого периодически, примерно через 10–14 дней, в геодезической системе координат измеряются вектор положения $\boldsymbol{\eta} = (X_0, Y_0, Z_0)$ и вектор скорости $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$ спутника. Эти измерения и момент времени их проведения однозначно определяют вектор параметров кеплеровской орбиты [76]: $\mathbf{K} = (a_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0, \tau_0)$, где a_0 — большая полуось; e_0 — эксцентриситет; i_0 — наклонение орбиты; Ω_0 — долгота восходящего узла; ω_0 — аргумент перигея орбиты; τ_0 — время прохождения перигея на момент времени t_0 задания начальных условий. Первые пять из этих параметров в рамках модели кеплеровской орбиты постоянны и не меняются при движении спутника, шестой параметр τ_0 определяет положение спутника на орбите в каждый фиксированный момент времени. Уточнение параметров орбиты осуществляется периодически с использованием более сложных моделей движения спутника по возмущенной орбите.

Появление спутниковых навигационных систем, таких как ГЛОНАСС и GPS, создали предпосылки для построения более точных технологий навигации летательных аппаратов и пространственной привязки данных ДЗЗ. Точность измерения $\boldsymbol{\eta}$ и \mathbf{V} в системах ГЛОНАСС и GPS сопоставима с точностью традиционно используемых наземных навигационных средств. Она составляет для X_0, Y_0, Z_0 порядка 40–100 м, для V_x, V_y, V_z порядка 10 см/с [17]. Дифференциальный режим измерений $\boldsymbol{\eta}$ и \mathbf{V} для космических объектов трудно реализовать. Поэтому определяющей предпосылкой к построению технологий более точной оценки параметров орбиты КА

является тот факт, что данные о положении и скорости спутника передаются периодически через малые интервалы времени, обычно через каждую секунду. И хотя эти данные содержат ошибки, но за счет обработки крайне избыточного числа измерений становится возможным решить две важные задачи. Во-первых, используя те или иные процедуры фильтрации, существенно уменьшить погрешности измерений. Во-вторых, снизить погрешности оценки параметров орбиты, обусловленные различными возмущающими факторами, т. е. перейти от кеплеровской к более точной модели движения спутника по возмущенной орбите. Возможны два варианта уточнения параметров орбиты по данным навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

В первом варианте вначале осуществляется фильтрация измерений $X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}$ и формирование более точных значений $X_{0i}^*, Y_{0i}^*, Z_{0i}^*, V_{xi}^*, V_{yi}^*, V_{zi}^*$, где i соответствует моменту времени t_i ; измерения навигационных параметров. Затем по $X_{0i}^*, Y_{0i}^*, Z_{0i}^*$ и $V_{xi}^*, V_{yi}^*, V_{zi}^*$ вычисляются географические координаты λ_i, φ_i визируемой точки по известным формулам сферической геодезии [64].

Во втором варианте вначале на основе X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i} и V_{xi}, V_{yi}, V_{zi} вычисляются параметры кеплеровской орбиты $a_{0i}, e_{0i}, i_{0i}, \Omega_{0i}, \omega_{0i}, \tau_{0i}$ для различных моментов времени t_i . Затем выполняется фильтрация параметров $a_{0i}, e_{0i}, i_{0i}, \Omega_{0i}, \omega_{0i}$ с учетом того важного факта, что они характеризуют положение и форму орбиты и не зависят от времени, т. е. при изменении t_i должны оставаться постоянными, а все их изменения можно приписать к ошибкам измерений $X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}; V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}$ и действию возмущающих орбиту факторов. В результате формируются уточненные значения $a_{0i}^*, e_{0i}^*, i_{0i}^*, \Omega_{0i}^*, \omega_{0i}^*$. Наконец, по $a_{0i}^*, e_{0i}^*, i_{0i}^*, \Omega_{0i}^*, \omega_{0i}^*$ и τ_{0i} определяются географические координаты λ_i, φ_i визируемой точки.

