

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ «БУРЯТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ им. В.Р. ФИЛИППОВА»**

ОТДЕЛ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПРИ ПРЕЗИДИУМЕ БНЦ СО РАН
ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БНЦ СО РАН

П.Н. Дагуров, Т.Н. Чимитдоржиев

Методы дистанционного исследования земной поверхности

Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы
студентов

Улан-Удэ
Издательство ФГОУ ВПО БГСХА
2005

УДК 332
Д 176

Печатается по решению методического совета ФГОУ ВПО
«Бурятская государственная сельскохозяйственная
академия им. В.Р. Филиппова»

Рецензенты:

А.И. Куликов – д-р биол. наук, проф., БГСХА,
Ю.Л. Ломухин – д-р физ.-мат. наук, проф.,
ОФП БНЦ СО РАН

Дагуров П. Н., Чимитдоржиев Т. Н.

Д 176 Методы дистанционного исследования земной поверхности: Учебно-методическое пособие. – Улан-Удэ: Издательство ФГОУ ВПО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова», 2005. – 88 с.

Настоящее методическое пособие предназначено для самостоятельной работы студентов, изучающих фотограмметрию и дистанционное зондирование территорий, обучающихся по специальностям: землеустройство, земельный кадастр, городской кадастр по очной и заочной форме обучения. В пособии изложены методики и алгоритмы обработки данных дистанционного зондирования земной поверхности. Рассмотрены вопросы раздельной обработки многозональных оптических изображений и радиолокационных данных.

УДК 332

© П.Н. Дагуров, Т.Н. Чимитдоржиев, 2005.
© ФГОУ ВПО БГСХА, 2005.

Предисловие

Данное учебно-методическое пособие предназначено для студентов землеустроительных специальностей в качестве дополнительной литературы к материалам лекций по курсу «Фотограмметрия и дистанционное зондирование». В издании изложен материал общего познавательного характера. В пособии даны основные понятия и принципы дистанционного зондирования, рассмотрены методы получения изображений, изложены сведения по платформам и сенсорам. В настоящее время практически отсутствуют учебные пособия с изложением особенностей дистанционного зондирования с помощью радиоволн, которое в настоящее время приобретает все большее значение. Поэтому помимо сведений о методах зондирования в оптическом диапазоне отдельно изложены основы радиолокационного зондирования. Такой порядок изложения также обусловлен различием в методах и характеристиках дистанционного зондирования в оптическом и радиоволновом диапазонах. Описан современный способ исследования земной поверхности, а именно: метод получения цифровых моделей рельефа с помощью интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой. Ввиду ограниченности объема в пособие не вошли сведения по обработке и дешифрированию снимков. По данной важной области знаний, являющейся необходимой частью науки о дистанционном зондировании и тесно связанной с современными проблемами распознавания образов и цифровой обработки изображений, необходимо отдельное учебное пособие. Также планируется выпуск учебного пособия и собственно по фотограмметрии, где будет изложено современное состояние этой дисциплины. Необходимость такого издания актуальна в связи с развитием цифровых технологий, не нашедших еще отражения в существующих учебниках.

Введение

Дистанционное зондирование Земли – получение информации о земной поверхности (включая расположенные на ней объекты) без непосредственного контакта с ней, путем регистрации приходящего от нее электромагнитного излучения приемниками (сенсорами), установленными на аэро- и космических носителях (платформах). Аэрокосмические методы дистанционного зондирования основаны на том, что любой объект излучает и отражает электромагнитную энергию в соответствии с особенностями его физических и геометрических характеристик.

Дистанционное зондирование сегодня – это огромное разнообразие методов получения изображений практически во всех диапазонах длин волн электромагнитного спектра от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного и радиодиапазона, самая разная обзорность изображений – от снимков с метеорологических геостационарных спутников, охватывающих практически целое полушарие, до детальных съемок участка в несколько сотен квадратных метров.

Основным результатом аэрокосмического зондирования является снимок – двумерное изображение земной поверхности и расположенных на ней объектов, полученное по определенным законам путем регистрации яркости объектов и других характеристик идущего от них электромагнитного излучения.

По-настоящему широкие перспективы открылись перед дистанционным зондированием с развитием компьютерных технологий, переносом всех основных операций по обработке и использованию данных съемок на компьютеры, разработкой программных комплексов по цифровой обработке и изображений, с появлением и широким распространением географических информационных систем (ГИС).

Сейчас задачи оперативного дистанционного контроля природных ресурсов, исследования динамики протекания природных процессов и явлений, анализа причин, прогнозирования возможных последствий и выбора способов предупреждения чрезвычайных ситуаций считаются неотъемлемым атрибутом сбора информации о состоянии интересующей территории (страны, края, города), необходимой для принятия правильных и своевременных управленческих решений. Особая роль отводится авиакосмическим методам

информации в ГИС, где результаты дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса служат регулярно обновляемым источником данных, необходимых для формирования природоресурсных кадастров и других приложений, охватывая весьма широкий спектр масштабов.

Прошедшая во второй половине февраля 2005 г. в Брюсселе Международная конференция по сотрудничеству в космосе начала отчет работам по важнейшему международному проекту – развертыванию глобальной системы наблюдения Земли (ГСНЗ) как основы комплексного мониторинга природных катаклизмов. От имени правительства России руководитель Роскосмоса подписал резолюцию о создании ГСНЗ, реализовать которую планируется в течение 10 лет.

Этот факт еще раз доказывает, что все большее развитие получают инновационные технологии, связанные с применением новейших разработок в области дистанционного зондирования Земли из космоса. При помощи спутниковых данных в настоящее время возможно осуществлять космический мониторинг наводнений, пожаров, лесов, растительности и получать цифровые карты разливов рек, лесных пожаров, землепользования, ледовой обстановки и др.

Данные дистанционного зондирования широко применяются для анализа степени загрязнения земельных и водных ресурсов, в работах по оценке ущерба, нанесенного окружающей среде в результате стихийных бедствий (землетрясений, лесных пожаров, наводнений и ураганов). Спутниковые изображения служат основой для создания экологических баз данных, а также для обеспечения периодического мониторинга изменений в окружающей среде. Изображения имеют пункты геодезической привязки, что создает условия для анализа факторов, под влиянием которых происходят изменения в окружающей среде, на основе данных о земной поверхности.

Изображения, полученные с авиакосмических носителей, успешно применяются в самых различных сферах: анализ сельскохозяйственного потенциала, рациональное землепользование, исследования биологической вариативности (выделение и идентификация различных типов сельскохозяйственных культур), оценка ущерба, нанесенного угодьям. Космическая съемка представляет собой постоянно обновляемый источник информации, который может помочь предприятиям и организациям, занятым в сельском хозяйстве, при-

нимать правильные и оперативные решения в целях преодоления последствий наводнений, борьбы с сельскохозяйственными вредителями и прогнозирования урожая.

Космические изображения предоставляют обширную базу для картографирования и инвентаризации транспортной инфраструктуры: дорог, железнодорожных магистралей, водных каналов, аэропортов и портов, а также для планирования ремонтных работ.

Использование космических снимков дает возможность государственным учреждениям и организациям получить базу для обновления региональных карт в интересах планирования и мониторинга городских территорий. Муниципальные органы, работая над планированием городской инфраструктуры, получают возможность выбрать наиболее экономичный и безопасный для окружающей среды способ использования природных ресурсов. Космические изображения являются неотъемлемым элементом местного и регионального планирования, широко применяются в картографии, землепользовании, управлении водными ресурсами, налоговом управлении.

Одной из наиболее часто встречающихся сфер приложения данных дистанционного зондирования являются исследования в области природных ресурсов (нефти, природного газа, минералов и т. д.). Космические изображения используются на стадии геологоразведочных работ для оценки залежей природных ресурсов и состояния разрабатываемого пласта.

Для действительно широкого распространения методов дистанционного зондирования, которое обычно относят к так называемым высоким технологиям, необходимы следующие составляющие.

1. Космические снимки. Для пользователя доступ к аэрокосмической информации становится реальным, только когда снимки нужной детальности на интересующий его регион открыты для любой организации, отдельного гражданина, доступны по цене, и процедура получения снимков проста. Долговременная тенденция – неуклонное приближение к этим идеалам. Примерами недавнего улучшения доступа к космическим снимкам являются такие программы, как Global Land Cover Facility Мерилендского университета, Landsat.org Мичиганского университета в США и Geogratis Министерства природных ресурсов Канады, предоставляющие неограниченный доступ к растущему архиву снимков Landsat по низким це-

нам или бесплатно. В России доступ к библиотекам снимков Landsat и Terra ASTER предоставляет некоммерческое партнерство «Прозрачный мир». Все перечисленные архивы и библиотеки доступны через Интернет. Они имеют огромное значение для гражданского общества и созданы на основе прогрессивной политики совместного доступа к данным, реализуемой в программах Landsat и ASTER. Стремительное развитие Интернета в скором будущем должно обеспечить дешевое и быстрое получение этих снимков в любой точке земного шара.

Другой пример – это растущая доступность космических снимков (а точнее – потоков данных), передающихся со спутников в открытом режиме. Вначале так поступали снимки низкого разрешения с метеорологических спутников, а затем – более детальные со спутников Ресурс-О (сейчас съемки с них не ведутся) и, наконец, снимки MODIS со спутника Terra. Современные станции наземного приема снимков – это не обязательно огромные стационарные комплексы. На рынке появились небольшие мобильные станции приема на базе персональных компьютеров. Есть надежда, что вскоре некоммерческие организации, такие как школы, администрации охраняемых природных территорий и природоохранные организации смогут индивидуально или совместно владеть приемными станциями.

2. Средства обработки снимков. Для обработки снимков требуются довольно мощные компьютеры и специальное программное обеспечение. Еще недавно высокая цена и сложность средств компьютерной обработки снимков ограничивали доступ общественных организаций к ним. Теперь ситуация меняется. Персональные компьютеры становятся мощнее, а программное обеспечение проще в использовании; снижаются цены на то и другое. Эти тенденции, видимо, будут продолжаться. Доступ к средствам обработки снимков уже не должен быть препятствием для новых пользователей, хотя потребуется время для широкого распространения подходящего аппаратного и программного обеспечения.

3. Специалисты по обработке изображений. Для интерпретации и обработки космических снимков необходимы определенные навыки. Раньше их можно было получить, только пройдя специализированный курс обучения. Сейчас ситуация меняется как в связи с улучшением программного обеспечения, так и в связи с повышени-

ем общей подготовки потенциальных обработчиков снимков. Улучшение общей подготовки будет продолжаться. В будущем интерпретация космических снимков и пространственный анализ на их основе могут стать распространенным умением, по аналогии с компьютерной грамотностью.

Таким образом, современные тенденции говорят о существенном расширении круга пользователей и приложений технологии аэрокосмического зондирования. Можно полагаться на долговременное улучшение доступа к снимкам, средствам их обработки и специалистам. Многие из этих факторов находятся в позитивном взаимодействии. Например, улучшение доступа к снимкам увеличивает потребность в качественном программном обеспечении. Рост вовлеченности и уровня подготовки молодых специалистов позволит им свободно пользоваться таким обеспечением.

Трудно предсказать, какими именно будут области применения дистанционного зондирования точно так же, как десятилетия назад было трудно предсказать все области применения персональных компьютеров. Некоторые люди называли персональные компьютеры и Интернет «решением несуществующей проблемы», т. е. их область применения в начальный период казалась достаточно узкой, однако последующее развитие показало, что они позволили решить множество проблем множеству пользователей.

То же самое, по-видимому, происходит в аэрокосмическом зондировании. Многие организации, например, заинтересованы в эксплуатации собственных станций наземного приема снимков для получения недорогого и непрерывного потока высококачественной спутниковой информации. Управляющие особо охраняемыми природными территориями смогут получить средство для мониторинга изменений на их территории и в ее окрестностях. Получение снимков в режиме реального времени особенно ценно для слежения за явлениями, требующими быстрого реагирования, такими, как пожары и нелегальные врезки в трубопроводы, незаконные вырубки леса и захваты земель. Персональные приемные станции будут также полезны неправительственным организациям, в том числе природоохранным, для организации мониторинга.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

1.1. Электромагнитные волны и их свойства

Аэрокосмические методы дистанционного зондирования Земли основаны на регистрации и анализе идущего от поверхности Земли электромагнитного излучения, представляющего собой электромагнитные волны. Рассмотрим в самом общем виде основные свойства электромагнитных волн, необходимые для понимания принципов дистанционного зондирования. Уравнение волны имеет вид:

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos [2\pi (f \cdot t - r/\lambda) + \varphi], \quad (1)$$

где \vec{E} - вектор напряженности электрического поля, \vec{E}_m - векторная амплитуда напряженности, f - частота излучения, t - время, r - расстояние, пройденное волной, λ - длина волны, φ - начальная фаза; все выражение в квадратных скобках называется фазой волны.

Частота излучения f , длина волны λ и скорость распространения электромагнитных волн c ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с) связаны между собой соотношением

$$\lambda = c/f, \quad (2)$$

Например, волна с частотой $f = 10^{14}$ Гц имеет длину $\lambda = 3 \cdot 10^{-6}$ м = 3 мкм, а у волны с частотой $f = 10^9$ Гц = 1 ГГц длина $\lambda = 0,3$ м = 30 см.

Из формулы (1) следует, что волна представляет собой колебательный процесс, происходящий одновременно во времени и пространстве, так как аргумент косинуса (фаза волны) зависит от времени распространения и пройденного волной расстояния.

Из (1) также видно, что электромагнитное излучение полностью определяется следующими характеристиками: длиной волны λ (частотой f), амплитудой волны E_m , фазой волны и ориентацией вектора \vec{E}_m . В общем случае информация, переносимая волной, заключена в этих характеристиках, которые могут быть измерены и обработаны.

Ориентация вектора \vec{E} определяет поляризацию волны. Помимо вектора \vec{E} электромагнитная волна также обязательно обладает вектором напряженности магнитного поля \vec{H} . Векторы \vec{E} и \vec{H} перпендикулярны друг другу и направлению распространения. Зная величину E , всегда можно найти значение H по формуле

$$H = E/120 \pi$$

На рис. 1.1 показан мгновенный «снимок» вертикально поляризованной (вектор \vec{E} колеблется в вертикальной плоскости, вектор \vec{H} - в горизонтальной плоскости) электромагнитной волны, распространяющейся в направлении вектора \vec{P} . Этот вектор называется вектором Умова-Пойнтинга и характеризует энергию, переносимую волной. Он связан с напряженностями электрического и магнитного полей соотношением:

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Системы дистанционного зондирования регистрируют только напряженность электрического поля или яркость, пропорциональную квадрату напряженности; поэтому под электромагнитным полем далее понимается вектор \vec{E} .

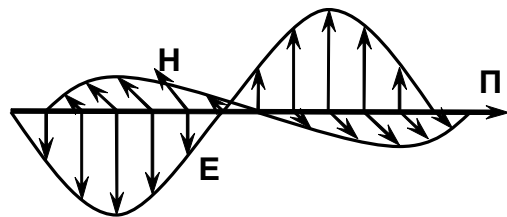


Рис. 1.1. Вид электромагнитной волны.

Отметим, что формулу (1) для краткости и симметрии в литературе обычно записывают в следующем виде (полагая, что начальная фаза равна нулю)

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos(\omega t - kr)$$

где $\omega = 2\pi f$ - круговая частота, $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число.

Электромагнитное излучение бывает когерентным и некогерентным. Когерентное излучение характеризуется тем, что имеет постоянное значение начальной фазы, например, равное нулю. Отсюда вытекает, что помимо амплитуды когерентного сигнала можно измерить его фазу и, тем самым, определить пройденное волной расстояние. Начальная фаза некогерентного излучения непрерывно изменяется случайным образом и не может нести информацию. Кроме того, некогерентное излучение, как правило, является неполяризованным. Поэтому здесь измеряемой величиной служит только интенсивность (яркость) излучения. Радиоволны (а также лазерное излучение) являются когерентными волнами, тогда как излучение

Солнца является по своей природе некогерентным, следовательно, и отраженные земной поверхностью оптические волны также будут некогерентными.

Спектр электромагнитного излучения охватывает волны длиной от фемтометров ($1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$) до тысяч километров. Он непрерывен и делится на несколько областей, иначе называемых зонами или диапазонами. Границы между ними достаточно условны и определение их у разных авторов несколько различаются. Для дистанционного зондирования используют следующие диапазоны длин волн: *ультрафиолетовый* – от 0,27 до 0,4 мкм; *видимый* – от 0,4 до 0,75 мкм; *ближний инфракрасный (ИК)* – от 0,75 до 1,3 мкм; *средний (тепловой) инфракрасный* – от 1,3 до 5,0 мкм; *дальний инфракрасный* – от 5,0 до 14 мкм; *микроволновый* – от 0,3 до 70 см.

В свою очередь, в этих диапазонах можно выделить поддиапазоны или спектральные зоны. Например, в видимом диапазоне выделяют фиолетовую зону ($\lambda = 0,40 - 0,45 \text{ мкм}$).

1.2. Влияние атмосферы на регистрируемое излучение

Земная атмосфера имеет двойное значение для дистанционных аэрокосмических методов, с одной стороны, представляет собой объект самостоятельных исследований, с другой – является источником помех и искажений при изучении земной поверхности. Поскольку нас интересует земная поверхность, рассмотрим влияние атмосферы как среды распространения электромагнитных волн на качество информации. Излучение, прежде чем попасть в регистрирующий прибор, расположенный на некоторой высоте над земной поверхностью, должно пройти сквозь атмосферу – смесь газов, в которой взвешены твердые и жидкие частицы – от тонкого аэрозоля до плотных облаков со всеми промежуточными стадиями. Основная масса атмосферы сосредоточена в нижних приземных слоях (до 10 км).

Влияние облачности. Статистика показывает, что в каждый момент времени облачность закрывает более половины площади земной поверхности, хотя над каждой ее точкой облака сохраняются обычно не более 5 дней. Даже маломощные облака блокируют все оптическое излучение. Только радиоволны длиной свыше 2 см беспрепятственно проходят сквозь облачный покров. При планирова-

нии аэрокосмических съемок приходится учитывать пространственно-временные закономерности распространения облачности в течение суток и года. Специалист должен отчетливо представлять, что на практике получить для исследований нужный снимок на заданную территорию для определенного времени года – задача непростая, прежде всего из-за облачности, которую часто называют ахиллесовой пятой космического зондирования в оптическом диапазоне.

Но даже проходя сквозь безоблачную атмосферу, электромагнитное излучение испытывает **рефракцию и ослабление**. **Атмосферная рефракция** (искривление лучей) связана с изменением коэффициента преломления в разных слоях атмосферы, что обусловлено их различной плотностью, температурой, влажностью. Из-за рефракции отклонения направления лучей доходят до нескольких угловых секунд и должны учитываться при точных фотограмметрических измерениях снимков.

Ослабление излучения в атмосфере происходит вследствие рассеяния и поглощения излучения.

При прохождении излучения сквозь атмосферу происходит его избирательное в зависимости от длины волны поглощение атмосферными компонентами, главным образом водяным паром, озоном, углекислым газом, метаном. Экспериментально выявлены четко очерченные, разные по ширине и глубине полосы поглощения в электромагнитном спектре. Зависимость поглощения атмосферных газов от длины волны имеет также тонкую структуру, т.е. много узких полос поглощения. Так, например, на участке 7–14 мкм их обнаружено около 400.

Характер **рассеяния** также в значительной степени зависит от длины волны падающего излучения и мутности атмосферы. Интенсивность избирательного рассеяния молекулами атмосферных газов (так называемое рассеяние Релея) очень быстро возрастает с уменьшением длины волны излучения. Наиболее сильно молекулами рассеивается коротковолновое оптическое излучение (этим объясняется голубизна неба). Аэрозольное рассеяние (рассеяние Ми) при размерах частиц порядка длины волны рассеивает все падающее излучение. Оно оказывает значительно большее влияние на результаты аэрокосмических съемок, чем молекулярное.

Аэрозольное рассеяние излучения частицами влаги и пыли,

прежде всего коротковолнового, при прохождении через слой атмосферы приводит к свечению слоя – воздушной дымке, яркость которой зависит от состояния атмосферы, высоты Солнца и направления визирования. Необходимо учитывать различия в локальной задымленности атмосферы. Значительная дымка отмечается над промышленными и лесными районами. Она возрастает к вечеру. Задымленность атмосферы летом больше, чем зимой. Для ослабления отрицательного влияния воздушной дымки при аэрокосмических съемках применяют светофильтры, отсекающие фиолетовые и синие лучи.