Второй вариант, в отличие от первого, обладает несомненным достоинством в смысле выполнения оптимальной фильтрации и достижения более высокой точности оценки параметров орбиты. При использовании данных ГЛОНАСС/GPS становится возможным нейтрализовать влияние факторов, возмущающих орбиту спутника. Это реализуется путем оценки параметров $a_{0i}^*, e_{0i}^*, i_{0i}^*, \Omega_{0i}^*, \omega_{0i}^*$ на различных участках орбиты спутника, т. е. переходом от кеплеровской орбиты к модели возмущенной орбиты. Основными возмущающими факторами являются [17]: изменения гравитационного поля вследствие несферичности Земли и неравномерности распределения ее массы; притяжение со стороны Луны и Солнца; сопротивление среды при движении КА; давление солнечного света и другие физические факторы. Эти факторы действуют довольно плавно и могут быть парированы процедурой фильтрации навигационных измерений по второму варианту.

Привязка по опорным точкам. Дальнейшее уточнение пространственной привязки может быть выполнено лишь с привлечением опорной координатной информации в виде электронных карт, звезд, наземных ориентиров и др. В общем плане эта операция реализуется с помощью аналитико-регрессионной технологии, рассмотренной в п. 1.2. При этом в силе остаются два сделанные выше замечания: о малости погрешностей измерения орбитальных и угловых параметров по отношению к их номинальным значениям и о том что эти погрешности соответствуют отклонениям входных параметров функций обработки (1.4) и (1.5). Поэтому выражения (1.28)–(1.31), записанные для вектора $\mathbf{e} = (\epsilon_i; i = 1, 2, 3, \dots)$ отклонений измеряемых параметров от номинальных значений, будут справедливы и для вектора

погрешности $\sigma = (\sigma_i; i = 1, 2, 3, \dots)$ измерений этих параметров:

$$\begin{aligned} x &= F(m, n; \sigma) = F(m, n) + \sum_i \frac{\partial F}{\partial p_i} \sigma_i, \\ y &= G(m, n; \sigma) = G(m, n) + \sum_i \frac{\partial G}{\partial p_i} \sigma_i; \end{aligned} \quad (1.33)$$

$$\begin{aligned} m &= f(x, y; \sigma) = f(x, y) + \sum_i \frac{\partial f}{\partial p_i} \sigma_i, \\ n &= g(x, y; \sigma) = g(x, y) + \sum_i \frac{\partial g}{\partial p_i} \sigma_i. \end{aligned} \quad (1.34)$$

В выражениях (1.33) и (1.34), в отличие от (1.28)–(1.31), функции $F(m, n)$, $G(m, n)$ и $f(x, y)$, $g(x, y)$ описывают процессы геометрической обработки и пространственной привязки данных ДЗЗ при абсолютно точных значениях параметров орбиты и углов ориентации спутника, а суммы произведений производных на σ_i определяют совокупные погрешности привязки по соответствующим координатам.

Выражения (1.33), (1.34) записаны для некоторого фиксированного набора измерений с погрешностями $\sigma = (\sigma_i; i = 1, 2, 3, \dots)$. Обычно измерения параметров орбиты и углов ориентации выполняются для каждой строки или группы строк изображения и эти измерения передаются по каналу связи вместе с соответствующими видеоданными. Поэтому значения i -го параметра можно представить как $p_i(n) = p_i^*(n) + \sigma_i(n)$, где $p_i^*(n)$ и $p_i(n)$ — соответственно точное и измеренное значения i -го параметра при формировании n -й строки изображения, $\sigma_i(n)$ — погрешность измерения. Если измерения параметров $p_i(n)$ непосредственно использовать в качестве входных данных функций обработки (1.4) или (1.5), то случайный характер $\sigma_i(n)$ приведет к внутрикадровым искажениям изображения. Необходимо выполнить фильтрацию измерений, основываясь на том факте, что параметры орбиты и углы ориентации спутника изменяются в процессе формирования изображения достаточно плавно, а $\sigma_i(n)$ носят случайный характер. Реализация низкочастотной фильтрации требует накопления измерений, т. е. буферизации принимаемых данных и некоторой задержки их обработки по отношению ко времени приема. Такую фильтрацию можно реализовать, например, на базе МНК, формируя для определенных групп строк функции изменения параметров $p_i(n)$ в виде полиномов. По этим полиномам затем можно выполнить расчет входных параметров для функций обработки (1.4) или (1.5) и тем самым снизить искажающее влияние ошибок измерений.

Уточнение пространственной привязки. Решить задачу уточнения пространственной привязки данных ДЗЗ можно, используя два подхода.

1-й подход изложен выше при рассмотрении регрессионной и комбинированной технологии геометрической обработки изображений (п. 1.2). Он основан на нахождении функций, которые обеспечивают минимальные рассогласование координат одноименных точек на карте и скорректированном снимке.

2-й подход основан на уточнении по опорным точкам тех параметров p_i , которые оказывают определяющее влияние на неточность пространственной привязки. Необходимость решения задачи в такой постановке обусловлена тем, что часто в архивы помещаются исходные (нескорректированные) данные ДЗЗ. Для адресного размещения видеоданных их необходимо сопроводить более точными данными о параметрах орбиты и углах ориентации. Только в этом случае потребитель, указав эти пара-

метры, получит из архива изображения интересующего его района съемки. Здесь не ставится задача уточнения всех параметров орбиты и углов ориентации, решить ее не представляется возможным, поскольку изменения различных параметров, образующих некоторую группу, вызывают одинаковые по характеру геометрические рассогласования элементов снимка и карты. Можно лишь отнести эти рассогласования к изменению одного из параметров данной группы, уточнив его по опорным точкам, и тем самым повысить точность пространственной привязки изображений.

Запишем для данного случая выражение (1.4) в виде

$$x = F(m, n; \Delta \mathbf{p}), \quad y = G(m, n; \Delta \mathbf{p}), \quad (1.35)$$

где $\Delta \mathbf{p} = (\Delta p_i, i = 1, 2, 3, \dots)$ — вектор поправок к измеренным параметрам $\mathbf{p} = (p_i, i = 1, 2, 3, \dots)$. Поправки находятся на основе опорных точек карты (x_j, y_j) и одноименных точек снимка (m_j, n_j) , $j = \overline{1, J}$, из систем нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} x_j &= F(m_j, n_j) + \sum_i \frac{\partial F_j}{\partial p_i} \Delta p_i, & j &= \overline{1, J}, \\ y_j &= G(m_j, n_j) + \sum_i \frac{\partial G_j}{\partial p_i} \Delta p_i, & j &= \overline{1, J}, \end{aligned} \quad (1.36)$$

где $F(m_j, n_j)$, $G(m_j, n_j)$ — значения функций при измеренных параметрах $\mathbf{p} = (p_i; i = 1, 2, 3, \dots)$; $\partial F_j / \partial p_i$, $\partial G_j / \partial p_i$ — производные, вычисленные в точках (m_j, n_j) при тех же значениях параметров. Аналогичным образом можно выполнить оценку $\Delta \mathbf{p}$ при использовании обратного закона обработки (1.5).

Привязка по картам. В последние годы в практику ДЗЗ активно внедряется способ уточнения пространственной привязки спутниковых изображений с использованием векторных электронных карт. Этот процесс базируется на автоматической или автоматизированной идентификации объектов карты с одноименными объектами на изображении. Такая технология приводит к увеличению времени обработки данных ДЗЗ, но позволяет выполнить пространственную привязку практически с точностью, определяемой разрешающей способностью изображения и точностью карты. Для привязки обычно используются береговые линии морей, рек и озер, так как эти объекты хорошо различимы на космических изображениях, в достаточном объеме присутствуют на поверхности Земли, являются традиционным атрибутом большинства карт и характеризуются высокой временной устойчивостью. Процесс пространственной привязки снимков по электронным картам в самом общем виде реализуется следующим образом. Сначала выполняется преобразование исходного снимка $B(m, n)$ в картографическую проекцию, в которой представлена электронная карта. Полученное изображение $D(x, y)$ с помощью оператора выделения контуров переводится в бинарную форму $S(x, y) \in \{0, 1\}$, где $S(x, y) = 1$ соответствует принадлежности точки с координатами (x, y) контуру. Затем векторная карта $K(x, y)$ преобразуется в растровую форму представления. После чего изображение $S(x, y)$ разбивается на прямоугольные фрагменты и для каждого из них осуществляется поиск одноименного фрагмента на карте. В результате формируется таблица соответствия координат центральных точек одноименных фрагментов снимка и карты $(x_i, y_i) \leftrightarrow (x_i^*, y_i^*)$ и (x_i, y_i) и (x_i^*, y_i^*) — координаты центров i -й пары фрагментов карты и снимка. На основе этой таблицы по МНК формируются функции уточнения координатной привязки.