Спектральная прозрачность атмосферы. Атмосфера подобно фильтру пропускает лучи различных длин волн избирательно, селективным образом. Для ультрафиолетового излучения атмосфера непрозрачна. По мере перехода в длинноволновую часть располагаются участки спектра — окна прозрачности, где коэффициент прозрачности атмосферы достаточно велик, хотя и не всегда равен единице (рис. 1.2). Наибольшее практическое значение имеет окно прозрачности в видимом диапазоне с прилегающей частью ультрафиолетовой зоны и ближней инфракрасной зоной (0,3–1,3 мкм), а также два окна в тепловом инфракрасном диапазоне (3–5 и 8–14 мкм).

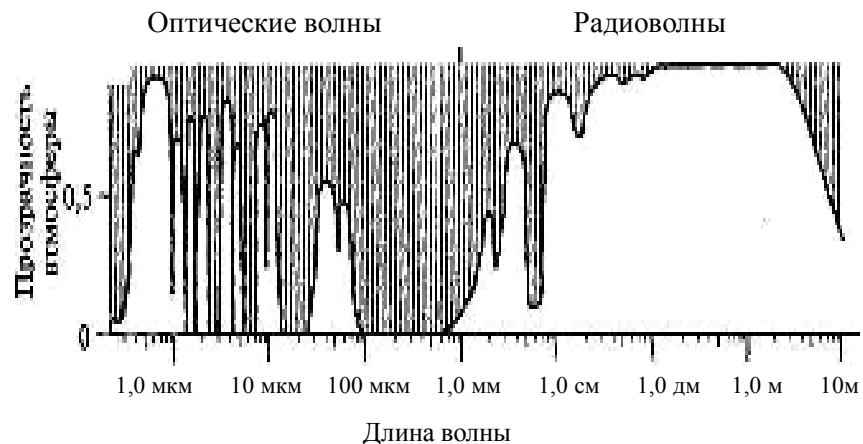


Рис. 1.2. Прозрачность атмосферы для оптических и радиоволн

Большое окно прозрачности в зоне 50 мкм в аэрокосмическом зондировании пока не используется из-за отсутствия приемников излучения. В микроволновом диапазоне при длинах волн свыше 1–2 мм атмосфера опять становится прозрачной. Метровые радиовол-

ны беспрепятственно проходят всю толщу атмосферы. С дальнейшим увеличением длины радиоволн усиливается их отражение от ионизирующих слоев атмосферы и дециметровые волны с длиной волны свыше 10 м уже не могут проникнуть сквозь ионосферу. Для радиоволн этих длин атмосфера полностью непрозрачна.

Проникновение солнечного излучения в воду. Закономерности поглощения и рассеяния света для воды подчиняются тому же закону, что и для атмосферы. Водная толща ослабляет яркость, контраст и четкость наблюдаемых подводных объектов. Интенсивность проникающего в воду солнечного излучения падает, а спектральный состав изменяется. Инфракрасное излучение полностью поглощается поверхностными слоями воды. Для прозрачных вод, когда практически отсутствуют взвеси и фитопланктон, красные лучи проникают на глубину до 10 м, желтые – до 20 м и только сине-голубые лучи достигают глубины 50 м. Интенсивность света здесь уменьшается в 100 раз. На больших глубинах дно солнечным светом практически не освещается.

1.3. Солнечное излучение и его взаимодействие с земной поверхностью

Основным естественным источником освещения земной поверхности является Солнце, которое излучает непрерывный спектр электромагнитных волн – от ультрафиолетовых до радиоволн. Основная энергия приходится на излучение с длинами волн 0,3 – 3 мкм, причем максимум энергии – на волны длиной около 0,5 мкм. Для количественных характеристик взаимодействия излучения с объектами используют как абсолютные, так и относительные величины. Для абсолютных измерений интенсивности излучения применяют две системы – световую, или фотометрическую (в люменах), – только в видимом диапазоне, и энергетическую или радиометрическую (в ваттах), – во всех диапазонах электромагнитного спектра. При относительных измерениях исследуют коэффициенты отражения, поглощения, рассеивания и пропускания, значения которых в сумме всегда составляют единицу (закон сохранения энергии). Для аэрокосмического изучения земной поверхности, понимаемой в широком смысле (вместе со всеми объектами на ней), наибольший интерес представляет отраженное излучение, определяющее ее оптические

характеристики.

Оптические характеристики объектов. Первостепенной оптической отражательной характеристикой объектов является их яркость. На нее влияет освещенность, которая складывается из освещенности прямым солнечным светом, рассеянным светом небосвода и светом, отраженным от соседних объектов. Для объектов земной поверхности наиболее важны коэффициенты интегральной и спектральной яркости, яркостный контраст и индикатриса отражения.

Коэффициент интегральной (ахроматической) яркости ρ характеризует относительную величину отраженного потока излучения в заданном направлении по сравнению с освещающим потоком; он определяется как отношение яркости объекта B к яркости абсолютно белой матовой поверхности B_0 :

$$\rho = B/B_0$$

В табл. 1.1 приведены значения некоторых коэффициентов интегральной яркости ρ , определенных в отвесном направлении, которые свидетельствуют об их значительном колебании у различных объектов. Но и для одного и того же объекта коэффициент ρ не строго постоянен, а может меняться в определенных пределах.

Таблица 1.1

Коэффициенты интегральной яркости некоторых объектов (видимый диапазон)

Объект	ρ	Объект	ρ
Снег свежеснеженный	1,00	Лес лиственный	0,07
Лед речной	0,30	Лес хвойный	0,05
Вода	0,03	Луг суходольный	0,07
Песок кварцевый	0,20	Дороги грунтовые на суглинке и песке	0,20
Почва серая лесная	0,15	Дороги грунтовые на черноземе	0,08
Почва чернозем	0,03	Шоссе	0,30

Необходимо учитывать, что абсолютная величина яркости, определяемая отражательными свойствами объекта, функционально зависит еще и от относительного положения Солнца, съемочной

системы и объекта, а также от наклона отражающей поверхности, т. е. от рельефа местности. Поэтому склоны на местности с одинаковыми отражательными свойствами, но разными углами наклона будут иметь разную яркость и изобразятся на снимке разным тоном. Таким образом, на яркостное поле местности существенно влияют рельеф и условия освещения.

Индикатриса отражения. Совокупность коэффициентов яркости объекта по разным направлениям изображают графически в виде полярной диаграммы – индикатрисы отражения или рассеяния, которая представляет собой огибающую концов векторов, направления которых показывают направления рассеяния излучения, а их длины пропорциональны коэффициентам яркости.

На практике встречаются следующие виды индикатрис отражения. Свойством зеркального отражения в основном обладают спокойная водная поверхность, ледяной покров, накатанные грунтовые дороги (рис. 1.3 а).

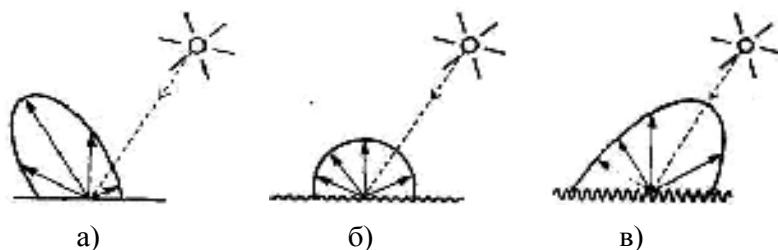


Рис. 1.3. Индикатрисы отражения: а) гладкой; б) мелкошероховатой (матовой); в) крупношероховатой (расчлененной) поверхности

Максимум индикатрисы совпадает с направлением зеркального отражения. Мелкошероховатые поверхности отражают свет равномерно (диффузно) во все стороны (рис.1.3 б). Такую индикатрису, называемую *ортотропной*, должен иметь рассеиватель, принимаемый в качестве эталона. В природе к нему приближаются ровные песчаные поверхности. Объекты с крупными шероховатостями, расчлененной поверхностью имеют индикатрису отражения, вытянутую к источнику света, т.е. противоположную индикатрисе зеркальной поверхности (рис. 1.3в). Максимальная яркость таких объектов (вспаханная почва, крупноструктурный растительный покров) наблюдается со стороны падающих лучей.

В общем случае любое отраженное излучение состоит из двух компонент – зеркальной и диффузной. Поэтому для многих природных объектов характерны смешанные индикатрисы отражения, например, с двумя максимумами: один направлен в сторону зеркального отражения, другой к источнику света (Солнцу). Индикатрисы отражения оказывают влияние на особенности изображения одной и той же местности на снимках, полученных при разных направлениях съемки.

Коэффициент спектральной яркости. На земной поверхности наиболее распространены окрашенные (хроматические) объекты. Считается, что природная палитра земной поверхности включает около 60 000 цветовых оттенков. Яркость таких объектов в разных спектральных зонах неодинакова и характеризуется коэффициентами спектральной яркости r_{λ} , которые в отличие от коэффициентов интегральной яркости определяются для конкретной длины волны или, точнее, для достаточно узкого диапазона длин волн. Значения коэффициентов спектральной яркости для в зависимости от длины волны представляют в форме графика — *кривой спектральной яркости*. На знании спектральной яркости объектов основаны различные способы, приемы получения и обработки также аэрокосмических снимков, в том числе и автоматическое распознавание объектов. Поэтому изучение спектральной отражательной способности различных объектов представляет собой одну из задач дистанционного зондирования.

Спектральная отражательная способность природных объектов. По спектральной яркости в видимом диапазоне, где получен наибольший объем экспериментальных данных, все многообразие объектов земной поверхности отчетливо делится на несколько классов, каждый из которых отличается по характеру спектральной отражательной способности (рис. 1.4).

Горные породы и почвы характеризуются увеличением коэффициентов спектральной яркости по мере приближения к красной зоне спектра. Спектральная яркость горных пород зависит от входящих в их состав минералов и элементов, а почв – от содержания соединений железа и гумуса.

Растительный покров отличается характерным максимумом отражательной способности в зеленой (0,55 мкм), минимумом – в

красной (0,66 мкм) и резким увеличением отражения в ближней инфракрасной зоне. Низкая отражательная способность вегетирующих растений в красной зоне связана с поглощением, а ее увеличение в зеленой зоне — с отражением этих лучей хлорофиллом. Большие коэффициенты яркости в ближней инфракрасной зоне объясняются пропусканием этих лучей хлорофиллом и отражением их от внутренних тканей листа.

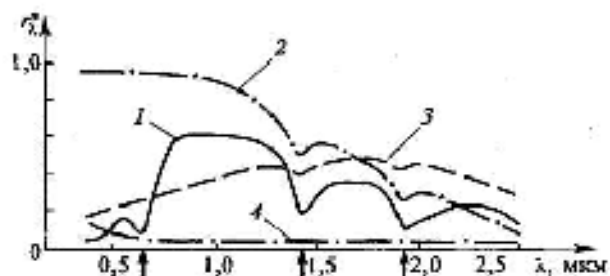


Рис. 1.4. Кривые спектральной яркости природных объектов:

1 — растительный покров; 2 — снежные поверхности; 3 — горные породы и почвы; 4 — водные поверхности. Стрелками показано поглощение хлорофиллом на длине волн 0,66 мкм, водой на волнах 1,43 мкм и 1,93 мкм.

Водные поверхности характеризуются самыми низкими значениями и монотонным уменьшением отражательной способности от сине-фиолетовой к красной зоне спектра, поскольку длинноволновое излучение сильнее поглощается водой.

Снежный покров обладает наиболее высокими значениями коэффициентов спектральной яркости с небольшим их понижением в ближней инфракрасной зоне спектра. Близки к этому классу по характеру отражения облачные образования, которые имеют несколько узких полос поглощения в длинноволновой части спектра.

Общим для всех объектов является понижение коэффициента спектральной яркости в зоне 2–3 мкм. Обращают на себя внимание два минимума у кривых при длинах волн 1,43 и 1,93 мкм, обусловленные полосами поглощения воды. Особенно они заметны у кривой отражения зеленой растительности, где они добавляются к уже отмеченному минимуму в зоне 0,66 мкм.

Спектральная отражательная способность, по которой разделены классы, различается и у объектов внутри класса (рис. 1.5, 1.6).

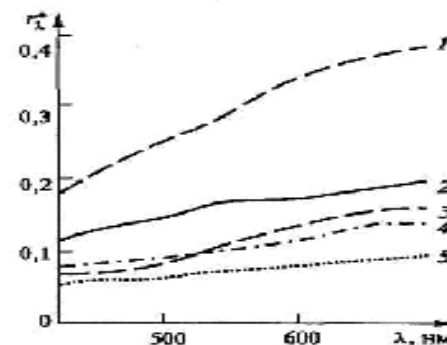


Рис. 1.5. Кривые спектральной яркости основных типов почв: 1 — серозем; 2 — дерново-подзолистая; 3 — темно-каштановая; 4 — темно-серая лесная; 5 — чернозем

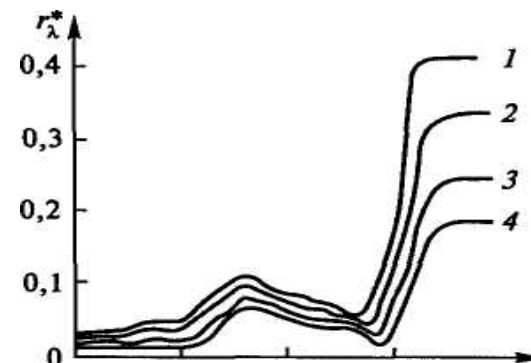


Рис. 1.6. Кривые спектральной яркости основных пород деревьев: 1 — береза; 2 — дуб; 3 — сосна; 4 — ель.

Кроме того, коэффициенты спектральной яркости могут изменяться в определенных пределах для одного и того же объекта. Так, на отражательную способность горных пород влияют запыленность, различные поверхностные образования, спектральное отражение которых по сравнению с исходной породой может существенно отличаться. При повышении влажности почв их яркость уменьшается (при полном насыщении водой — в два раза), но характер кривой спектральной отражательной способности не меняется.

Спектральная яркость растений меняется с их возрастом: она выше у молодых растений и ниже у находящихся в стадии полной зрелости. Отражательная способность растительности зависит от фитопатологических изменений. При заболевании растения его листья начинают слабее поглощать красные и отражать инфракрасные лучи. Из всех объектов суши растительный покров имеет наиболее информативные спектральные характеристики, которые чутко реагируют на его изменчивость.

Отражательная способность водных объектов сильно зависит от содержания в воде фитопланктона и ее загрязнения — наличия взвешенных частиц, нефтяной пленки и т.д.

Загрязнение снега и содержание в нем воды также приводят к изменениям отражательной способности. При насыщении снега водой отражение ближнего и среднего инфракрасного излучения резко падает.

Таким образом, спектральная отражательная способность зависит от свойств объектов, их состояния, а также от сезона. Дистанционно опознавать объекты и оценивать их состояние возможно не только по величине коэффициента спектральной яркости, но и по спектральной индикатрисе отражения. Существует много объектов на земной поверхности, которые по разным направлениям отражают излучение разного спектрального состава. Например, в составе отраженного излучения поля цветущего подсолнуха в восточном направлении преобладают оранжево-красные лучи, а в западном — зеленые. Поэтому коэффициенты спектральной яркости природного объекта, измеренные при визировании под разными углами к земной поверхности, могут служить его количественными спектральными признаками.

Понятие о пространстве спектральных признаков. Помимо представления коэффициентов спектральной яркости в виде кривых спектральной яркости их применяют для характеристики объекта в так называемом пространстве спектральных признаков, представляя графически соотношения спектральных яркостей в наиболее информативных спектральных зонах. Для этого значения коэффициентов спектральной яркости в выбранных зонах, например, красной и ближней инфракрасной, откладывают вдоль разных осей прямоугольной системы координат на плоскости, которая в этом случае представляет

двумерное пространство спектральных признаков (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Пространство спектральных признаков: а — представление трех разных сельскохозяйственных культур в двумерном пространстве спектральных признаков по данным многократных измерений; б — кривая развития зерновой культуры в двумерном пространстве спектральных признаков: 1 — почва; 2 — всходы; 3 — колошение; 4 — молочная спелость; 5 — восковая спелость; $r_{ик}$, r_k — коэффициенты спектральной яркости соответственно в ближней инфракрасной и красной зонах спектра

Положение полученной точки, которое определяется двумя плоскими координатами или, как чаще говорят, вектором, характеризует конкретный объект или его состояние. Поскольку, как уже отмечалось, спектральные яркости одного и того же объекта обычно варьируют в некоторых пределах, то в пространстве спектральных признаков такому объекту будет соответствовать не одна точка, а целая область (рис. 1.7, а). Если же при наблюдении изменяющегося объекта в течение определенного времени получена серия значений спектральной яркости, то их набор позволяет построить кривую, форма которой в пространстве спектральных признаков еще более надежно идентифицирует объект. При дешифрировании снимков даже выделяют особый дешифровочный признак, который называется временным образом объекта. Например, изменение спектральной яркости сельскохозяйственной культуры в течение года иллюстрирует так называемая кривая ее развития, т.е. временной образ культуры (рис. 1.7, б).

Общее представление о пространстве признаков, которое может быть многомерным, является принципиально важным и широко применяется при компьютерной обработке снимков.

Распространено также использование величин коэффициентов

спектральной яркости для получения информативных количественных спектральных показателей – так называемых индексов – путем простых арифметических вычислений. При этом используется разность или отношение двух коэффициентов, отношение их разности к сумме и т.д. Предложено достаточно много таких показателей. Среди них – вегетационные индексы, например, нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI, коррелирующий с запасами растительной биомассы:

$$NBVI = (r_{ик} - r_{к}) / (r_{ик} + r_{к})$$

где $r_{ик}$ и $r_{к}$ – коэффициенты спектральной яркости в ближней инфракрасной и красной зонах спектра.

1.4. Собственное излучение Земли

Земля как любое тело с температурой, отличной от абсолютно нулю, является источником электромагнитного излучения во всем диапазоне волн, однако распределение энергии по спектру неравномерно и определяется законом Планка, а также зависит от так называемой излучательной способности. В соответствии с температурой Земли, максимум энергии земного излучения приходится на инфракрасные лучи с длинами волн 9(50° C) – 12 мкм(-50° C). Земное тепловое излучение, простираясь в сторону более коротких инфракрасных волн, становится слабее и при длине волны 3 мкм имеет интенсивность, примерно одинаковую с инфракрасным солнечным излучением. В сторону длинных волн оно распространяется на радиодиапазон и его удается регистрировать даже на метровых радиоволнах. Уходящее излучение Земли, как и регистрируемое излучение техногенного происхождения, можно условно разделить на инфракрасное и радиотепловое.

Инфракрасное излучение. Зависимость интенсивности инфракрасного излучения от температуры объектов лежит в основе дистанционных методов ее определения (тепловая съемка). Однако по зарегистрированному тепловому излучению определяется так называемая радиационная температура, которая обычно ниже физической, поскольку она зависит еще и от излучательной способности объекта, и от ослабления излучения в атмосфере. Но даже в случае регистрации не самих температур, а только температурных (радиационных) контрастов, возможно эффективное выделение объектов

и определение их характеристик. По температурным контрастам удается выделять вулканы, течения в океане, обнаруживать зоны подземных пожаров и т. д. У многих объектов утром и вечером наблюдается явление инверсии температурных контрастов. Например, поверхностные воды ночью теплее, а днем холоднее окружающей суши; в дневные часы хвойная растительность холоднее лиственной, а в ночные — наоборот. Большое влияние на температурные контрасты оказывает влажность поверхности в связи с ее охлаждением при испарении. Так, в утренние часы хорошо выделяются холодные увлажненные участки местности. Одной из причин температурных контрастов является конвективный тепловой поток из недр Земли, который нередко связан с тектоническими нарушениями.

Кроме того, различная зависимость излучательной способности разных объектов открывает возможности их идентификации (рис. 1.8).

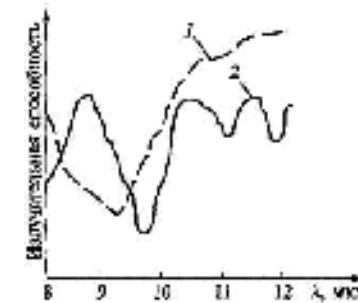


Рис. 1.8. Спектральная излучательная способность некоторых горных пород: 1 – песчаник; 2 – базальт

Радиотепловое излучение. Как уже отмечалось, нагретые объекты излучают энергию и в радиодиапазоне, хотя радиотепловое излучение по интенсивности значительно уступает тепловому излучению в инфракрасном диапазоне. Радиотепловое излучение, как и инфратепловое, формируется поверхностным излучательным слоем, так называемым скин-слоем, толщина которого тем больше, чем длиннее волна излучения. Интенсивность радиотеплового излучения характеризуется так называемой радиояркостной температурой $T_{я}$ – произведением абсолютной температуры и коэффициента излучения. Величина коэффициента излучения в радиодиапазоне зна-

чительно варьируется в зависимости от электрических свойств (а значит, от влажности и солености), структуры и характера поверхности объекта. Наибольшее его значение имеет растительность (0,9), затем следуют почвы (0,8), водные поверхности (0,3) и, наконец, металлические предметы. Таким образом, различия в радиояростной температуре земных объектов определяются в основном их излучательной способностью, а не физической температурой. Так, наибольшую радиояростную температуру летом имеет растительный покров (300 °К) и значительно меньшую – водные поверхности (100 °К). Однако самые «холодные» в радиодиапазоне – металлические предметы.

На радиояростную температуру акваторий оказывает существенное влияние волнение, так как пенистые гребни имеют более высокий коэффициент излучения, чем вода. Радиояростная температура льда обычно на несколько десятков градусов выше, чем воды. Излучательная способность различна у однолетнего и многолетнего льда.

На радиационные характеристики почвенного покрова в микроволновом диапазоне наибольшее влияние оказывает влажность почв. Изменение интенсивности радиоизлучения сухой почвы и почвы в состоянии полной влагоемкости достигает 100 °К. Поэтому по радиотепловому излучению удается определять влагосодержание почвы.

Растительный покров в радиодиапазоне обладает наиболее высокими излучательными свойствами, которые приближаются к свойствам идеального излучателя – абсолютно черного тела. Его радиояростная температура увеличивается пропорционально высоте и густоте растений. Радиотепловое излучение почвенно-растительного покрова различных природных зон (тайга, тундра, степь, пустыня) заметно различается. Оно имеет также выраженный годовой ход с максимумом в летний период.

Опыт показывает, что радиотепловое излучение, регистрируемое при разных длинах волн, целесообразно использовать для характеристики вполне определенных объектов и явлений. Так, миллиметровые волны наиболее пригодны для изучения атмосферы, сантиметровые – льдов, дециметровые – солености водоемов и т.д.

1.5. Основные понятия дистанционного зондирования

В задачах землеустройства и кадастра и других приложениях аэрокосмических методов специалист черпает информацию из *сним-*

ков, которые получают с помощью съемочной аппаратуры, удаленной на многие километры от изучаемого объекта. *Снимок*, т.е. двумерное изображение земной поверхности, является основным продуктом аэрокосмического мониторинга. Он получается в результате дистанционной регистрации техническими средствами собственного или отраженного излучения и предназначается для обнаружения, качественного и количественного изучения объектов, явлений и процессов путем дешифрирования, измерения и картографирования. Аэрокосмические снимки имеют большую познавательную ценность, усиленную их особыми свойствами, такими как большая обзорность, комплексное отображение всех компонентов геосферы, регулярная повторяемость через определенные интервалы времени, оперативность поступления информации, возможность ее получения для объектов, недоступных изучению другими средствами.

Дистанционное зондирование как наука обязана изобретению фотографии. Появилась наземная фототеодолитная съемка, при которой по *перспективным фотоснимкам* составляли карты горных районов. Развитие авиации обеспечило получение *аэрофотоснимков* с изображением местности сверху, в плане. Это вооружило науку о Земле мощным средством исследований – аэрометодами. Дальнейшее развитие науки и техники привело к появлению космических методов зондирования. *Космические снимки* предоставляют геоинформацию для решения проблем как глобального, так регионального уровней. В настоящее время в мировой практике используются и аэроснимки, и космические снимки, но доля космических снимков имеет устойчивую тенденцию к увеличению.

История развития аэрокосмических методов свидетельствует о том, что новые достижения науки и техники сразу же используются для совершенствования технологий получения снимков. Так произошло в середине XX в., когда такие новшества, как компьютеры, космические аппараты, оптико- и радиоэлектронные съемочные системы, совершили революционные технологические преобразования в традиционных аэрофотометодах. Это нашло отражение в появлении и широком распространении обобщающего термина *remote sensing*, который переводится как *дистанционные методы* или *дистанционное зондирование*.

В общем случае дистанционные методы понимают как любое

изучение объекта, осуществляемое на расстоянии, без непосредственного с ним контакта. Например, методы исследования морского дна с применением акустического гидролокатора относятся к дистанционным. Далее под дистанционными методами понимаются аэрокосмические методы, когда информация об удаленном объекте (местности) передается с помощью электромагнитного излучения. Зарегистрированные физические параметры излучения, функционально зависящие от биогеофизических характеристик, свойств, состояния и пространственного положения объекта исследования, позволяют изучать его косвенно. В этом заключается сущность аэрокосмических методов.

Электромагнитное излучение разных спектральных диапазонов содержит взаимодополняющую информацию об объектах и явлениях на земной поверхности. Одновременная регистрация излучения в нескольких спектральных зонах (*многозональный принцип*) позволяет получить наиболее разностороннюю характеристику местности.

В зависимости от устройства используемой аппаратуры регистрируется излучение в отдельных *точках* земной поверхности, вдоль *трассы* или на определенной *площади*. Во всех случаях фиксируется излучение от элементарных площадок объекта, конечные размеры которых (*пространственное разрешение на местности*) зависят от расстояния до них и совершенства регистрирующей аппаратуры.

Ведущее место в аэрокосмических методах занимает изучение объекта по *снимкам*, поэтому главная их задача заключается в целенаправленном получении и обработке снимков. Аэрокосмические съемки выполняются с помощью специальной съемочной аппаратуры, чаще всего – *фотографических камер, сканеров и радиолокаторов*, которые иногда объединяют общим названием *сенсоры* (от англ. Sensor – чувствительный элемент). Принцип их работы изложен в следующем разделе. Съемочная аппаратура, позволяющая одновременно получать снимки в нескольких спектральных зонах, называется *многозональной*, а в десятках и сотнях очень узких спектральных зон – *гиперспектральной*.

Принцип *множественности*, или *комплексности*, аэрокосмических исследований предусматривает использование не одного снимка, а их серий, различающихся по масштабу, обзорности и разрешению, ракурсу и времени съемки, спектральному диапазону и поля-

ризации регистрируемого излучения.

Во взаимодействии аэрокосмического зондирования с науками о Земле наблюдается определенная двойственность. С одной стороны, аэрокосмические методы можно отнести к какой-либо конкретной науке, использующей их для исследования своего предмета. Поэтому вполне правомерно появление таких разделов наук, как спутниковая метеорология, аэрофототопография, космическая океанология и др. С другой стороны, теоретическое обобщение конкретных приложений способствует становлению аэрокосмического зондирования как самостоятельной дисциплины, которая имеет практическое приложение в сферах других наук.

Вся обработка видеoinформации, полученной со спутников, делится на *предварительную* (межотраслевую) и *тематическую* (отраслевую). Предварительная обработка заключается в приведении материалов космических съемок к виду, наиболее пригодному для последующего тематического анализа и интерпретации отраслевыми потребителями. Она предусматривает устранение неизбежных искажений и помех снимков, обусловленных как техническими причинами, так и природными факторами. Это так называемая *коррекция* снимков, которая бывает *геометрической* и *радиометрической*.

Результаты съемок, прошедшие предварительную компьютерную обработку, представляют в цифровом виде. Служба распространения архивированных снимков через сеть Интернет делает их доступными потребителям разных стран. Например, снимки со спутников *Landsat*, на которых отчетливо изображаются природно-территориальные комплексы — сельскохозяйственные поля, городские населенные пункты, применяются во многих странах мира для геологических, географических, экологических исследований и тематического картографирования.

Опыт эксплуатации космических систем первого поколения подтверждает, что съемки с орбитальных высот оказались весьма эффективными как для изучения Земли, так и для решения народнохозяйственных задач. Космическую съемку отличает большая обзорность, возможность охвата труднодоступных территорий, оперативность получения информации. В то же время стало ясно, что рассчитывать на всемогущество космических методов было бы ошибкой; необходимо рациональное сочетание их с другими методами

исследований.

Аэрокосмические снимки — основной результат аэрокосмических съемок, для выполнения которых используют разнообразные авиационные и космические носители. Аэрокосмические съемки, выполняемые при специально создаваемом искусственном освещении, называются *активными*, а при естественном (солнечном) — *пассивными*. К пассивным относят съемки, которые предусматривают регистрацию отраженного солнечного или собственного излучения Земли, а к активным — регистрацию отраженного искусственного излучения.

Аэрокосмический снимок — это двумерное изображение реальных объектов, которое получено по определенным геометрическим и радиометрическим (фотометрическим) законам путем дистанционной регистрации яркости объектов и предназначено для исследования видимых и скрытых объектов, явлений и процессов окружающего мира, а также для определения их пространственного положения. Однако здесь надо отметить, что пока еще не создана теория формирования аэрокосмического изображения, которая позволила бы достоверно ответить на вопросы *что* и *как* должно изобразиться на аэрокосмическом снимке. Диапазон масштабов современных аэрокосмических снимков огромен: он может меняться от 1:1000 до 1:100 000 000, т. е. в сто тысяч раз. При этом наиболее распространенные масштабы аэрофотоснимков лежат в пределах 1:5 000— 1: 50 000, а космических — 1: 2 000 — 1: 10 000 000. Все аэрокосмические снимки принято делить на *аналоговые* (обычно фотографические) и *цифровые* (электронные). Изображение цифровых снимков образовано из отдельных одинаковых элементов — *пикселов* (от англ. *picture element* — *pixel*), яркость каждого пиксела характеризуется одним числом. Аэрокосмический снимок состоит из миллионов пикселов. При выполнении практических работ приходится отличать *исходные* (*первичные*) снимки, которые получены непосредственно в результате съемки, от их копий и *преобразованных* снимков, поступающих к потребителям после предварительной обработки. При фотографической съемке исходным снимком считается оригинальный фотонегатив, при сканерной — так называемый «сырой» файл с записью изображения цифрового снимка без какой-либо его коррекции.

Аэрокосмические снимки как информационные модели мест-

ности характеризуются рядом свойств, среди которых выделяют изобразительные, радиометрические и геометрические. *Изобразительные* свойства характеризуют способность снимков воспроизводить мелкие детали, цвета и тоновые градации объектов, *радиометрические* свидетельствуют о точности количественной регистрации снимком яркостей объектов, *геометрические* характеризуют возможность определения по снимкам размеров, длин и площадей объектов и их взаимного положения. Свойства снимков, получаемых в разных диапазонах и различной съемочной аппаратурой (см. далее раздел 2), существенно различаются. Кадровые, прежде всего фотографические снимки, отличающиеся геометрической точностью, наиболее пригодны для точных измерений.

Таблица 1.2

Возможности дешифрирования некоторых объектов при различном пространственном разрешении снимков, м

Объекты	Обнаружение	Детальное опознавание	Выявление характеристик
Населенные пункты	50	10	0,7
Аэродромы	6	2	0,3
Железнодорожные пути	30	6	1,5
Мосты	6	2	1,0
Самолеты	5	1,0	0,2
Автомшины	1,5	0,3	0,1
Корабли	8	0,6	0,3

Сканерные снимки, получаемые во всех спектральных зонах оптического диапазона, включая инфракрасную тепловую, могут регистрировать больше энергетических уровней излучения и обладают наиболее высокой радиометрической точностью. Радиолокационные снимки по своим геометрическим и радиометрическим свойствам пока уступают фотографическим и сканерным, но их можно получать в любую погоду, даже когда земная поверхность закрыта сплошным облачным покровом. Важными показателями снимка служат охват и пространственное разрешение (табл. 1.2). Обычно чем больше охват получаемых снимков, тем ниже их разре-

шение. Поэтому при разработке съемочной аппаратуры приходится идти на компромиссные решения либо выполнять одновременно съемку несколькими системами с различными параметрами.

Методы получения геоинформации по снимкам. Необходимая для землеустроительных и других исследований информация (предметно-содержательная и геометрическая) извлекается из снимков двумя основными методами: дешифрированием и фотограмметрической обработкой. Оба метода используют как традиционные технологии, основанные на визуальной обработке аналоговых снимков, так и компьютерные, которые автоматизируют эти процессы при работе с цифровыми снимками.

Дешифрирование, которое должно дать ответ на основной вопрос, *что* изображено на снимке, позволяет получать предметную, тематическую (в основном качественную) информацию об изучаемом объекте или процессе, его связях с окружающими объектами. В визуальном дешифрировании обычно выделяют *чтение* снимков и их *интерпретацию* (толкование). Умение читать снимки базируется на знании *дешифровочных признаков* объектов и изобразительных свойств снимков. Глубина же интерпретационного дешифрирования существенно зависит от уровня подготовки исполнителя. Чем лучше знает дешифровщик предмет своего исследования, тем полнее и достовернее информация, извлекаемая из снимка.

Фотограмметрическая обработка призвана дать ответ на вопрос, *где* находится изучаемый объект и каковы его геометрические характеристики — *размер, форма*. Она позволяет определять по снимкам плановое и пространственное положение объектов и их изменение во времени. Для фотограмметрических измерений снимков применяют специальные прецизионные оптико-механические приборы, а также компьютерные комплексы со специализированным программным обеспечением.

Компьютерные технологии. Сейчас разработаны многие сотни алгоритмов и программ компьютерной обработки изображений. Для обработки аэрокосмических снимков на персональных компьютерах можно использовать коммерческое программное обеспечение общего назначения, такое, как Adobe Photoshop, Corel PHOTOPAINT. Однако значительно большие возможности предоставляют профессиональные программные продукты, среди которых в нашей

стране наиболее известны ERDAS Imagine, ER Mapper, ENVI. Кроме того, на отечественном рынке геоинформационных услуг представлены пакеты специализированных программ, предназначенных для решения конкретных задач, например, топографического картографирования на цифровых фотограмметрических системах PHOTOMOD, Талка, ЦНИИГАиК (Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии). Современные компьютерные технологии позволяют решать следующие группы задач:

- визуализация цифровых снимков;
- геометрические и яркостные преобразования снимков, включая их коррекцию;
- конструирование новых производных изображений по первичным снимкам;
- определение количественных характеристик объектов;
- компьютерное дешифрирование снимков (классификация).

Наиболее сложной является задача компьютерного (автоматизированного) дешифрирования, которая составляет фундаментальную проблему аэрокосмического зондирования, как научной дисциплины и для решения которой прилагалось и прилагается много усилий.

При визуальном дешифрировании снимков исполнителю приходится на основе дешифровочных признаков определять, узнавать объекты, а также выделять одинаковые, однородные объекты. Для выполнения этих эвристических процедур с помощью компьютера применяют наиболее распространенный подход, основанный на спектральных признаках, в качестве которых служит набор спектральных яркостей, зарегистрированных многозональным снимком. Формальная задача компьютерного дешифрирования снимков сводится к классификации – последовательной «сортировке» всех пикселей цифрового снимка на несколько групп. Для этого предложены алгоритмы классификации двух видов – *с обучением* и *без обучения*, или *кластеризации* (от англ. *cluster* – скопление, группа). При классификации с обучением пиксели многозонального снимка группируются на основе сравнения их яркостей в каждой спектральной зоне с эталонными значениями. При кластеризации же все пиксели разделяют на группы-кластеры по какому-либо формальному признаку, не прибегая к обучающим данным. Затем кластеры, полученные

в результате автоматической группировки пикселей, дешифровщик относит к тем или иным объектам. Достоверность компьютерного дешифрирования формально характеризуется отношением числа правильно классифицируемых пикселей к их общему числу и составляет в среднем 70 – 85%, заметно падая с увеличением набора дешифрируемых объектов.

Достижения в области полной автоматизации дешифрирования, при которой можно было бы исключить или существенно ограничить участие человека в получении информации по аэрокосмическим снимкам, пока скромны. Вычислительные алгоритмы, основанные на спектральных признаках отдельных пикселей, обеспечивают решение самых простых классификационных задач; они рационально включаются в качестве элементов в сложный процесс визуального дешифрирования, которое пока остается основным методом извлечения природной и социально-экономической информации из аэрокосмических снимков. Для существенного прогресса в развитии компьютерного дешифрирования необходим переход к программному обеспечению более высокого уровня, основанному на знаниях экспертов. Специалисты в области искусственного интеллекта видят решение проблемы автоматизации дешифрирования аэрокосмических снимков в объединении формализованных знаний высококвалифицированных дешифровщиков (экспертов) с возможностями современных компьютеров, т.е. в создании компьютерных *экспертных систем*.

Эталонирование. Получить посредством дешифрирования (визуального или компьютерного) или фотограмметрической обработки необходимые характеристики изучаемого объекта только по снимкам без каких-либо натуральных полевых наблюдений в большинстве случаев невозможно. Например, для спектрометрических определений по многозональному снимку, на которых основано компьютерное дешифрирование, требуется выполнить радиометрическую калибровку снимков (их эталонирование), а для получения размера объекта по снимку фотограмметрическим способом необходима его геометрическая калибровка. Процедура получения и учета калибровочной информации составляет необходимый элемент технологической схемы аэрокосмических исследований. Эта информация обязательна для любой обработки снимков, хотя объем ее бывает раз-

личным; чем выше требуемая точность определений по снимкам, тем он значительнее. Принято различать *абсолютную* и *относительную* калибровку. При обработке одиночных снимков ограничиваются относительной калибровкой, а нескольких, например многозональных, желательна их абсолютная калибровка.

Дополнительная информация. Снимки как особая форма информации об изучаемом географическом объекте используются в комплексе с информацией других видов. Стало традицией работать одновременно с космическими снимками и картами. При тематических исследованиях по снимку обычно определяют ареал распространения явления или процесса, его контур, а для получения содержательных характеристик привлекают материалы тематических географических исследований, включая статистические. Применение снимков особенно эффективно для пространственной экстраполяции результатов локальных полевых наблюдений.

Аэрокосмическое картографирование. Итоговым звеном технологической схемы аэрокосмических исследований в задачах землеустройства и кадастра является изготовление по снимкам карт, от качества которых зависит не только их эстетическое восприятие, но и степень доверия к выполненным исследованиям. Результаты комплексных исследований, выполненных с использованием аэрокосмических снимков, представляют в виде серий взаимосогласованных тематических карт, отражающих пространственные закономерности, качественные и количественные характеристики изученной территории. Они составляют базовую основу *интегрированных ГИС*.

2. РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ. АППАРАТУРА. СЪЕМКИ. СНИМКИ.

2.1. Фотохимическая и электрическая регистрация излучения

Излучение регистрируется несколькими способами, основанными на его химическом, тепловом и электрическом действии. При этом используются различные приемники (детекторы) излучения — фотографические материалы, фотоэлектрические и термоэлектрические элементы, а также антенны в микроволновом диапазоне. Важнейшей характеристикой приемников является чувствительность —

общая и спектральная.

Наряду с техническими детекторами в аэрокосмических методах используется и очень совершенный биологический приемник – человеческий глаз. Фоторецепторы сетчатки глаза воспринимают видимый свет в диапазоне 0,38–0,75 мкм, что вызывает у нас субъективные световые и цветовые ощущения. Глаз, чувствительность которого может меняться почти в миллион раз, лучше всего воспринимает излучение с длиной волны 0,556 мкм. Поэтому зеленовато-желтый цвет виден как наиболее яркий. В современных аэрокосмических методах зрение играет исключительно важную роль для получения информации как во время аэровизуальных и космических наблюдений земной поверхности, так и в процессе камеральной обработки аэрокосмических снимков – при их дешифрировании и фотограмметрических измерениях. Поэтому особенности зрительного восприятия учитываются при конструировании приборов; они определяют оптимальные условия обработки человеком снимков и т.д.

До недавнего времени широко распространенным химическим приемником излучения служили фотографические материалы, которые применялись на многих этапах обработки аэрокосмической информации, начиная с ее регистрации и кончая представлением окончательной продукции в виде фотоснимков.

Черно-белые фотографические материалы. Основу их составляет светочувствительный фотографический (эмульсионный) слой, в котором взвешены микроскопические (около 1 мкм) кристаллы бромистого серебра. От их размера зависит чувствительность слоя: чем крупнее кристаллы, тем выше светочувствительность. С помощью современных фотоматериалов можно зарегистрировать спектральное излучение с длинами волн 0,45–0,95 мкм.