Привязка по звездам. Уточнение пространственной привязки данных ДЗЗ может быть выполнено по звездам, выступающим в качестве опорных точек. Такой подход требует установки на КА специального датчика звездного неба, который должен обладать высокими разрешением и чувствительностью; достаточно широкой полосой обзора и высокой точностью определения углов направления на звезды. Этот датчик, синхронно работая с основным сканирующим устройством, регистрирует участки звездного неба. Информация от звездного датчика должна быть с высокой точностью привязана ко времени сканирования земной поверхности и передана вместе с основными видеоданными. Для геостационарных систем ДЗЗ установка звездного датчика является необязательной, так как участок звездного неба, находящийся вне диска Земли, может быть зарегистрирован основным сканирующим устройством.

Общая технология уточнения пространственной привязки изображений по звездному небу строится следующим образом. Организуется машинный каталог звездного неба, включающий звезды до 6–8-й звездной величины. Этот каталог дополняется программными средствами, которые обеспечивают выборку фрагмента звездного неба, соответствующего заданному моменту времени начала сканирования земной поверхности. В результате обеспечивается формирование в системе координат звездного каталога uv опорного изображения звездного неба $K(u, v)$. В процессе сканирования земной поверхности синхронно формируются изображение $B(m, n)$ и изображение звездного неба $K^*(m, n)$. Далее осуществляется преобразование координат звезд опорного изображения $K(u, v)$ в систему координат звездного датчика: $m = F_m(u, v)$, $n = F_n(u, v)$, где F_m , F_n — функции, описывающие преобразования из системы координат звездного каталога в систему координат датчика с учетом геометрии его сканирования. В результате в системе координат изображения $B(m, n)$ формируется опорное изображение звездного неба $K(m, n)$. В-третьих, осуществляется поиск одноименных отметок звезд на изображениях $K^*(m, n)$ и $K(m, n)$, в результате чего формируется таблица соответствия $(m_i, n_i) \leftrightarrow (m_i^*, n_i^*)$, где (m_i, n_i) , (m_i^*, n_i^*) — координаты i -й звезды на опорном изображении $K(m, n)$ и реально полученном $K^*(m, n)$. На основе этой таблицы по МНК можно оценить углы ориентации спутника. К сожалению, не предоставляется возможным уточнить по звездам пространственное положение спутника.

Привязка по наземным ориентирам. Уточнение координатной привязки изображений можно выполнить с использованием изображений характерных наземных ориентиров, предварительно сформированных в виде эталонных опорных пиктограмм (фрагментов изображений). Поставленная задача решается на основе поиска одноименных фрагментов на реальном изображении и сопоставления их координат с координатами опорных фрагментов. Для практической реализации технологии привязки по наземным ориентирам необходимо решить две основные задачи. Во-первых, создать каталог эталонных пиктограмм, для которых с высокой степенью точности должны быть определены географические координаты. Этот каталог должен постоянно обновляться и дополняться. Во-вторых, необходимо разработать высоконадежные процедуры идентификации на реально наблюдаемом изображении опорных наземных ориентиров. Основные трудности здесь связаны с наличием геометрических, радиометрических и содержательных различий между эталонным и реально наблюдаемым изображениями, которые обусловлены неодинаковыми условиями съемки, сезонными изменениями, появлением новых объектов и др. На основе сопоставления координат одноименных фрагментов нетрудно ре-

шить задачу оценки функций координатной привязки изображения либо выполнить уточнение отдельных параметров орбиты и углов ориентации спутника.

Более подробно технология уточнения пространственной привязки изображений по опорной информации рассматривается в главе 3.

§ 1.4. Радиометрическая обработка

Типовые радиометрические искажения. При организации радиометрической обработки изображений решаются три группы вопросов:

- построение моделей различных яркостных искажений, адекватно описывающих реальные физические процессы потери радиометрического качества изображения при его формировании;
- проектирование на основе моделей искажений алгоритмов радиометрической коррекции изображений;
- оценка по скорректированным изображениям энергетических и спектральных характеристик объектов земной поверхности.

Рассмотрим вначале характерные искажения, возникающие в тракте формирования изображения (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Характерные радиометрические искажения