Разрешающая способность. Возможность раздельного воспроизведения мелких близко расположенных деталей изображения характеризуется разрешающей способностью. Ее определяют по фотоизображению специального стандартного тест-объекта — миры (рис. 2.1). Штриховая мира состоит из элементов с различным числом штрихов, приходящихся на один погонный миллиметр. Штрихи миры делают абсолютно белыми и абсолютно черными, т.е. их визуальный контраст $K_v = 1$. Раньше разрешающую способность измеряли в линиях на миллиметр (л/мм), в настоящее время в каче-

стве единицы измерения приняты миллиметры в минус первой степени (мм^{-1}). Когда говорят, что фотоматериал имеет разрешающую способность 50 линий на миллиметр (50 мм^{-1}), то это значит, что он может раздельно воспроизвести на одном погонном миллиметре 50 черных штрихов шириной в 0,01 мм и 50 белых штрихов такой же ширины, иначе говоря, 50 пар черно-белых штрихов.

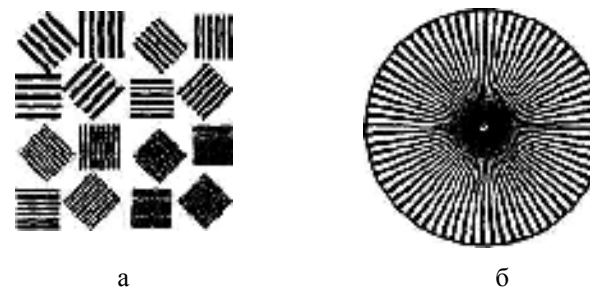


Рис. 2.1. Штриховая (а) и радиальная (б) миры для определения разрешающей способности

Цветные фотоматериалы. Для получения цветного изображения в светочувствительный фотографический слой дополнительно вводят специальную цветообразующую компоненту. Наиболее распространены компоненты, дающие желтый (Ж), пурпурный (П) и голубой (Г) цвета. Для получения цветных снимков используют многослойные (двух- и трехслойные) фотоматериалы. Трехслойное строение фотоматериала позволяет получить три точно совмещенных цветоделенных изображения, окрашенных в желтый, пурпурный и голубой цвета. Изготовление позитива на трехслойном фотоматериале аналогичного строения позволяет воспроизвести объект в цветах, близких к натуральным.

Электрическая регистрация излучения. С помощью электрических приемников излучения удается регистрировать весь спектр электромагнитных волн, используемых при аэрокосмических исследованиях. При регистрации оптического излучения ответный электрический сигнал возникает или вследствие непосредственного воздействия излучения на чувствительный элемент приемника (фотоэлектрический эффект), или вследствие его нагревания (термоэлектрический эффект). В соответствии с этим приемники излучения в оптическом диапазоне делят на фото- и термоэлектрические.

кие. Регистрация излучения в радиодиапазоне основана на возникновении переменного электрического тока в проводнике (антенне) при воздействии на него радиоизлучения (электромагнитная индукция).

Фотоэлектрические приемники, или фотоэлементы, основаны на внешнем (электровакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители) и внутреннем фотоэлектрическом эффекте (полупроводниковые фотосопротивления, фотодиоды и др.).

У электровакуумного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) чувствительный элемент делают из металла, который под действием поглощенного излучения испускает электроны. Вырванные светом электроны многократно попадают на промежуточные чувствительные элементы, что значительно усиливает вырабатываемый ФЭУ фототок. Электровакуумные фотоэлементы наиболее чувствительны к видимому излучению. Их достоинство – высокие фотометрические свойства.

В полупроводниковых фотоэлементах – фотосопротивлениях (фоторезисторах) – чувствительный элемент делается из полупроводника, который под действием излучения резко изменяет электрическое сопротивление. Различные полупроводники (селен, кремний, теллур, германий и др.) позволяют изготавливать фотоэлементы, чувствительные к видимому и инфракрасному излучению.

В неоднородных полупроводниках (например, у кремния) под действием излучения наряду с изменением сопротивления наблюдается также образование собственной электродвижущей силы (фотогальванический эффект). Это явление лежит в основе действия **фотодиодов** – небольших по размеру фотоэлементов, отличающихся высокой чувствительностью во всех спектральных диапазонах и большим сроком службы.

В настоящее время для регистрации излучения широкое распространение получили приборы с зарядовой связью, так называемые ПЗС-приемники. Это многоэлементные фотоэлектрические приемники излучения, которые состоят из миниатюрных фотодиодов, соединенных в одномерные линейки или двумерные матрицы. Размер отдельного чувствительного элемента приемника очень мал – меньше 0,01 мм. Лучшие образцы современных приемников-линеек включают более десяти тысяч, а матрицы – несколько миллионов чувствительных элементов. Цикл работы этих детекторов включает

выработку ответного электросигнала, интенсивность которого пропорциональна яркости подействовавшего на приемник света, запоминание сигнала каждого элемента и их последовательное считывание. Управляя считыванием, возможно выбирать отдельные элементы или их группы для получения результирующего сигнала. Применение многоэлементных фотоэлектрических приемников ПЗС для регистрации излучения открыло широкие перспективы в создании геометрически и радиометрически точных многозональных съемочных систем высокого пространственного разрешения, которые можно быстро адаптировать к изменяющимся внешним условиям съемки.

Общая чувствительность фотоэлектрических приемников в несколько раз выше, чем фотопленок, что позволяет вести съемку при сравнительно коротких выдержках или более низкой освещенности. Ценными их свойствами являются также чувствительность к инфракрасному излучению, возможность регистрировать более широкий диапазон интенсивности излучения, а также линейная зависимость между ответным электрическим сигналом и подействовавшим излучением.

Термоэлектрические приемники. Для регистрации теплового инфракрасного излучения применяются приемники, которые реагируют на поглощенное излучение нагреванием чувствительного элемента. Работа термоэлектрического приемника болометра основана на изменении электрического сопротивления нагреваемой зачерненной металлической фольги; в терморезисторах используют полупроводники, которые чувствительны не только к свету, но и к нагреванию (германий с включением ртути). Для надежной работы термоэлектрического приемника необходимо его глубокое (-200 °С) охлаждение. Термоприемники менее чувствительны и медленнее реагируют на воздействующее излучение, чем фотоприемники.

Важным показателем электрических приемников излучения служит внутренний шумовой ток. Чем лучше соотношение **сигнал/шум**, тем более высокое разрешение могут иметь съемочные системы с электрическими приемниками излучения.

2.2.Съемочная аппаратура

Аэрокосмические снимки получают с помощью специальной аппаратуры – съемочных систем многократного действия. Существу-

ют десятки различных съемочных систем, отличающихся по принципу действия, конструкции, назначению; среди них выделяют основные – фотографические, оптико-электронные и радиоэлектронные. В свою очередь, каждая из этих систем состоит из целого ряда взаимосвязанных приборов и устройств, но главными из них соответственно являются *фотокамеры, сканеры и радиолокаторы*, которые также имеют по несколько разновидностей. Неотъемлемой частью съемочных систем служит бортовой компьютер, управляющий их автоматической работой. Съемочная аппаратура дополняется комплексом приборов для точного определения во время полета пространственных координат и углов наклона носителя – радиовысотомерами, ГЛОНАСС/GPS-приемниками, инерциальными системами. Работа электронных съемочных систем тесно связана с бортовыми средствами передачи видеоинформации на Землю и наземными пунктами приема этой информации. Применяются два режима передачи: синхронно с выполнением съемки (в зоне прямой видимости), с предварительной записью снятой видеоинформации на запоминающие устройства на борту носителя и быстрым ее сбросом во время пролета над пунктом приема. Все съемочные системы, предназначенные для получения аэрокосмических снимков, не только регистрируют необходимую видеоинформацию, но и вносят в нее неизбежные аппаратные искажения.

Каждый аэрокосмический снимок, помимо изображения земной поверхности, содержит служебную информацию: регистрационный номер, дату и точное время съемки, параметры съемочной аппаратуры, координатные метки, калибровочные данные и другие характеристики, необходимые для его последующей обработки и практического использования.

Фотографические аппараты (кадровые и панорамные) – это распространенная и универсальная съемочная аппаратура, которая используется прежде всего для съемок с самолета. В отличие от любительских масса фотоаппаратов, предназначенных для аэрокосмических съемок, составляет десятки килограммов.

Аэрофотоаппараты. Наиболее распространенный у нас в стране размер кадра 18х18 см, хотя используются аэрофотоаппараты и с большим размером кадра, например 30х30 см. В аэрофотоаппаратах устанавливаются сфокусированные на бесконечность линзовые

объективы с фокусным расстоянием от 35 до 1000 мм (наиболее часто 70, 100, 200 мм). Формат кадра и фокусное расстояние определяют угол поля зрения аэрофотоаппарата (2ω). У узкоугольных аэрофотоаппаратов $2\omega < 40^\circ$, у широкоугольных может достигать 140° . Фотографирование производится на черно-белую, цветную или спектрально-чувствительную пленку, которая перед экспозицией тщательно выравнивается специальным устройством в плоскость. Снимок, получаемый кадровым аэрофотоаппаратом, представляет собою центральную проекцию местности. Такие снимки наиболее пригодны для фотограмметрических измерений.

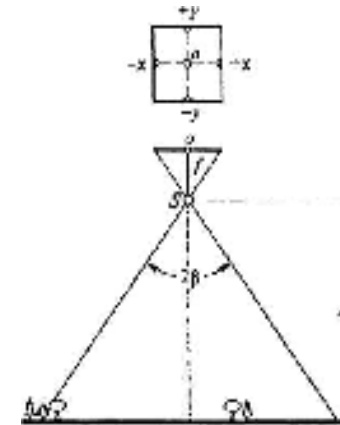


Рис. 2.2. Геометрическая схема кадровой съемки

На рис. 2.2 приведена геометрическая схема получения кадрового снимка аэрофотоаппаратом. Здесь S – центр проектирования снимка, совпадающий с центром объектива; f – фокусное расстояние камеры; o – *главная точка* снимка; H – высота фотографирования (съемки). Прямая, проходящая через главную точку снимка и центр проектирования, определяет направление съемки, и ее называют *оптической осью* камеры. На аэрофотоснимке изображаются *координатные метки*, которые фиксируют на снимке плоскую систему координат с началом в главной точке. Точное знание величин фокусного расстояния и плоских координат главной точки снимка (**так называемых элементов внутреннего ориентирования снимка**) необходимо для фотограмметрических определений.

С помощью многозональных аэрофотокамер получают снимки в нескольких узких спектральных зонах. Многозональные фотоснимки предназначены, прежде всего, для дешифрирования; для фотограмметрических измерений они применяются реже.

Космические фотоаппараты являются модификациями аэрофотоаппаратов. У нас в стране большой объем первых обзорных съемок из космоса в масштабах 1:2 000 000-1:3 000 000 выполнен космическим фотоаппаратом КАТЭ-140 с размером кадра 18x18 см. Разрешение на местности космических снимков, полученных этим аппаратом, составляет несколько десятков метров. В фотометрических камерах предусмотрено при съемке каждого кадра впечатывание в его служебное поле ступенчатого фотометрического клина, оптическая плотность каждой ступени которого точно известна. Это обеспечивает после выполнения фотометрической коррекции определение по фотоснимкам абсолютных значений спектральной яркости объектов земной поверхности с точностью около 15%, а относительных – 5 %.

При съемке с быстродвижущегося носителя изображение местности смещается во время экспонирования. Сдвиг изображения приводит к его нерезкости, существенно ухудшая качество снимка. Чем детальнее снимки, тем жестче требования к допустимому сдвигу, который не должен превышать половины величины разрешения (на снимке). Поэтому съемочные фотокамеры, предназначенные для детальных съемок, приходится снабжать специальными механизмами компенсации сдвига изображения. Так, камера МКФ-6 во время экспозиции автоматически наклоняется на небольшой угол в направлении, противоположном движению носителя.

В оптико-электронных кадровых камерах изображение регистрируется не фотографическим, а электронным способом. Устройство электронной камеры аналогично фотографической – изображение строится объективом в центральной проекции на плоскости, но вместо кассеты с фотопленкой используется электронная система, преобразующая оптическое изображение в электрические сигналы.

Основу *телевизионных* электронных съемочных камер, которые применялись в начальный период космических исследований, составляет передающая электронно-лучевая трубка. В распространенной трубке видиконе (от лат. *Video* – смотрю и греч. *Eikon* – изобра-

жение) светочувствительный экран изготовлен из полупроводника (фотосопротивления), который превращает оптическое изображение в электрическое, состоящее из положительных зарядов. Изображение последовательно считывается электронным лучом, быстро обегаящим заряженный экран. Сформированный видеосигнал передается на наземные станции по радиоканалу.

В *цифровой электронной камере*, которую все чаще называют цифровой фотокамерой, изображение местности строится на плоской поверхности многоэлементной матрицы приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы). Геометрические размеры ПЗС-матриц, а следовательно, кадра цифрового снимка, пока невелики – составляют несколько сантиметров.

Достоинства кадровых съемочных камер заключаются в практически мгновенном получении всего снимка в центральной проекции на плоскости, что обеспечивает его высокую геометрическую точность. Стремясь увеличить охват территории, приходится использовать либо широкоформатные камеры, либо широкоугольные объективы. Однако с увеличением угла поля зрения линзового объектива ухудшается равномерность освещения по кадру (которая падает к краям снимка), а также снижается разрешающая способность, что отрицательно сказывается на качестве снимка.

Панорамные фотоаппараты позволяют снимать поперек направления полета широкую полосу местности – иногда от горизонта до горизонта – при высоком фотографическом качестве снимков. Для этого в панорамном аппарате фотопленка расположена не на плоской, а на цилиндрической поверхности и изображение последовательно формируется узкой полосой (щелью) при повороте объектива камеры (рис 2.3). Однако цилиндрический панорамный снимок по своим геометрическим свойствам существенно уступает плоскому кадровому, поэтому он обычно используется не для измерений, а для визуального дешифрирования. Например, с помощью космического панорамного фотоаппарата КВР-1000 с $f = 1000$ мм и большим размером снимка 18x72 см получают панорамное изображение с разрешением на местности 2 м, предназначенное для детального дешифрирования.

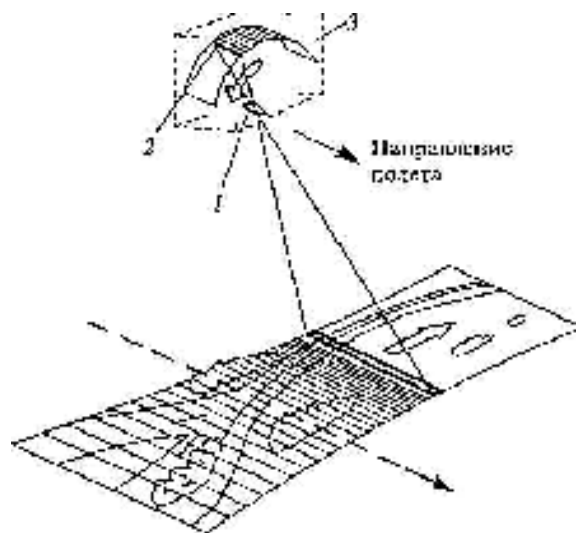


Рис 2.3. Схема получения фотоснимка при панорамной съемке.
1 – объектив, 2 – экспонирующая щель, 3 – фотопленка

Сканеры. В процессе сканирования формируются снимки, состоящие из множества отдельных, получаемых последовательно элементов изображения. Сканирование как принцип получения изображения применяется не только при съемке местности, но и в камеральных условиях, например, при цифровании фотографических снимков.

Оптико-механический сканер. Сканирующее устройство – быстро качающееся зеркало, просматривая местность поперек движения носителя, посылает лучистый поток в объектив (обычно зеркальный) и далее на точечный фотоприемник, который преобразует его в электрический сигнал (рис. 2.3). При сканерной съемке изображение местности получают в виде непрерывной полосы, состоящей из строк (сканов), которые, в свою очередь, состоят из отдельных элементов (пикселей). В пределах элемента изображения происходит осреднение яркости объектов и детали не различаются. Рассматривая сканерный снимок под увеличением, можно обнаружить регулярную пиксельную структуру его изображения, которая отсутствует на фотографических снимках.

Важные характеристики сканера *угол сканирования* (обзора) и

мгновенный (соответствующий одному элементу) *угол зрения*, которые определяют соответственно ширину полосы съемки и пространственное разрешение на местности. У детальных сканеров угол сканирования уменьшают до $\pm 5^\circ$, а у обзорных увеличивают до $\pm 50^\circ$. Мгновенный угол зрения устанавливают от секунд до нескольких минут. Чем лучше разрешение сканера и значительнее охват съемкой, тем больший объем информации необходимо передать в единицу времени по радиоканалам, которые должны быть высокоскоростными.

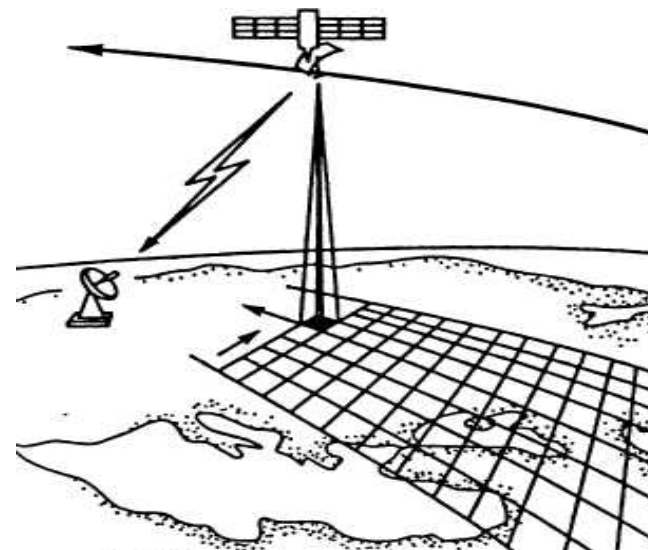


Рис. 2.3. Принцип сканерной съемки

При разрешении 100 м и охвате 200 км необходимая скорость передачи информации составляет около 1 Мбит/с (10^6 бит). Она быстро растет с увеличением разрешения и, например, при повышении разрешения вдвое составляет уже 5 Мбит/с. Спутниковые радиоканалы, которые должны обеспечить передачу этого информационного потока, нередко определяют качество получаемых снимков. Пропускная способность радиоканала зависит, в частности, от диаметра приемной антенны наземного комплекса. Так, например, если при использовании определенных технологий удастся достичь скорости потока информации до 10 Мбит/с с помощью приемной антенны с диаметром около 2 м, то при 100 Мбит/с ее диаметр не-

обходимо увеличить до 10 м. Нередко для передачи больших объемов видеoinформации ее приходится предварительно сжимать в 2–3 раза.

Разновидности сканеров. С помощью сканирующих систем не только получают снимки, но и измеряют интенсивность излучения, зарегистрированного в пределах каждого пиксела. Поэтому их также называют *сканирующими радиометрами* (фотометрами, видео-спектрометрами). В зависимости от движения сканирующего луча – по плоскости или образующей конуса – сканеры делят на линейные и конические. У *конического* сканера угол визирования и, следовательно, разрешение вдоль строки остаются неизменными, но сама строка сканирования на местности представляет собой дугу окружности. Снимки, полученные коническим сканером, имеют более высокую радиометрическую точность.

В *оптико-электронном* сканере для регистрации излучения используются приборы с зарядовой связью в виде ПЗС-линейки, которая устанавливается поперек направления движения спутника; изображение местности по строке ПЗС-снимка формируется путем одномоментного проектирования, а вдоль полета – последовательным присоединением строк при прямолинейном движении носителя. У оптико-электронного сканера в отличие от оптико-механического отсутствуют подвижные элементы, которые связаны колеблющимся зеркалом. Он более прост в устройстве и надежен в работе.

Конструкция *многозональных* сканеров, предназначенных для одновременного получения снимков в нескольких спектральных зонах, дополняется светофильтрами или диспергирующей системой (призмы, дифракционные решетки и т.д.), расщепляющей регистрируемый лучистый поток на спектральные составляющие, которые подаются на различные приемники излучения. Число приемников, их тип (спектральная чувствительность) устанавливаются в соответствии с количеством и шириной спектральных зон, в которых работает многозональный сканер.

В *гиперспектральном оптико-электронном* сканере, например, видимое, среднее инфракрасное и тепловое излучения регистрируются детекторами трех прямоугольных ПЗС-матриц; широкие стороны матриц реализуют строки снимка, а узкие, расположенные вдоль направления полета, позволяют вести регистрацию излучения в десятках узких (шириною в несколько нанометров) так назы-

ваемых гиперспектральных зон. Таким образом, в гиперспектральном сканере по одному направлению приемной ПЗС-матрицы регистрируются спектральные характеристики местности, по-другому – пространственные. Общее число зональных снимков, получаемых гиперспектральным сканером, может достигать нескольких сотен. В совокупности их представляют в виде так называемого *гиперспектрального куба*.

При тепловой инфракрасной съемке снимки получают с помощью специального сканера (*тепловизора*) с порогом температурной чувствительности 0,1–0,5 °С, который обязательно должен иметь систему охлаждения приемника.

Для пассивной съемки в микроволновом диапазоне используются микроволновые *радиометры*, у которых сканирующая поперек движения носителя колеблющаяся антенна размещена в параболическом рефлекторе. Космические микроволновые радиометры позволяют получать радиотепловые снимки пока с невысоким (в несколько километров) пространственным разрешением, которое тем лучше, чем длиннее антенна.

Принцип сканирования может применяться и при активной *лазерной съемке* с самолета, которую можно выполнять днем и ночью. Монохроматический узкий луч лазера подсветки освещает сканируемую местность и после отражения регистрируется приемником. В результате возможно получить монохроматический снимок в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне, на котором выделяются объекты с различным отражением в зоне длины волны лазерного излучения.

Все сканеры поставляют строчные снимки, которые по своим геометрическим свойствам уступают кадровым фотографическим снимкам. Однако по сравнению с фотометрическими многозональными фотокамерами сканирующие спектрометрические радиометры обеспечивают в 2–3 раза более высокую радиометрическую точность. Для получения детальных космических снимков в сканерах устанавливают длиннофокусные (до 10 м) зеркальные объективы, которые по сравнению с линзовыми имеют меньшие габариты, более высокую разрешающую способность, хотя и небольшой (10–15°) угол поля зрения.

Съемка в узких спектральных зонах, возможность быстрой передачи на Землю радиометрической видеoinформации в цифровой

форме, что необходимо для компьютерного дешифрирования – несомненные достоинства съемочных сканерных систем. В настоящее время оптико-электронные сканеры на основе ПЗС-приемников становятся основным видом космической съемочной аппаратуры, вытесняя фотографические камеры.

2.3. Аэро- и космическая съемки

Аэрокосмические съемки при выполнении задач дистанционного зондирования принято делить на ряд классов и видов в зависимости от назначения, используемых носителей, съемочной аппаратуры, технологии выполнения съемки, формы представления результатов.

Существуют несколько разновидностей **аэросъемок** с самолета: аэрофотографическая, тепловая инфракрасная, радиолокационная и др. Кроме того, аэрометоды включают ряд так называемых геофизических съемок — аэромагнитную, аэrorадиометрическую, аэроспектрометрическую, в результате выполнения которых получают не снимки, а цифровую информацию об исследуемых объектах.

Из всех аэросъемок наиболее распространенной является аэрофототопографическая съемка. В зависимости от направления оптической оси аэрофотоаппарата различают плановую и перспективную аэрофотосъемку.

При плановой (вертикальной) аэрофотосъемке оптическую ось аэрофотоаппарата приводят в отвесное положение, при которой снимок горизонтален. Однако в процессе полета по прямолинейному маршруту аэросъемочный самолет периодически испытывает отклонения, которые характеризуют углами тангажа, крена сноса (рыскания). Из-за колебаний самолета аэрофотоаппарат также наклоняется и разворачивается. Принято к плановым относить снимки, имеющие угол наклона не более 3° .

При перспективной аэрофотосъемке оптическую ось аэрофотоаппарата устанавливают под определенным углом к вертикали. По сравнению с плановым перспективный снимок захватывает большую площадь, а изображение получается в более привычном человеку ракурсе.

По характеру покрытия местности снимками аэрофотосъемку делят на одномаршрутную и многомаршрутную.

Одномаршрутная аэрофотосъемка применяется при исследованиях речных долин, прибрежной полосы, при дорожных изыскани-

ях и т.д. Наибольшее производственное применение, прежде всего для топографических съемок, получила многомаршрутная (площадная) аэрофотосъемка, при которой снимаемый участок сплошь покрывается серией параллельных прямолинейных аэросъемочных маршрутов, прокладываемых обычно с запада на восток. В маршруте на каждом следующем снимке получается часть местности, изображенной на предыдущем снимке. Аэрофотоснимки, получаемые с продольным перекрытием, образуют стереоскопические пары. Продольное перекрытие, выражаемое в процентах, устанавливается в зависимости от назначения аэрофотосъемки различным – от 10 до 80 % при среднем значении 60%. Аэрофотосъемочные маршруты прокладывают так, чтобы снимки соседних маршрутов имели поперечное перекрытие. Обычно поперечное перекрытие составляет 30 %. Перекрытие снимков позволяет объединить разрозненные аэроснимки в единый массив, целостно отображающий заснятую территорию.

Время для съемки выбирают так, чтобы снимки содержали максимум информации о местности. Учитывают наличие снежного покрова, смену фаз развития растительности, состояние сельскохозяйственных угодий, режим водных объектов, влажность грунтов и т.д. Обычно аэрофотосъемку выполняют в летние безоблачные дни, в околополуденное время, но в некоторых случаях, например, для изучения почв, лесов, предпочтение отдают позднеосенним или раннеосенним съемкам. Съемка плоскоравнинной местности при низком положении Солнца в утренние или вечерние часы позволяет получить наиболее выразительные аэроснимки, на которых микрорельеф подчеркивается прозрачными тенями. Однако освещенность земной поверхности должна быть достаточной для аэрофотографических съемок с короткими экспонирующими выдержками. Поэтому съемку при высоте Солнца менее 20° обычно не производят. По завершении летно-съемочных работ оценивается качество полученных материалов: определяется фотографическое качество аэронегативов (величина коэффициента контрастности, максимальная плотность, плотность вуали), проверяется прямолинейность съемочных маршрутов, контролируется продольное и поперечное перекрытие и др.

Космическая съемка, т.е. съемка с высоты более 150 км, выполняется со спутника, который в соответствии с законами небесной механики перемещается по строго установленной орбите. Поэтому возможности его маневрирования по сравнению с самолетом

весьма ограничены. Любой спутник-съемщик всегда должен рассматриваться с учетом параметров его орбиты.

Орбиты спутников. С точки зрения космических съемок земной поверхности важны следующие параметры орбит: форма, наклонение, высота, положение ее плоскости по отношению к Солнцу. Форма орбиты определяет постоянство высоты съемки на разных участках орбиты. Предпочтительны круговые орбиты, у которых высоты перигея и апогея одинаковы и, следовательно, одинакова высота съемки земной поверхности, а для одной и той же аппаратуры — одинаковы охват, масштаб и разрешение снимков.

Наклонение определяется углом i между плоскостью орбиты и плоскостью экватора. По наклонению разделяют орбиты экваториальные ($i = 0^\circ$), полярные ($i = 90^\circ$) и наклонные. В число наклонных орбит входят прямые ($0 < i < 90^\circ$) и обратные ($90^\circ < i < 180^\circ$). Наклонение орбиты определяет широтный сферический пояс, охватываемый съемкой.

Высота орбиты. Спутники работают на различных высотах. При низких орбитах существенно сказывается сопротивление атмосферы, при высоте менее 100 км торможение столь велико, что спутник не может совершить даже одного витка и, сгорая, падает вниз. По мере увеличения высоты увеличивается время активного существования спутников, охват съемкой, но при этом обычно уменьшается разрешение снимков. Выделяют три группы наиболее часто используемых для съемки Земли орбит — с высотами 150–500, 500–2000 и 36 000 км. Первая группа включает орбиты пилотируемых кораблей, орбитальных станций, а также спутников фотосъемки с относительно коротким временем функционирования. Во вторую группу входят орбиты ресурсных и метеорологических спутников с электронной аппаратурой. Для первых характерны высоты около 600 и 900 км, для вторых — 900–1400 км. Третья группа — это орбиты геостационарных спутников; угловая скорость движения спутника на высоте 36 000 км равна угловой скорости вращения Земли, и поэтому спутник движется синхронно с подспутниковой точкой земной поверхности. Геостационарный спутник на экваториальной орбите, как бы зависая над определенным районом Земли, обеспечивает его постоянное наблюдение.

Космические системы нового поколения. Космические технологии развиваются быстро: совершенствуются спутники, съемоч-

ная аппаратура, технологии съемки и обработки снимков. Каждый новый спутник поставляет снимки более совершенные, чем предыдущий. Но наступает время качественного скачка, переоценки используемых методов, определения наиболее перспективных.

В результате функционирования в течение четверти века космических систем первого поколения оказалось, что фотографические снимки не выдерживают конкуренции с новыми типами космической видеоинформации. Большие перспективы имеют снимки, оперативно получаемые цифровыми многозональными сканерами и всепогодными радиолокаторами. Предполагают, что они обеспечат не только создание базовых картографических основ ГИС различного уровня, но и регулярное обновление данных. Космические системы нового поколения можно разделить на системы, выполняющие глобальные съемки для исследования и мониторинга Земли в целом и локальные — для удовлетворения практических запросов.

Примером системы первого типа может служить разрабатываемая по инициативе NASA (National Aeronautics and Space Administration - Управление США по авиации и исследованию космического пространства) в международной кооперации космическая система глобального мониторинга EOS (Earth Observing System — система наблюдения Земли), которая будет функционировать в первые десятилетия XXI в. Она предназначена для комплексного планетарного дистанционного изучения Земли как единой системы. Космическая система EOS должна обеспечить науки о Земле глобальной многосенсорной информацией обо всех сторонах жизни планеты — от химического состава атмосферы до движения волн цунами в океане. Предусматривается функционирование группировки спутников, поставляющих информацию непрерывно (вплоть до 10-минутного интервала) в реальном масштабе времени. Это позволит мировому сообществу перейти от регистрации опасных природных явлений к их предсказанию на основе прогностического моделирования.

Локальные космические съемки будут оперативно выполняться спутниками с помощью цифровых сканеров, которые дают снимки, по детальности сопоставимые с аэроснимками, имеющие высокие изобразительные и измерительные свойства и обеспечивающие получение трехмерных характеристик местности. Эти снимки пригодны для кадастра и инвентаризации, для изготовления среднемасштабных и даже крупномасштабных карт, а также других точных гео-

информационных продуктов. Пока затраты на создание спутников и их эксплуатацию велики; они не компенсируются средствами, получаемыми от продажи снимков. Поэтому в период коммерциализации этой сферы удешевление будущих космических систем – важнейшая проблема, во многом определяющая направление их развития. Ее решению будет способствовать переход к малым спутникам массой в сотни килограммов (рис. 2.4), а также создание спутников двойного назначения – военного и гражданского, обеспечивающих потребности, как национальной безопасности, так и социально-экономического развития страны. Космические системы нового поколения предполагают существенное расширение в нашей стране сети федеральных, региональных и отраслевых центров приема видеoinформации со спутников.



Рис. 2.4. Вариант космической системы, включающей группировку из девяти малых спутников, функционирующих на трех орбитах с разным наклонением.

2.4.Снимки.

2.4.1. Разрешающая способность и пространственное разрешение аэрокосмических снимков.

Для характеристики детальности аэрокосмических снимков предложено несколько количественных показателей. Среди дешифровщиков наибольшее распространение получили два показателя: пространственное разрешение и разрешающая способность, кото-

рая, как показано в разделе 1, используется для оценки фотографических материалов. Этот показатель применим также для оценки объективов съёмочных камер, для характеристики способности зрительной системы человека различать детали и т.д.

Аналоговые (фотографические) снимки. Напомним, что величина разрешающей способности R , представляющая собой число белых и черных штрихов, отдельно воспроизводимых на 1 мм изображения снимка, выражается в миллиметрах в минус первой степени, а также линейной мерой l_R , равной ширине штриха миры. Эти величины связаны между собой:

$$l_R = \frac{1}{2R}$$

Разрешающая способность фотографических снимков зависит от разрешающей способности объектива съёмочной камеры $R_{об}$ и фотопленки $R_{пл}$, значения которых для лучших образцов можно принять равными 200 мм⁻¹. Полученные снимки будут иметь меньшую разрешающую способность $R_{сн}$, которая рассчитывается следующим образом:

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_f}$$

Разрешающую способность объективов и фотопленок, которая указывается в паспортах и каталогах, определяют в лабораторных условиях по мере абсолютного контраста. Фотографируемая же местность в летнее время малоконтрастна, поэтому разрешающая способность реальных фотоснимков будет меньше расчетной. Кроме того, сдвиг изображения из-за движения и вибраций носителя, воздушная дымка и другие факторы еще больше снижают четкость снимка. В настоящее время аэрофотоснимки имеют разрешающую способность в среднем 10–40 мм⁻¹ более высокую. Приведенные значения R_s относятся к оригинальным негативам, а обычно применяемые для дешифрирования отпечатки на фотобумаге будут иметь более низкую разрешающую способность. Для определения фактической величины разрешающей способности конкретного фотоснимка измеряют с помощью измерительной лупы ширину нескольких наиболее узких и контрастных линейных объектов на снимке. Сред-

нее значение измеренных величин в миллиметрах, допуская определенное упрощение, принимают за IR и вычисляют разрешающую способность снимка, которую используют для сравнительной оценки различных снимков и съемочных систем.

Показатель – разрешающая способность – наиболее подходит для оценки возможности снимка разделять линейные близко расположенные объекты. При дешифрировании важно знать размер на местности того минимального реального объекта (или его отдельной детали), который изобразится на снимке. Здесь большую помощь может оказать другой показатель – пространственное разрешение. Для фотографических снимков в качестве такого показателя принимают *линейное разрешение* L_R , т.е. наименьшую ширину на местности линейного протяженного объекта, еще воспроизводимого конкретным снимком. Линейное разрешение можно рассчитать по номинальной величине разрешающей способности, используя формулу:

$$R_d = 25,4 \cdot 2\sqrt{2}R = 71,1R \text{ dpi}$$

За пространственное разрешение цифровых снимков принимают размер пиксела на местности, который обозначается PIX (от слова pixel). Этот первостепенный показатель любой космической съемочной системы всегда приводится в ее проспекте. По этому номинальному показателю сравниваются различные сканерные системы. Например, пространственное разрешение снимков MSS/Landsat принимают равным 80 м, МСУ-Э/Ресурс-0 – 45 м, Ikonos – 0,8 м. Пиксел является наименьшим элементом цифрового изображения, внутри которого отдельные объекты не различаются. Экспериментально установлено, что для надежного воспроизведения компактного объекта на цифровом снимке его размер должен быть не менее четырех пикселов, а для того, чтобы различались компактные объекты разной формы, их площадные размеры должны составлять уже несколько десятков пикселов.

При сравнительной оценке фотографических и цифровых снимков по пространственному разрешению, характеризующему для фотографических снимков линейным разрешением L_R , а для цифровых – размером пиксела PIX на местности, принимают, что:

$$L_R = \sqrt{2}PIX$$

В практической работе с фотографическими и со сканерными снимками это различие нередко игнорируется.

Говоря о пространственном разрешении, ответственном за детальность изображения на снимке, отметим еще такие виды разрешений, характеризующие системы дистанционного зондирования, как радиометрическое (энергетическое), а также спектральное, тепловое и временное разрешение.

Радиометрическое (яркостное) разрешение – число уровней яркости, регистрируемых приемником излучения. Оно может быть выражено также в битах (2 уровня – 1 бит, 4 уровня – 2 бита, 16 уровней – 4 бита, 64 уровня – 6 бит, 256 уровней – 8 бит, 1024 уровня – 10 бит).

Спектральное разрешение определяется шириной спектральных зон съемки и измеряется в нанометрах (нм) или микрометрах (мкм). Наиболее низкое спектральное разрешение (сотни нм) имеют фотографические панхроматические снимки и снимки, получаемые инфракрасными радиометрами, а самое высокое (до 10 нм) — гиперспектральные снимки. Повышение спектрального разрешения позволяет подробнее классифицировать объекты, например, на основе знаний о полосах поглощения воды, хлорофилла, минералов, газов в атмосфере.

Тепловое разрешение характеризуется величиной разностей температур различных объектов, которые удастся зарегистрировать тепловым снимком. У лучших снимков оно составляет десятки градуса.

Временное разрешение зависит от периодичности съемок и оценивается интервалом времени между повторными съемками. Оно меняется от 15–30 мин при регулярной съемке с геостационарного метеоспутника, суточного интервала у околоземных метеорологических спутников, 16–18 сут у ресурсных спутников на солнечно-синхронных орбитах, до интервалов в несколько лет, характерных для съемок, выполняемых, например, с картографических спутников.

2.4.2. Классификация и характеристики основных видов снимков

В результате выполнения аэрокосмических съемок накоплен многомиллионный фонд снимков, в котором насчитывается более 100 их разновидностей. Для того чтобы специалисты могли эффективно использовать материалы аэрокосмических съемок, они сис-

тематизированы, сгруппированы в типы снимков, различающихся по возможностям их применения в исследованиях.

При работе со снимками в первую очередь важны спектральный диапазон съемки, который определяет биогеофизические характеристики объектов, передаваемые снимками, и технология получения изображения, от которой зависят изобразительные, радиометрические и геометрические свойства снимков. Эти две характеристики представляют основу классификации космических снимков, учитывающей возможности их географического дешифрирования.

Спектральный диапазон съемки определяет первый, фундаментальный, уровень этой классификации, учитывающий отражательные и излучательные характеристики объектов, воспроизводимые на снимках. По этому признаку выделяются три основные группы снимков:

а) в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах, который часто объединяют в один, называемый световым;

б) в тепловом инфракрасном диапазоне;

а) в радиодиапазоне.

По технологии получения снимки в световом диапазоне делят на фотографические и сканерные, которые, в свою очередь, подразделяются на полученные оптико-механическим и оптико-электронным сканированием с использованием линейных ПЗС-приемников излучения. Для краткости первые из них названы сканерными, а вторые – ПЗС-снимками. Таким образом, в световом диапазоне выделены три типа снимков: фотографические, сканерные и ПЗС-снимки.

Поскольку снимки в тепловом инфракрасном диапазоне в настоящее время получают в основном по единой технологии, то они представлены одним типом – это тепловые инфракрасные снимки.

Снимки в радиодиапазоне делятся в зависимости от выполнения пассивной или активной съемки на микроволновые радиометрические снимки, получаемые при регистрации собственного излучения исследуемых объектов, и радиолокационные снимки, получаемые при регистрации отраженного радиоизлучения, посылаемого с носителя.

Названия типов снимков в значительной мере условны. Так, сканирование используется для получения разных типов снимков, а название сканерные отнесено лишь к снимкам, получаемым оптико-механическими сканерами в видимом и ближнем инфракрасном

диапазоне.

Радиометрическими являются также несколько выделенных типов, а название отнесено лишь к микроволновым, чтобы подчеркнуть их отличие от получаемых при активном методе радиолокационных снимков.

Каждый из выделенных типов снимков далее может быть подразделен с учетом показателей, определяющих их дешифровочные возможности, — обзорности, масштаба и пространственного разрешения, которые зависят от конкретных параметров съемки: высоты орбиты, характеристик съемочной аппаратуры и др.

Классификации космических снимков по этим трем показателям, важнейшим для дешифрирования, в целом образуют единую систему:

По **обзорности** (охвату территории одним снимком) снимки разделяют следующим образом:

1. Глобальные, охватывающие всю планету, точнее освещенную одного полушария – это снимки Земли с геостационарных спутников и межпланетных космических аппаратов. Ширина зоны охвата у них более 10 тыс. км, а территориальный охват составляет сотни миллионов квадратных километров.

2. Крупнорегиональные, отображающие материки, их части и крупные регионы, – снимки с метеорологических спутников на околоземных орбитах, а также снимки малого и среднего разрешения с ресурсных спутников. Ширина зоны охвата варьирует от 3 тыс. км у снимков малого разрешения до 500 км у снимков среднего разрешения, территориальный охват составляет миллионы квадратных километров. На одном снимке этого типа изобразится Западная Европа, Средняя Азия, Тибет.

3. Региональные, на которых изображаются регионы и их части – это снимки с ресурсных и картографических спутников, а также с пилотируемых кораблей и орбитальных станций. На снимке подобного охвата изобразится такое государство, как Бельгия, небольшая область, например, Московская.

4. Локальные, на которых изображаются относительно небольшие участки местности, – снимки со спутников для детального наблюдения и крупномасштабного топографического картографирования с охватом порядка 10 x 10 км². На таком снимке изобразится промышленный комплекс, крупное хозяйство, небольшой город, а для

Москвы потребуется несколько снимков. Охват аэроснимков составляет от сотен квадратных метров до 20*20 км²; обычно он существенно меньше, чем у космических снимков, но мелкомасштабные аэроснимки по охвату перекрываются с детальными космическими.

По **масштабу** космические снимки делят на следующие группы:

1) сверхмелкомасштабные – 1:10000000 – 1:100000000. Такие снимки получают с геостационарных спутников и с метеоспутников на околоземных орбитах;

2) мелкомасштабные – 1:1000000 – 1:10000000. Такие масштабы типичны для снимков с ресурсных спутников, а также с пилотируемых кораблей и орбитальных станций;

3) среднемасштабные – 1:100000 – 1:1000000. Снимки таких масштабов получают с ресурсно-картографических спутников;

4) крупномасштабные – 1:10000 – 1:100000. Это снимки со спутников для детального наблюдения и крупномасштабного топографического картографирования, в том числе спутников двойного назначения: военного и гражданского. К данной группе относятся и аэроснимки, которые, в свою очередь, дифференцируются по масштабам.

По **пространственному разрешению** (размеру на местности минимального изображающегося элемента или пиксела) снимки разделяют так:

1. Снимки низкого разрешения (разрешение измеряется километрами). Такое разрешение характерно для сканерных и тепловых инфракрасных снимков с метеоспутников, включая геостационарные, и для снимков, получаемых сканерами малого разрешения с ресурсных спутников, где основные изображающиеся объекты – облачность, тепловая структура вод океана, крупнейшие геологические структуры суши.

2. Снимки среднего разрешения (сотни метров), на которых отображаются многие природные объекты, но в большинстве случаев не воспроизводятся объекты, связанные с хозяйственной деятельностью. Это снимки, получаемые сканерами среднего разрешения, и тепловые инфракрасные снимки с ресурсных спутников.

3. Снимки высокого разрешения (десятки метров), на которых изображаются не только природные, но и многие хозяйственные объекты. Высокое разрешение характерно для наиболее широко используемых сканерных снимков с ресурсных спутников и фотографических снимков с пилотируемых кораблей, орбитальных станций,

автоматических картографических спутников. Поскольку размерность большинства изучаемых географических объектов находится как раз в этих пределах, снимками этой группы удовлетворяется большинство географических задач. Но для решения этих задач они неравноценны. Поэтому эта группа подразделяется на две подгруппы:

а) снимки относительно высокого разрешения (30–100 м), получаемые, главным образом, сканирующей аппаратурой с ресурсных спутников для решения оперативных задач и обзорного тематического картографирования;

б) снимки высокого разрешения (10 – 30 м) – это фотографические, сканерные и ПЗС-снимки с ресурсно-картографических и ресурсных спутников, используемые для детального тематического картографирования.

4. Снимки очень высокого разрешения (единицы метров), на которых отображается весь комплекс природных и хозяйственных объектов, включая населенные пункты и транспортные сети. Снимки получают длиннофокусной фотографической и аппаратурой ПЗС-съемки с картографических спутников для решения задач топографического картографирования.

5. Снимки сверхвысокого разрешения (доли метра), детально отображающие населенные пункты, промышленные, транспортные и другие хозяйственные объекты. Эти снимки получают с использующих аппаратуру ПЗС-съемки специализированных спутников для детальной съемки и крупномасштабного топографического картографирования. К данной группе относится весь огромный массив аэрофотоснимков. При классификации снимков по масштабу следует учитывать, что для фотографических снимков принято указывать оригинальный масштаб снимков, получаемых при съемке; для сканерных снимков принимают масштаб, наиболее широко используемый при визуализации изображения.

В классификации космических снимков по спектральному диапазону и технологии съемки выделено шесть основных типов космических снимков. В разделах о приемниках излучения, съемочной аппаратуре, видах съемки приводятся сведения об их различных свойствах. Рассмотрим теперь общую сравнительную характеристику этих типов снимков и областей их применения.

Фотографические снимки, которые получали с помощью фотографических камер, при вынужденной доставке экспонированной

пленки на Землю, предназначались для решения не оперативных, а долговременных либо разведывательных задач. Они характеризуются высокой детальностью и до середины 90-х гг. XX были лучшими снимками по разрешению и геометрическим свойствам. На снимках находят отображение оптические характеристики объектов (интегральная или спектральная яркость). Космические фотоснимки обычно получали с низких околоземных орбит, с картографических (топографических) спутников в масштабах 1:200 000 – 1:1000 000 с разрешением 2–30 м. Благодаря высокой детальности и непрерывному изображению с ними работают, как правило, при значительном увеличении – в 5–20 раз. При относительно небольшом (40–300 км) охвате снимков, имеющих центральную проекцию, искажения за кривизну Земли и рельеф невелики и устранимы. Перекрытие обеспечивает получение стереоскопических снимков. Для работы на компьютере фотографические снимки переводят в цифровую форму. Для топографического картографирования используют черно-белые панхроматические снимки, а для тематического – многозональные и спектральнозональные, в основном цветные.

Сканерные снимки, получаемые при оптико-механическом сканировании в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне и передаваемые по радиоканалам, как и фотографические, отображают оптические характеристики объектов, но такую съемку отличает оперативность, вплоть до получения изображений в реальном масштабе времени. В отличие от фотографических сканерные снимки представляют дискретные изображения, детальность которых определяется размером пиксела. Пространственное разрешение сканерных снимков долгое время было существенно ниже, чем фотографических, но в последние годы их получают с разрешением 15–30 м. Охват снимков варьирует от 180 км до 2–3 тыс. км. Характерны различия в проекции вдоль полета и по строке. Из-за перспективного изображения при больших углах сканирования по краям снимка масштаб становится более мелким, а разрешение падает. Вместе с одновременным получением изображения, когда на его формировании сказывается вращение Земли, все эти факторы влияют на геометрические свойства снимков и осложняют их обработку. Геометрическая коррекция снимков по орбитальным данным и по опорным точкам осуществляется с помощью компьютера. Сканерные снимки поступают с метеорологических и ресурсных спутников и

используются для оперативных целей (прогноз погоды, гидрологические прогнозы) и тематического картографирования. Как правило, сканерные снимки – многозональные.

ПЗС-снимки, получаемые с помощью оптико-электронных сканеров с линейными ПЗС-приемниками излучения и передаваемые со спутника по радиоканалам, характеризуются высоким разрешением. Как и фотографические снимки, они регистрируют оптические характеристики исследуемой территории. Благодаря центральной проекции по строке снимка его масштаб в центре и по краям одинаков и форма объектов не искажается, что является преимуществом этих снимков по сравнению с полученными при оптико-механическом сканировании. Высокая чувствительность детекторов и их миниатюрные размеры вместе с использованием длиннофокусных объективов обеспечивают высокое разрешение, которое составляет от первых десятков метров (10–45 м) до метра и даже менее. Таким образом, теперь эти снимки по разрешению достигают лучших фотографических снимков. Однако охват снимков невелик – 40–70 км, а у снимков наиболее высокого разрешения – всего 10–15 км. Наилучшим разрешением отличаются панхроматические снимки, а разрешение многозональных снимков в 2–4 раза хуже. Для стереообработки получают снимки с отклонением оптической оси от вертикали. ПЗС-снимки делают с ресурсно-картографических спутников и специализированных спутников для детальной съемки; используют их для тематического и топографического картографирования.

Тепловые инфракрасные снимки, получаемые в тепловом инфракрасном диапазоне, отображают в отличие от предыдущих не оптические, а температурные характеристики поверхности – холодные и теплые объекты изображаются на них разными тонами. Можно получать снимки независимо от условий освещения, например, полярной ночью, однако облачность является препятствием для съемки – на снимках отображается холодная верхняя поверхность облаков. Тепловая съемка нередко выполняется теми же сканирующими радиометрами, что и съемка в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, дополненными тепловыми каналами. Пространственное разрешение тепловых снимков, передаваемых с метеоспутников, такое же, как и снимков в видимом диапазоне – 1 км, температурные различия регистрируются с точностью 0,1–0,2°C. При значительном охвате 2–3 тыс. км и большом угле сканирования для них характер-

ны те же геометрические искажения, что и для сканерных снимков в видимом диапазоне. С ресурсных спутников передают тепловые снимки более высокого пространственного разрешения, достигающего 60 м. Тепловые снимки поступают и в многозональном варианте съемки, а также при гиперспектральной съемке в узких зонах теплового диапазона.

Микроволновые радиометрические снимки регистрируют радиотепловое излучение Земли в микроволновом радиодиапазоне, которое, как уже отмечалось, зависит от электрических свойств поверхности и неодинаково у объектов с разным влагосодержанием, соленостью, различной кристаллической структурой. Снимки можно получать независимо от погодных условий и освещения. Разрешение микроволновых радиометрических снимков пока очень мало – 12–50 км, что не позволяет использовать их для изучения земной поверхности, но на них отображается возраст морских льдов, водосодержание снега.

Радиолокационные снимки получают в радиодиапазоне, регистрируя отраженные земной поверхностью радиосигналы, посылаемые бортовым радиолокатором. На радиолокационных снимках отображаются шероховатость и влажность поверхности, ее рельеф, особенности структуры и состав пород, слагающих поверхность, характер растительного покрова. При определенных длинах волн излучения на снимках отображаются подповерхностные неоднородности грунта, грунтовые воды. Возможность получения снимков не зависит от условий погоды и освещения – облачность на них не отображается. Пространственное разрешение радиолокационных снимков определяется прежде всего размером антенн. У снимков, сделанных радиолокатором бокового обзора с реальной антенной, оно составляет 1–2 км, но в большинстве случаев! при использовании радиолокаторов с синтезированной длиной антенны получают снимки с разрешением 10–30 м при ширине обзора около 100 км. В последние годы начали получать снимки) радиолокаторами с переменным режимом работы, обеспечивающим снимки разного разрешения от 2 до 100 м при охвате 45–500 км. Специфику радиолокационного снимка составляет мелкая пятнистость изображения – технические спекл-шумы (speckle – крапчатость) и своеобразное отображение горного рельефа. Принцип многозональной съемки в радиодиапазоне реализуется при съемке в разных зонах частот и при раз-

личной поляризации излучения. Радиолокационные снимки поступают с океанологических и специализированных спутников, применяют их в широком спектре направлений исследования океана и суши, включая задачи топографического картографирования.

3. МИКРОВОЛНОВОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

3.1. Принципы радиолокации.

При микроволновом зондировании используются активные и пассивные методы дистанционного зондирования. В микроволновый диапазон радиоволн обычно включают диапазоны миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волн, т.е. микроволновое излучение характеризуется длинами волн от 1 мм до 1 м. Поскольку длины волн в этом диапазоне много больше длин волн оптического излучения, микроволны имеют важные особенности по сравнению с оптическими волнами.

Микроволновое излучение проникает через облачность, туман, пыль и не слишком сильные ливни, так как более длинные волны в этом случае не рассеиваются и поглощаются подобно световым волнам. Это свойство позволяет получать радиоизображения при практически любых погодных условиях, поэтому данные могут быть получены в любое время.

Пассивное микроволновое зондирование аналогично тепловому дистанционному зондированию в инфракрасном диапазоне. Все тела с температурой, отличной от абсолютного нуля, излучают микроволны, однако их мощность очень мала и для ее регистрации необходимы очень чувствительные приемники, называемые радиометрами. Применения пассивного микроволнового зондирования (СВЧ-радиометрии) включают в себя метеорологию, гидрологию, океанографию и другие области.

Активные микроволновые сенсоры имеют собственный источник микроволнового излучения, освещающий земную поверхность. Такой сенсор носит название радиолокатора или радара (от английского **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging – радиообнаружение и определение дальности). Радиолокатор изучает радиосигнал к объекту и затем принимает рассеянную в обратном направлении часть радио-

сигнала, измеряя его интенсивность и время распространения, определяя тем самым расстояние до объекта.

Радиолокационное зондирование обладает двумя важными преимуществами по сравнению с оптическими: всепогодностью и независимостью от времени суток. Радиолокационное изображение существенно отличается от изображений, получаемых в видимой и инфракрасной части спектра. Вследствие этого они дополняют друг друга, и синтез этих изображений дает новые возможности для увеличения информативности результатов дистанционного зондирования.

Радиолокатор по сути своей является устройством, измеряющим расстояние или дальность до объекта. Он состоит из передатчика, приемника, антенны и электронного блока для регистрации и обработки сигнала. Передатчик генерирует последовательность коротких импульсов А (рис. 3.1) через определенные временные интервалы, которые фокусируются передающей антенной в пучок В. Радиолокационный сигнал освещает поверхность наклонно и под прямым углом к направлению движения носителя. Антенна принимает отраженное назад излучение в виде импульса С от объектов, освещенных падающим пучком В.

Антенна является устройством, преобразующим электромагнитные колебания в радиочастотном диапазоне, вырабатываемые передатчиком, в электромагнитные волны, распространяющиеся от антенны в окружающее пространство (передающая антенна) и, наоборот, преобразующим приходящие к ней радиоволны в электромагнитные колебания, поступающие в приемник. Антенны являются так называемыми обратимыми устройствами, т. е. одна и та же антенна может работать как в режиме передачи, так и в режиме приема. Простейшей антенной может служить металлический провод. Если провод соединить с генератором электрических колебаний, он станет излучать в окружающее пространство электромагнитные волны и, наоборот, приходящие электромагнитные волны будут индуцировать в нем электрический ток. Для эффективной работы провод должен иметь определенные размеры и конфигурацию. Направленность антенны, т. е. ее способность концентрировать излучение в определенном направлении, зависит от ее конструкции. Помещающую небольшую антенну-облучатель в фокус параболического рефлектора (отражателя), получают остронаправленное излучение суще-

ственно большей интенсивности. Рефлектор у приемной антенны в сотни и тысячи раз повышает и ее чувствительность. Чем больше размер рефлектора, тем больше направленность действия антенны.

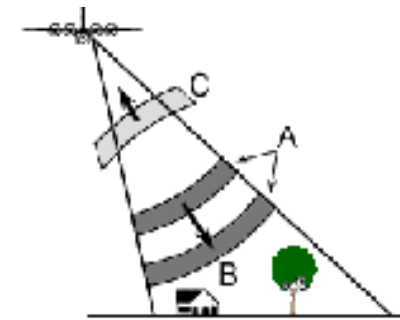


Рис. 3.1. Принцип радиолокации

Измеряя время задержки между моментами передачи импульса и приема эхо-сигналов от различных объектов и зная скорость распространения света c , можно определить их расстояние от радара, а затем их местоположение. Так как носитель движется вперед, в результате регистрации и обработки рассеянных назад сигналов строится двумерное изображение поверхности.

Радиолокаторы могут работать в следующих микроволновых диапазонах, буквенные названия которых исторически сохранились со времен Второй мировой войны: Ka, K, Ku – диапазоны (длины волн 0,75–2,4 см), X-диапазон (2,4 см – 3,75 см), C-диапазон (3,75 см – 7,5 см), S-диапазон (7,5 см – 15 см), L-диапазон (15 см–30 см), P-диапазон (30 см–100см).

3.2. Геометрия съемки и пространственное разрешение.

Геометрия радиолокационной съемки отличается от съемки кадровыми и сканирующими системами, обычно применяемыми при зондировании в оптическом диапазоне. Общим для обеих разновидностей зондирования является движение платформы в **направлении полета А** (рис. 3.2) с точкой **надира В** на земной поверхности прямо под платформой. Микроволновый пучок радиоволн излучается наклонно под прямым углом к направлению движения, освещая **полосу** с шириной **С**, которая удалена от точки надира. Буквой

D показано поперечное к линии полета направление, вдоль которого на поверхности Земли отсчитывается координата «дальность».

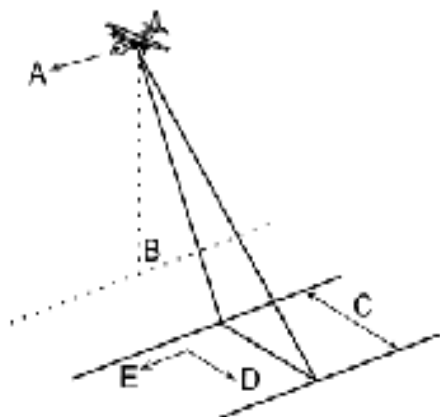


Рис. 3.2. Геометрия бокового обзора

Азимут E является координатой, отсчитываемой вдоль линии, параллельной направлению полета. Такая геометрия бокового обзора является типичной для получения изображения земной поверхности при микроволновом зондировании, а сами радиолокаторы называются радиолокаторами бокового обзора. Принцип бокового обзора предусматривает наклонное ($20\text{--}60^\circ$) направление зондирующих сигналов перпендикулярно прямолинейной траектории движения. Вследствие поступательного перемещения носителя радиолокатор выполняет съемку местности в полосе обзора, параллельной линии полета. Поскольку объекты местности находятся на разных расстояниях от носителя (имеют разные наклонные дальности), то отраженные от них радиосигналы поступают в приемник в разное время. Так как радиолокационное изображение формируется путем регистрации наклонных дальностей до объекта, то съемку непосредственно под носителем, где дальности различаются очень мало, не производят, а устанавливают ближнюю границу полосы съемки на расстоянии около трети высоты полета. Пространственное разрешение радиолокационных снимков вдоль линии полета зависит от ширины диаграммы направленности, т. е. от геометрической ширины зондирующего импульса, а вдоль строки – от его длительности. Определяющим является разрешение снимков вдоль линии полета,

которое тем лучше, чем длиннее антенна.

Расстояние от точки надира до ближней границы полосы называется **ближней дальностью**, расстояние до дальней границы изображения называется **предельной дальностью**.

Угол падения волны **A** (рис. 3.3) является углом между радиолучом и перпендикуляром к земной поверхности, который возрастает по мере движения поперек полосы наблюдения от ближней дальности и предельной дальности. На рис.3.3 через **B** обозначен угол обзора – угол, под которым радар «видит» поверхность.

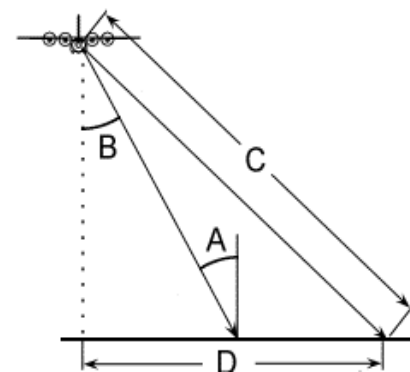


Рис. 3.3. Углы обзора и падения, наклонная дальность.

При всех дальностях радиолокатор измеряет расстояние от антенны до каждого элемента поверхности. Это расстояние **C** (рис. 3.3) называется **наклонной дальностью**, в то время, как отмечалось выше, **дальность D** – это горизонтальное расстояние вдоль земной поверхности от точки надира до рассматриваемого элемента земной поверхности. В отличие от оптических систем, пространственное разрешение радиолокаторов зависит от особенностей микроволнового излучения и геометрических эффектов. Радиолокаторы с действительной (реальной) апертурой (апертура – раскрыв, размер раскрыва антенны) используются как радиолокаторы бокового обзора для формирования радиолокационного изображения. Разрешающая способность этих радаров зависит от продолжительности импульса и размера освещаемой зоны в азимутальном направлении. Разрешение по дальности или разрешение поперек траектории зависит от длительности импульса.

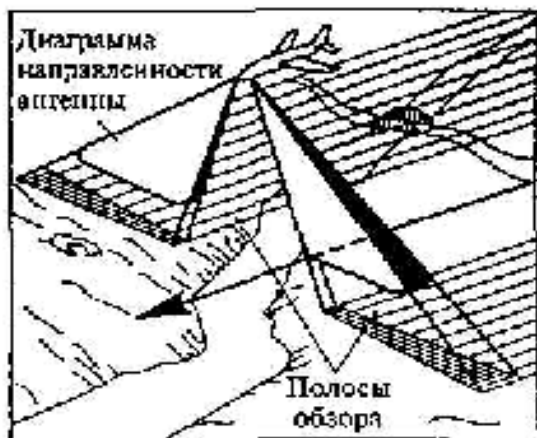


Рис. 3.4. Двухполосная съемка радиолокатором бокового обзора

Разрешение вдоль луча не зависит от значения наклонной дальности. На земной поверхности разрешение по дальности уменьшается с возрастанием дальности. Разрешение по азимутальной координате или разрешение вдоль траектории движения определяется угловой шириной излучаемого пучка радиоволн и наклонной дальностью. При увеличении дальности разрешение ухудшается. Ширина пучка радиоволн или ширина пучка диаграммы направленности антенны обратно пропорциональна размеру антенны и прямо пропорциональна длине волн, т.е. чем больше размер апертуры и короче длина волн, тем уже диаграмма направленности и лучше разрешение. Улучшение разрешающей способности может быть достигнуто использованием более коротких импульсов, однако на этом пути существуют технические ограничения. Разрешающую способность по азимуту можно увеличить с помощью антенны больших размеров, но предельные размеры здесь ограничены возможностями и размерами самих воздушных или космических носителей. Обычно РБО снимают одновременно две полосы обзора (рис. 3.4). Для устранения ограничения по длине антенны и увеличения разрешения в современных РБО используется специальная регистрация и обработка отраженных радиосигналов.

На рис. 3.5а показано, как это происходит. Отражённые сигналы от объекта А регистрируются при различных положениях платформы, причем запоминаются и амплитуда и фаза излученного и

отраженного сигналов. Физически это эквивалентно тому, что объект освещается антенной длины В (синтезированная антенна). Разница лишь в том, что освещение объекта и регистрация отраженного сигнала элементами синтезированной антенны происходит не одновременно, а последовательно. Объекты, расположенные на больших дальностях, освещаются дольше, что обеспечивает независимость разрешающей способности от дальности. По результатам съемки, выполненной с помощью реальной короткой антенны, удается сформировать радиолокационный снимок, который получен как бы с помощью длинной антенны (искусственно сформированной) с соответственно узкой диаграммой направленности (рис. 3.5 б). Высокое разрешение (от 30–10 м до нескольких метров у лучших радиолокаторов) достигается путем компьютерной обработки отраженных сигналов, которые, как уже отмечалось, принимаются и накапливаются по мере движения носителя. Радиолокаторы, использующие такой метод получения изображения с высокой разрешающей способностью, постоянной по всей полосе обзора, называются **радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА)**. В зарубежной литературе они носят название **synthetic aperture radar (SAR)**. Большинство современных радаров, используемых для дистанционного зондирования, относятся к этому классу.

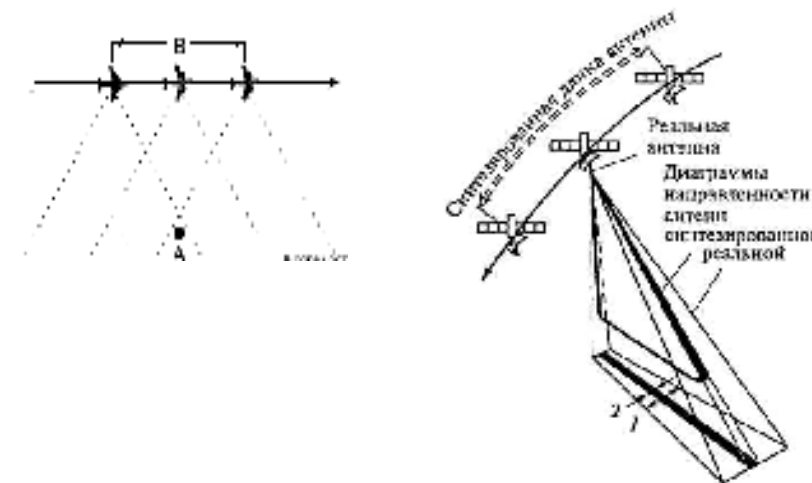


Рис. 3.5. Принцип работы радиолокатора с синтезированной апертурой

3.3. Искажения радарных изображений.

Подобно всем системам дистанционного зондирования, радиолокационное зондирование имеет определенные геометрические искажения. Эти искажения имеют свои особенности вследствие принципа бокового обзора и того факта, что радиолокационный метод основан на принципе измерения расстояний.

Искажения масштабов за счет разного наклона лучей по отношению к горизонтальной земной поверхности возникают из-за того, что радар измеряет наклонную дальность до объекта, а не горизонтальную дальность вдоль земной поверхности. Из рис. 3.6 видно, что хотя объекты A1 и B1 имеют одинаковую протяжённость вдоль земной поверхности, их кажущиеся размеры A2 и B2 в координатах наклонной дальности, которые и измеряет радиолокатор, различны. Объекты у ближнего края полосы обзора сжаты по сравнению с объектами у дальнего края. Эти искажения учитываются с помощью тригонометрических соотношений.

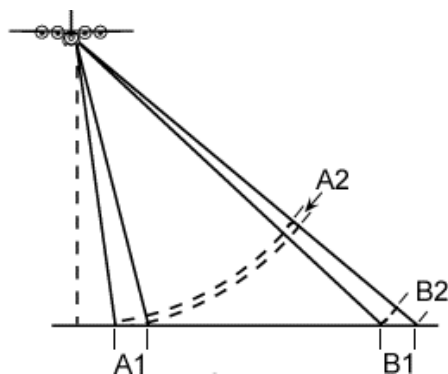


Рис. 3.6

Искажения за счет рельефа. Аналогично искажениям, которые возникают при съемках с помощью фотокамер и сканеров рельефа, при радиолокации неровной земной поверхности также возникают геометрические искажения. Как и у сканеров, эти искажения являются одномерными и проявляются в направлениях, перпендикулярных траектории полета, причем они более выражены при малых дальностях.

Укорочение (foreshortening) возникает из-за того, что передний

склон горы или холма составляет некоторый угол с горизонтальной поверхностью (рис. 3.7).

Поскольку радиолокатор измеряет наклонную дальность, склон АВ будет казаться более коротким чем в действительности, его длина по координате «наклонная дальность» равна $A'B'$. Величина укорочения зависит от крутизны склона и угла падения радиолокационного пучка. Максимальное укорочение наблюдается, когда пучок падает на склон перпендикулярно его поверхности и, тем самым, лучи достигают всех его точек одновременно. Длина склона по координате «наклонная дальность» при этом оказывается равной нулю.

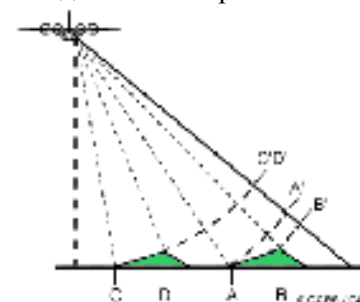


Рис. 3.7

Укорочение переходит в отрицательное укорочение (layover), когда вершина горы или холма В по координате «наклонная дальность» оказывается ближе к радиолокатору, чем основание А. Соответственно, сигнал, отраженный от вершины, будет зафиксирован раньше, чем сигнал, отраженный от начала склона. В результате изображение вершины на радиолокационном снимке окажется ближе к радиолокатору. Иногда в российской литературе этот эффект называют опрокидыванием вершины. Эффекты укорочения и отрицательного укорочения на радиолокационном изображении выглядят очень похоже. Отрицательное укорочение возникает при малых углах падения у ближнего края полосы изображения и в гористых районах с крутыми склонами.

Эффекты укорочения при отсутствии видимости заднего склона сопровождаются радиолокационным затенением. Радиолокационная тень, как и оптическая, наблюдается, когда пучок экранируется каким-либо препятствием и не освещает затененный участок, который на изображении выделяется темным. Затенение сильнее проявляется у дальнего края изображения.

3.4. Взаимодействие излучения с земной поверхностью и формирование изображения.

Яркость объектов на радиолокационном изображении определяется величиной отраженной энергии, вернувшейся обратно к радиолокатору. Эта величина зависит от многих параметров. Эти параметры включают в себя характеристики радиолокационных систем (частота, поляризация, геометрия обзора и др.) и характеристики поверхности (тип почвы, рельеф и др.). Многие из этих характеристик взаимосвязаны, поэтому часто затруднительно разделить влияние той или иной характеристики на параметры изображения. Другими словами, значение яркости объектов на изображении обычно является производной от комбинации нескольких характеристик. Эти характеристики можно разделить на три группы:

- шероховатость земной поверхности;
- геометрия радиолокационного обзора и геометрия поверхности;
- влажность и электрические свойства поверхности.

Шероховатость земной поверхности определяет особенности рассеяния микроволн поверхностью и является главным фактором, от которого зависит яркость объектов. Под шероховатостью поверхности подразумеваются случайные в своей природе отклонения высоты поверхности от среднего значения. Характерные размеры шероховатости по порядку величины обычно не превышают нескольких сантиметров–дециметров. Важно понимать, что степень шероховатости для волн, падающих на поверхность, зависит также от длины волны и угла падения. Поверхность считается “гладкой”, если вариации ее высот много меньше длины волны излучения и, соответственно, она будет шероховатой, когда эти вариации сравнимы с длиной волны или больше ее. Одна и та же поверхность, следовательно, может быть шероховатой для более коротких волн и “гладкой” для более длинных волн. Гладкая поверхность **A** (рис. 3.8) вызывает зеркальное отражение, которое в основном отражается в сторону от носителя согласно закону зеркального отражения. Это проявляется на изображении в том, что гладкая поверхность будет иметь темные тона. Шероховатая поверхность **B** рассеивает падающее излучение во всех направлениях, т.е. диффузно, и определенная часть энергии излучения будет рассеяна обратно к радиолокатору.



Рис. 3.8

Это проявляется в том, что на изображении шероховатая поверхность будет иметь светлые тона. Роль угла падения в проявлении шероховатых свойств поверхности заключается в том, что влияние шероховатости уменьшается при увеличении угла падения. Простым примером этой зависимости является увеличение отражающих свойств водной поверхности по мере захода солнца за эту поверхность. Для радиолокационного изображения данное явление будет проявляться в том, что при перемещении от ближнего до дальнего края полосы обзора общий тон изображения будет темнеть. Существенное влияние на яркость локального участка поверхности оказывает локальный угол падения **A**, который определяется как угол между направлением падения луча и перпендикуляром к плоскости, частью которой является локальный участок поверхности. Для склонов, отраженных к радиолокатору, локальный угол наклона меньше, чем для плоской горизонтальной поверхности, для которой угол падения равен углу обзора **B**. Это обстоятельство приводит к увеличению яркости склонов на радиолокационном изображении.

Направление, под которым радиолокационный пучок падает на поверхность, также влияет на характер изображения, особенно, когда поверхность имеет некоторую линейную структуру, например, сельскохозяйственные поля или горные цепи. Если это направление падения луча перпендикулярно к линиям, образующим структуру, отражение будет достаточно значительным, что проявится в яркости тона. При других направлениях падения луча эти тона будут темнее. Направление падения и отражения луча, которое определяется направлением полета, имеет важное значение для улучшения контраста между различными объектами на изображении. Особенно

важен выбор направления движения платформы в гористых районах для минимизации эффектов укорочения склонов и затенения. Идентификацию изображения можно улучшить, получая изображения исследуемой поверхности при различных направлениях полета.

Отражающие объекты, которые имеют две или более поверхности, расположенные под прямым углом друг к другу, могут вызвать “угловое отражение” (рис.3.9). В угловых отражателях волна последовательно отражается от поверхностей, образующих эти отражатели. Угловое отражение встречается при зондировании городских территорий, где угловыми отражателями являются здания и другие искусственные сооружения. В природе естественными угловыми отражателями могут явиться отвесные скалы, обрывы, деревья. Механизм углового отражения приводит к повышенной яркости объектов в виде угловых отражателей.

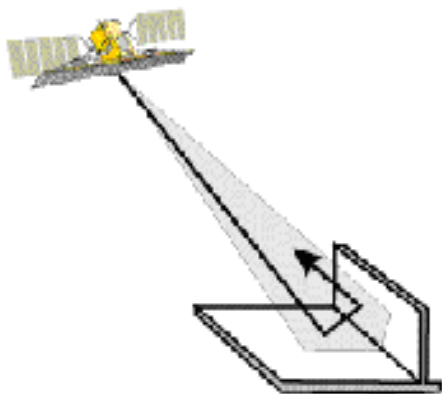


Рис. 3.9. Механизм углового отражения.

Степень влажности объектов влияет на электрические свойства объектов или среды. Электрическими свойствами объектов, от которых зависят его отражающие и поглощающие свойства, являются диэлектрическая проницаемость и проводимость. Чем больше эти величины, тем сильнее отражение и поглощение той части излучения, которая прошла под поверхность. Увеличение влажности объектов увеличивает их диэлектрическую проницаемость и проводимость и, следовательно, увеличивает отражательную способность. Например, более влажные почвы и растительность будут, соответственно, выделяться на изображении более яркими тонами. Если влажность объекта достаточно мала, то часть излучения может проникнуть под

поверхность и распространяться внутри объекта, причем, как это уже отмечалось, глубина проникновения будет тем больше, чем меньше влажность. При прохождении волн через поверхность они далее распространяются либо в дискретной (растительность), либо в непрерывной (почва) среде. При этом возникает так называемое объемное рассеяние, обусловленное неоднородностями среды. Например, внутри леса происходит рассеяние на листьях, ветках, стволах деревьев, причем это рассеяние может быть многократным. Объемное рассеяние может увеличивать или уменьшать яркость в зависимости от того, какая часть излучения рассеется обратно (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Механизм объемного рассеяния.

3.5. Свойства радиолокационного изображения.

Все радиолокационные изображения имеют ту или иную степень пятнистости, которая вызывается так называемым спекл-шумом. Спекл-шум обусловлен тем, что яркость каждого пиксела изображения формируется в результате интерференции волн, рассеянных более мелкими элементами пиксела. Эта интерференция может приводить как к увеличению, так и к уменьшению яркости пиксела, по сравнению со средним значением, полученным при усреднении яркостей соседних пикселей. Спекл-шум как и любой шум ухудшает качество изображения и затрудняет дешифрирование радиолокационного снимка. Отметим, что в оптическом диапазоне при пассивном зондировании земной поверхности, освещенной солнцем, яркость пиксела образуется в результате сложения интенсивностей волн от элементарных рассеивателей внутри пиксела. Это так называемое некогерентное сложение. Числовое значение интенсивности всегда положительно, поэтому яркость пиксела является просто арифмети-

ческой суммой яркостей элементарных переизлучателей. При радиолокационном зондировании яркость пиксела является результатом сложения так называемых комплексных амплитуд волн от элементарных отражателей внутри пиксела. Это когерентное сложение. Комплексные амплитуды можно представить в виде векторов, длина которых равна действительной амплитуде волны, а фаза волны определяет направление вектора. Сложение векторов, как известно, может приводить к различным результатам в зависимости от их фаз, даже если вектора имеют неизменную амплитуду. Простейший и наглядный пример: сложение двух векторов с одинаковыми амплитудами. Если вектора синфазные, т.е. их направления совпадают, то результирующая амплитуда равна удвоенной амплитуде каждого из векторов. При противофазности векторов, т.е. угол между ними равен 180° , результирующая амплитуда равна нулю. Фазы элементарных рассеивателей в общем случае имеют разные величины, следовательно, результирующая яркость пиксела будет случайной величиной.

Существуют два способа уменьшения влияния спеклов:

- многолучевой обзор поверхности;
- пространственная фильтрация.

Многолучевой обзор (съемка) поверхности заключается в разделении радиолокационного пучка на несколько более узких пучков (лучей). На рис. 3.13 показано деление пучка А на пять лучей. Каждый пучок-луч дает независимое изображение сцены, которое имеют свои спеклы. Уменьшение спекл-шума достигается путем усреднения полученных изображений.

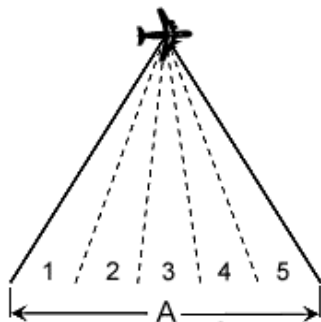


Рис. 3.11. Многолучевой радиолокационный обзор местности

Пространственная фильтрация заключается в цифровой обработке одного изображения. Уменьшение спекл-шума осуществляет-

ся путем создания небольшого окна размером 3×3 или 5×5 пикселей. Яркость центрального пиксела принимается равной средней яркости пикселей в окне. Окно передвигают по всему изображению, в результате яркость каждого пикселя корректируется в соответствии с размером окна (фильтруется в окне) и, соответственно, изображение сглаживается. Для уменьшения спекл-шума и минимизации влияния сглаживания могут применяться более сложные алгоритмы обработки, чем простое усреднение. Оба способа уменьшения спекл-шума в результате сглаживания изображения приводят к уменьшению пространственного разрешения. Поэтому необходим баланс между уменьшением спекл-шума и ухудшением пространственного разрешения. Например, если требуется высокое разрешение, фильтрация должна быть минимальной или не применяться вообще. При мелкомасштабном картировании допустимо существенное уменьшение спеклов и сглаживание изображения.

Для правильного построения изображения радиолокаторы периодически калибруют. Относительная калибровка необходима для сопоставления яркостей объектов на одном изображении и сравнения изображений, полученных в разное время. Абсолютная калибровка необходима для определения значений напряженности принимаемых сигналов. Эта калибровка может служить для контроля и коррекции энергетического потенциала радиолокатора.

3.6. Современные методы применения радиолокационного зондирования.

Помимо стандартного использования данных радиолокационного зондирования в последние годы развиваются такие методы исследования земной поверхности как радарграмметрия, интерферометрия, поляриметрия. Первый из этих методов использует стереосъемку, принцип которой аналогичен традиционно используемым стереосъемкам, с помощью фотокамер с борта самолета. В процессе стереосъемки получают стереопару изображений, формируемую при отличающихся углах обзора или при съемке с другой стороны исследуемой полосы. Оценка формы, размеров объектов, высоты рельефа для топографического картирования из анализа данных стереопары называется радарграмметрией и по сути своей аналогична фотограмметрии, использующей аэрофотосъемку для этих же целей.

Для определения высоты рельефа, также используется другой, более современный метод, который основан на принципах интерферометрии. В интерферометрии основным измеряемым параметром является фаза волны. Предположим, что две волны с одной и той же длиной и частотой распространяются в пространстве, но начальная точка одной волны смещена относительно начальной точки другой волны. Разность между соответствующими точками обеих волн определяет разность фаз этих волн. Интерферометрические системы используют две антенны, разнесенные по дальности на небольшую величину и регистрирующие рассеянные волны от каждого элемента поверхности. Обе антенны интерферометра могут находиться на одной и той же платформе или же их данные могут быть получены из двух различных проходов с одной и той же антенной. Путём измерения дальности фаз двух волн разность наклонных дальностей может быть вычислена с точностью порядка длины волны (т.е. сантиметры). При известном положении антенн относительно Земли можно определить координаты и высоту элемента поверхности. Изображение, где значение всех элементов поверхности представлены в виде соответствующих яркостей им цветов, носит название интерферограммы. С помощью интерферограммы можно получить трёхмерное изображение земной поверхности на основе полученной **цифровой модели рельефа** (ЦМР). Все радиолокаторы, использующие интерферометрию, являются радиолокаторами с интегрированной апертурой и соответственно называются интерферометрическими РСА. В зарубежной литературе их называют *interferometric synthetic aperture radar* (InSAR).

Наконец, радиолокационная **поляриметрия**, которая затрагивалась выше, основана на зависимости отражающих свойств объектов от вида поляризации. Большинство радиолокаторов излучают микроволны либо на горизонтальной (H), либо на вертикальной (V) поляризациях и, соответственно, принимают отражённый сигнал на одной соответствующей поляризации.

Поляриметрические радиолокаторы передают и принимают волны на обеих поляризациях. Таким образом, они могут принять и обработать сигналы в следующих комбинациях (HH, HV, VH и VV). Сигнал каждого из этих «поляризационных каналов» при зондировании одного и того же элемента поверхности имеет различные характеристики, что позволяет улучшить процесс дешифрирования объектов.

4. ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РАДАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

4.1. Принципы радарной интерферометрии.

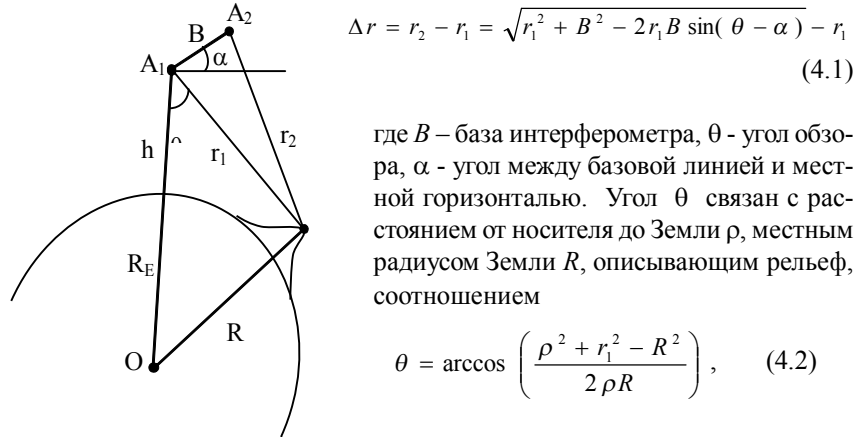
Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) в настоящее время становятся весьма эффективным инструментом для исследования земной поверхности. Использование когерентности радиолокационных сигналов приводит к возможности применения интерферометрических методов в радиолокации. Интерферометрические РСА, основанные на сравнении фазы двух или более сигналов, рассеянных элементом земной поверхности, позволяют исследовать топографию земной поверхности и ее изменения во времени и другие детальные характеристики поверхности. Использование интерферометрических РСА космического базирования весьма актуально для условий Сибири с её обширной территорией, большей частью труднодоступной. В Сибири находятся обширные горно-таежные области, цифровое картирование которых затруднительно иными способами, отличными от дистанционного зондирования.

Цель настоящего раздела заключается в рассмотрении принципов радарной интерферометрии и построения на их основе цифровой модели рельефа. Отметим, что до настоящего времени исследования, связанные с применением принципов радарной интерферометрии в Сибирском регионе не проводились, тогда как в мире это направление в дистанционном зондировании в последнее время активно развивается. Задача разработки эффективных алгоритмов построения цифровой модели рельефа является комплексной и достаточно сложной.

Радарная интерферометрия основана на совместной обработке двух или более радиолокационных изображений одного и того же участка земной поверхности. Необходимым условием для реализации данного метода является когерентность сигналов. Для практической реализации метода необходимо иметь разнесенные в пространстве приемные точки. Здесь можно выделить однопроходную интерферометрию, когда на одном носителе установлены две разнесенные приемные антенны и двухпроходную интерферометрию, основанную на зондировании одного и того же участка с близких

орбит в разное время. Важнейшей характеристикой интерферометрического метода является база, которая равна расстоянию между антеннами или расстоянию между орбитами.

На рис. 4.1 представлена геометрия интерферометрической съемки. Найдем связь между рельефом и разностью фаз. Разность наклонных дальностей от антенн A_1 и A_2 :



$$\Delta r = r_2 - r_1 = \sqrt{r_1^2 + B^2 - 2r_1 B \sin(\theta - \alpha)} - r_1 \quad (4.1)$$

где B – база интерферометра, θ - угол обзора, α - угол между базовой линией и местной горизонталью. Угол θ связан с расстоянием от носителя до Земли ρ , местным радиусом Земли R , описывающим рельеф, соотношением

$$\theta = \arccos \left(\frac{\rho^2 + r_1^2 - R^2}{2\rho R} \right), \quad (4.2)$$

Рис. 4.1.

Разность фаз при двукратном прохождении расстояний r_1 и r_2 равна:

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r, \quad (4.3)$$

Из (4.3.1)–(4.3.3) следует

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left[\sqrt{r_1^2 + B^2 - 2r_1 B \sin \left(\arccos \left(\frac{\rho^2 + r_1^2 - R^2}{2\rho R} \right) - \alpha \right)} - r_1 \right]. \quad (4.4)$$

Выражение (4.4), связывающее разность фаз и локальный радиус Земли, позволяет создать цифровую модель рельефа, в которой каждый элемент (пиксель) поверхности имеет определенную высоту.

Если элемент земной поверхности находится в дальней (фраунгоферовой) зоне интерферометра, где справедливо приближение плоской волны, получим, пренебрегая квадратичным членом по B , в разложении по ρ_2

$$\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha). \quad (4.5)$$

Это выражение наглядно показывает, что разность фаз пропорциональна проекции базы на линию между точкой A_1 и зондируемым элементом земной поверхности. Отметим, что условием применимости выражения (4.5) является критерий дальней зоны, что соответствует выполнению неравенства $B \ll \sqrt{\lambda r_1}$.

4.2. Построение цифровой модели рельефа.

При построении цифровой модели рельефа можно выделить следующие этапы обработки сигнала:

- совмещение изображений;
- формирование интерферограммы;
- построение карты когерентности;
- фильтрация шумов интерферограммы;
- «компенсация» для гладкой Земли;
- развертка фазы;
- построение карты высот;
- геокодирование.

Для двухпроходной интерферометрии возникают задачи, связанные с определением параметров орбит для определения длины и ориентации базовой линии, а также учета непараллельности орбит.

Рассмотрим кратко этапы обработки.

Совмещение изображений – можно выполнить с помощью преобразования

$$\begin{aligned} x' &= a_{11}x + a_{12}y + c_1 \\ y' &= a_{21}x + a_{22}y + c_2 \end{aligned}$$

где (x, y) и (x', y') – декартовы координаты на первом и втором снимках. Неизвестные преобразования могут быть определены путем нахождения координат идентичных точек на изображениях. Другим методом является попиксельный корреляционный анализ.

Формирование интерферограммы происходит в результате перемножения комплексных сигналов первого изображения S_1 первого изображения на комплексно-сопряженные сигналы S_2^* второго изображения. В результате определяем интерферометрическую фазу (разность фаз) Φ :

$$\Phi = \arctg \frac{B}{A},$$

где A и B – квадратурные составляющие полученного произведения.

Построение карты когерентности производится по формуле:

$$\gamma = \frac{|E \{S_1 * S_2^*\}|}{\sqrt{E \{|S_1|^2\} \cdot E \{|S_2|^2\}}},$$

где $E\{\cdot\}$ – операция усреднения. Карта когерентности показывает степень корреляции изображений.

Фильтрация шумов интерферограммы уменьшает влияние шумов за счет уменьшения пространственного разрешения изображения. Наиболее просто выполняется локальная линейная фильтрация масками с размерами $n \times n$, где $n = 3, 5, 7$. фактически такие фильтры являются фильтрами нижних частот, подавляющие высокочастотные гармоники сигнала и шума [5].

Компенсация интерферограммы гладкой Земли, с радиусом, соответствующим средней высоте рельефа, из измеренной интерферограммы производят для того, чтобы устранить интерференционные полосы вследствие изменения разности фаз вдоль гладкой земли за счет изменения наклонных дальностей. Результирующая интерферограмма описывает только вариации высот рельефа.

Развертка (разворот) фазы является этапом, цель которого устранение фазовой неоднозначности. Значения интерферометрической фазы заключены в пределах $(-\pi, \pi)$ и известны с точностью до целого числа циклов. Задача развертки заключается в восстановлении фазы путем добавления нужного числа циклов. Данная задача является наиболее сложной в проблеме создания цифровой модели рельефа. Поэтому проблема развертки фазы будет далее рассмотрена более подробно.

Построение карты высот заключается в установлении соответствия значений абсолютной фазы высотам рельефа местности. Этот пересчет осуществляется по формуле (4.4). Абсолютную фазу, которая определяется добавлением одного и того же числа 2π к развернутой фазе можно найти, зная положение какой-либо цели на земной поверхности и ее высоту.

Геокодирование заключается в переходе от координат «дальность

– азимут – высота» к географической системе координат «широта – долгота – высота». Результирующий файл представляет собой цифровую модель рельефа.

4.3. Цифровая модель рельефа для участка земной поверхности вблизи озера Байкал

Для создания конкретной цифровой модели рельефа на основе приведенного выше алгоритма были использованы два радиолокационных изображения, полученных радаром с синтезированной апертурой (РСА) SIR-L космического корабля SHUTTLE вблизи озера Байкал. Первое изображение было получено во время сеанса 48524 9 октября 1994г., второе – 10 октября в сеансе 48526. В таблице 4.1 приведены параметры радиолокационного изображения, полученные из лидер-файла.

Таблица 4.1

Геометрия орбиты и изображения, параметры сигнала

Широта центра изображения, град	52,188
Долгота центра изображения, град	106,756
Частота излучения, GHz (длина волны, м)	1,249 (0,24)
Поляризация	HH
Угол падения, град	23,967
Высота съемки над поверхностью эллипсоида, км	218,095
Размер изображения по дальности, км	7,322
Протяженность изображения по азимуту, км	50,006
Размер изображения в пикселях	1100x9908

Совмещение изображений осуществлялось с помощью попиксельного корреляционного анализа по выбранному фрагменту изображения. Обычно размер фрагмента составляет 256x256 пикселей. На основе совмещенного изображения формировалась интерферограмма, представляющая собой матрицу, состоящую из разности фаз сигналов, рассеянных соответствующими пикселями. На рис. 4.2 и 4.3 показаны радиолокационное изображение местности и рассчитанная интерферограмма. На рис. 4.4 приведена карта когерентности, показывающая степень корреляции изображений.



Рис. 4.2. Радиолокационное изображение местности (сеанс 48524).



Рис. 4.3 Рассчитанная интерферограмма.



Рис. 4.4. Карта когерентности.

Фильтрация шумов интерферограммы проводилась при помощи усредняющих фильтров размером 3x3 и 5x5 с весовыми коэффициентами, равными единице. На рис. 4.5 приведены часть исходной интерферограммы и эта же часть после фильтрации. Для большей наглядности на рис. 4.6 приведены исходные и усредненные разности фаз вдоль координаты «дальность» для фиксированной координаты «азимут».

координаты «азимут».

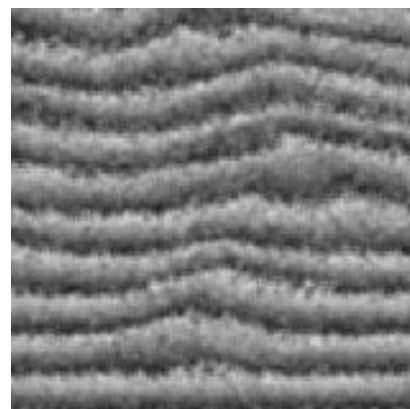
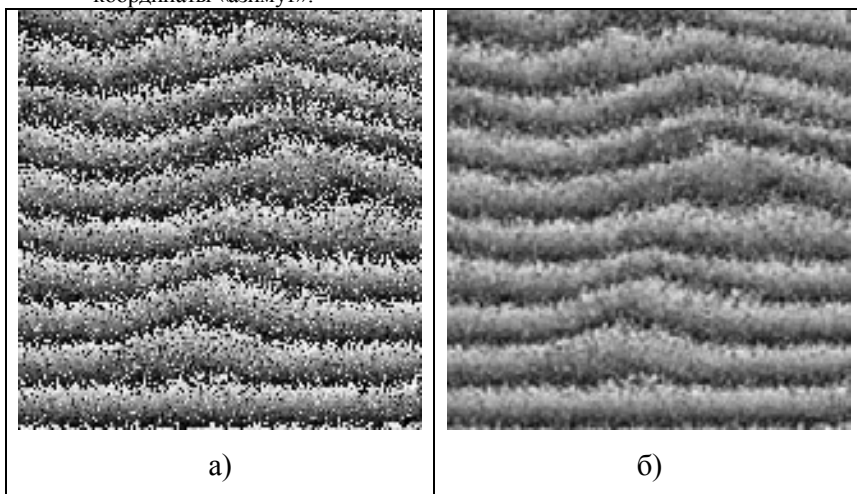


Рис. 4.5 Фильтрация шумов интерферограммы. а) до фильтрации; б) после фильтрации фильтром размера 3x3; в) после фильтрации фильтром размера 5x5

По оси абсцисс отложены номера столбцов матрицы изображения. Из приведенных данных следует, что интерференционные полосы на части интерферограммы расположены параллельно друг другу примерно на одинаковом расстоянии.

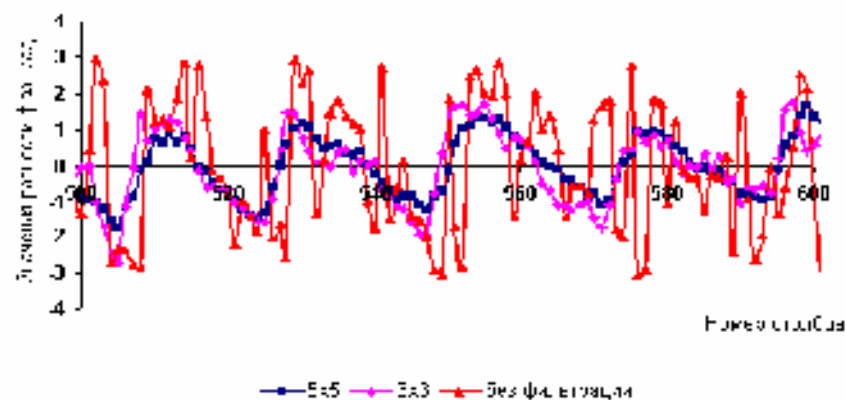


Рис. 4.6. Разности фаз до и после фильтрации вдоль выбранной дальности.

Это свидетельствует об отсутствии неровностей рельефа на данном участке. Компенсация интерферограммы гладкой Земли подтверждает это обстоятельство. На рис. 4.7 показана интерферограмма после компенсации набега фазы вдоль гладкой Земли, вариации на которой, таким образом, характеризуют только вариации рельефа.



Рис. 4.7. Интерферограмма после компенсации набега фазы вдоль гладкой Земли.

Компенсация интерферограммы гладкой Земли проводилась следующим образом. Из выражения (4.4) для интерференционной фазы Земли с рельефом вычиталось соответствующее значение интерференционной фазы для гладкой Земли

$$\Phi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} \left[\sqrt{r_1^2 + B^2 - 2r_1B \sin(\theta_0 - \alpha)} - r_1 \right], \quad (4.6)$$

где θ_0 – угол обзора для гладкой Земли.

Значения r_1 , θ_0 и угол падения θ_i выражались через наземную дальность R_g :

$$r_1 = \sqrt{\rho^2 + R_0^2 - 2\rho R_0 \cos \frac{R_g}{R_0}}$$

где R_0 – расстояние от центра Земли до поверхности гладкой Земли (радиус Земли для сферической Земли).

$$\theta_1 = R_g / R_0,$$

$$\theta_0 = \theta_i - \theta_1,$$

$$\theta_i = \arcsin(\rho \sin \theta_1 / r_1).$$

Переменная R_g определяется как $R_{gmin} + id$, где i – номер столбца, d – расстояние между строками. R_{gmin} задается соотношением

$$R_{gmin} = R_{gc} - \frac{\Delta R_g}{2},$$

где ΔR_g – размер сцены вдоль наземной дальности, R_{gc} – наземная дальность центра сцены.

$$R_{gc} = R_0 \arccos \left(\frac{R_0 \sin^2(\theta_{ic}) + \cos(\theta_{ic}) \sqrt{\rho^2 - R_0^2 \sin^2(\theta_{ic})}}{\rho} \right),$$

θ_{ic} – угол падения в центре сцены.

Значение базы B и угла α находилось методом подбора соответствующих значений B и α с последующим сравнением расчетных и экспериментальных интерференционных зависимостей на участке, где экспериментальные кривые имеют наиболее регулярный ход, соответствующий ровной поверхности. На рис. 4.8 показана экспериментальная зависимость интерференционной фазы вдоль столбца и рассчитанная зависимость для гладкой Земли, взятая по модулю 2π . Значение базы B , полученное таким образом, составило 230м, а угла α – 51° .

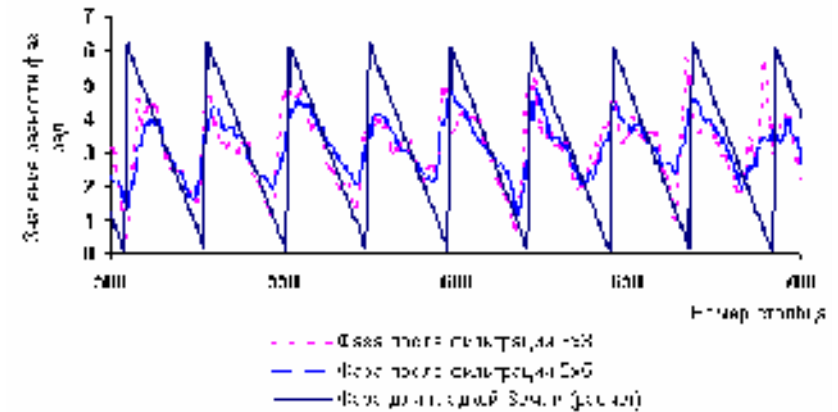


Рис. 4.8 Экспериментальная и расчетная зависимости свернутой фазы от номера столбца.

Как отмечалось выше, этап развертки фазы наиболее сложен вследствие неизбежного наличия на интерферограмме шумов. Существующие в настоящее время методы развертки фазы обычно подразделяют на локальные и глобальные. Локальные методы основаны на интегрировании фазы по путям, не пересекающим разрезы, соединяющие особые точки. В глобальных методах существующая фаза приближается другой, с однозначно интегрируемыми производными. Например, в методе наименьших квадратов развертка фазы достигается минимизацией квадратичных отклонений дискретных производных развертываемой фазы от соответствующих производных исходной свернутой фазы. Глобальные методы покрывают все изображение целиком, однако при таком подходе решение может замет-

но искажаться вблизи проблемных точек и областей. Для развертки фазы полученной интерферограммы был использован локальный метод интегрирования фазы. Выделение особых точек – «вычетов» показало, что на нефильтрованной интерферограмме их число составило 2366 тысяч. Фильтрация окном 3x3 привела к сокращению особых точек до 125 тысяч, а фильтрация окном 5x5 вообще устранила их. Поэтому восстановление фазы проводилось простейшим интегрированием (суммированием) по всем строкам и столбцам интерференционной матрицы. Вначале проводилось интегрирование по первому столбцу, затем последовательно по всем строкам интерферограммы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокационные методы исследования Земли. Под ред. Ю.А. Мельника. –М.: Сов. радио, 1980.
 2. Кашкин В.Б., Сухинин .И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. – М.: Логос, 2001.
 3. Захарова Л.Н., Захаров А.И. Сравнение некоторых современных методов разворота разности фаз в радиолокационной интерферометрии. // Радиотехника и электроника, 2003, том 48, №10, с. 1208-1213.
 4. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. - М.: Мир, 1988.
 5. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
- Интернет – источники:**
1. <http://ggd.nsu.ru/iso/ecogis/RS/content.html>
 2. <http://www.sovzond.ru/main/main.html>
 3. <http://www.asf.alaska.edu/>
 4. http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam_fundam_e.html
 5. <http://www.transparentworld.ru/edu/>
 6. <http://www.scanex.ru/rus/lakm/history.htm>

Содержание

Предисловие.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	9
1.1 Электромагнитные волны и их свойства.....	9
1.2. Влияние атмосферы на регистрируемое излучение.....	11
1.3. Солнечное излучение и его взаимодействие с земной поверхностью.....	14
1.4. Собственное излучение Земли.....	22
1.5. Основные понятия дистанционного зондирования.....	24
2. РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ. АППАРАТУРА. СЪЕМКИ. СНИМКИ.....	33
2.1. Фотохимическая и электрическая регистрация излучения...	33
2.2.Съемочная аппаратура.....	37
2.3. Аэро- и космическая съемки.....	46
2.4.Снимки.....	50
2.4.1. Разрешающая способность и пространственное разрешение аэрокосмических снимков.....	50
2.4.2. Классификация и характеристики основных видов снимков.....	53
3. МИКРОВОЛНОВОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ.....	61
3.1. Принципы радиолокации.....	61
3.2. Геометрия съёмки и пространственное разрешение.....	63
3.3. Искажения радарных изображений.....	68
3.4. Взаимодействие излучения с земной поверхностью и формирование изображения.....	70
3.5. Свойства радиолокационного изображения.....	73
3.6. Современные методы применения радиолокационного зондирования.....	75
4.ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РАДАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	77
4.1. Принципы радарной интерферометрии.....	77
4.2 Построение цифровой модели рельефа.....	79
4.3 Цифровая модель рельефа для участка земной поверхности вблизи озера Байкал.....	81
Список литературы.....	86

Учебно-методическое издание

Павел Николаевич Дагуров
Тумэн Намжилович Чимитдоржиев

Методы дистанционного исследования земной поверхности

Редактор Д. Д. Филиппова
Компьютерная верстка О. Р. Цыдыповой
Корректор Э. Б. Шоймполова

Лицензия ЛР №021274 от 26 марта 1998 г.

Подписано в печать 12.07.05. Формат 60x84 1/16. Бум. тип. №1
Усл. печ. л. 5,5. Уч.-изд. л. 5,2. Тираж 100. Заказ №
Цена договорная.

Издательство ФГОУ ВПО «Бурятская государственная
сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова»
670024, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8.