



Тема лекции 3. Работа с данными дистанционного зондирования Земли

Вопросы:

- 3.1. Базы данных дистанционного зондирования и их свойства.**
- 3.2. Данные дистанционного зондирования среднего и высокого разрешения, их характеристики.**
 - 3.2.1. Особенности представление видеоданных в гиперспектральной системе ДЗЗ
 - 3.2.2. Бортовые гиперспектрометры КЛА
 - 3.2.3. Аппаратный комплекс TERRA/ASTER
 - 3.2.4. Аппаратный комплекс TERRA/MODIS и AQUA/MODIS
 - 3.2.5. Аппаратный комплекс ДЗЗ КА EO-1 (HYPERION, ALI)
- 3.3. Радарная и лидарная съемки местности**
 - Вопрос 3.3.1. введение в радарную съемку
 - Вопрос 3.3.2. Принцип радиолокационной съемки
 - Вопрос 3.3.3. Геометрия радиолокационной съемки
 - Вопрос 3.3.4. Спектральные диапазоны длин волн
 - Вопрос 3.3.5. Поляризация
- 3.4. Радиометрическая корректировка данных дистанционного зондирования.**
- 3.5. Формирование синтезированных изображений.**
- 3.6. Паншарпенинг данных дистанционного зондирования.**
- 3.7. Перепроецирование, конвертация, переструктуризация и агрегирование данных дистанционного зондирования**

Литература

1. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие / О. С. Токарев. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 148 с.
2. Чандра А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – Москва: Техносфера, 2008. – 312 с.
3. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
4. Жиленев М. Ю. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке / М. Ю. Жиленев // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 56–64.
5. Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
6. Сухих В. И. Аэрокосмические методы исследования в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве / В. И. Сухих. – Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2005. – 392 с.
7. Малинников В.А., Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами – М.: Изд-во Миигаик 2009. – 140 с.

8. Козодеров В.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного зондирования. Учебное пособие. М.: МФТИ, 2008 – 222 с.

9. Гарбук СВ., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. — М.: Издательство А и Б, 1997. — 296 с,

10. Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты : [учеб. пособие] / [В. Г. Коберниченко, О. Ю. Иванов, С. М. Зраенко и др. ; под общ. ред. В. Г. Коберниченко]. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — 168 с.

Вопрос 3.1. Базы данных дистанционного зондирования и их свойства.

Базы данных дистанционного зондирования содержат информацию о различных объектах и явлениях на Земле, полученную с помощью различных методов дистанционного зондирования, таких как спутниковые снимки, аэрофото съемка, лазерное сканирование и другие. Эти данные могут быть использованы для различных целей, таких как мониторинг окружающей среды, оценка состояния природных ресурсов, изучение климатических изменений и многое другое.

Одним из основных свойств баз данных дистанционного зондирования является их пространственное разрешение. Пространственное разрешение определяет, насколько детальными могут быть полученные данные. Чем выше пространственное разрешение, тем более детальными будут полученные данные и тем больше информации можно будет извлечь из них.

Еще одним важным свойством баз данных дистанционного зондирования является временное разрешение. Временное разрешение определяет, как часто данные обновляются и как долго они хранятся в базе данных. Чем выше временное разрешение, тем быстрее обновляются данные и тем дольше они сохраняются в базе.

Кроме того, базы данных дистанционного зондирования могут иметь различные форматы данных, такие как изображения, цифровые модели рельефа, векторные данные и другие. Формат данных определяет, как данные представлены в базе и какие инструменты могут быть использованы для работы с ними.

В целом, базы данных дистанционного зондирования являются важным инструментом для изучения и мониторинга Земли и ее ресурсов.

Они предоставляют огромное количество данных, которые могут быть использованы в различных областях науки, техники и экономики.

Крупнейшими базами данных дистанционного зондирования являются

1. NASA Earth Observatory - <https://earthobservatory.nasa.gov/>
2. European Space Agency (ESA) - https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/
3. US Geological Survey (USGS) Earth Explorer - <https://earthexplorer.usgs.gov/>
4. Google Earth Engine - <https://developers.google.com/earth-engine/>
5. Copernicus Open Access Hub - <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>
6. WorldView - <https://worldview.earth/>

7. DigitalGlobe - https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/1540/DG_Product_Catalog.pdf
8. SentinelHub - <https://apps.sentinel-hub.com/>
9. Planet - <https://planet.com/products/planet-developer-platform/>
10. Microsoft Azure - <https://azure.microsoft.com/en-us/services/remote-sensing/Radarsat> - <https://rs.ca/en/home>
11. Spot Image - <https://spotimage.com/fr/produits/>

Эти ресурсы предоставляют доступ к базам данных дистанционного зондирования Земли, которые могут быть использованы для анализа, мониторинга и изучения земной поверхности. Они предлагают широкий спектр изображений, полученных со спутников и других источников, с различными пространственным и временным разрешением.

Вопрос 3.2. Данные дистанционного зондирования высокого спектрального разрешения, их характеристики.

Разработка аппаратуры и методов дистанционных наблюдений высокого спектрального разрешения для решения различных задач в области изучения и картографирования природных ресурсов и состояния окружающей среды, мониторинга рисков ведутся на протяжении двух десятилетий. Общие тенденции расширения электромагнитного (диапазона дистанционных наблюдений в длинноволновую его часть до средней и дальней ИК-области с разбиением их на большое количество интервалов привели разработчиков к концепции построения гиперспектральных (видеоспектрометрических) систем ДЗЗ. При этом, особое внимание было сфокусировано на приборах и методах наблюдения и оптическом и ближнем ИК-диапазонах (0,4-2 мкм).

Традиционно, здесь широко применялись многоспектральные (мультиспектральные) системы, которые имели 3-7 спектральных каналов со спектральным разрешением не более 25 нм. При переходе к **гиперспектральным технологиям** дистанционного зондирования число спектральных каналов может достигать 128-512 при очень высоком спектральном разрешении (от 0,1-10 нм) и достаточно хорошим пространственным разрешением (до нескольких метров), что позволит обеспечить совершенно новый, уникальный качественный характер данных дистанционных наблюдений.

Вопрос 3.2.1. Особенности представление видеоданных в гиперспектральной системе ДЗЗ

Несмотря на аналогию методики получения мультиспектральных и гиперспектральных снимков, получаемые гиперспектральные изображения сходны с мультиспектральными, но отличаются от последних тем, что у съемочной системы количество информационных каналов не ограничивается несколькими спектральными диапазонами. При формировании гиперспектрального изображения из собранных данных создается «куб данных» или «кубическая модель изображения»,

которая отображает объекты и спектральную информацию, не доступную для обычных мультиспектральных сканеров. Схематично это можно представить в виде спектрального куба (рис. 3.1). Здесь x , y - пространственные координаты изображения объектов местности, а X - число спектральных каналов, каждый из которых дает собственное спектральное значение элементам изображения местности.

Основным информационным показателем является спектральная кривая, которая отражает зависимость между длиной волны и отражательной способностью исследуемого типа объекта (рис. 3.2).

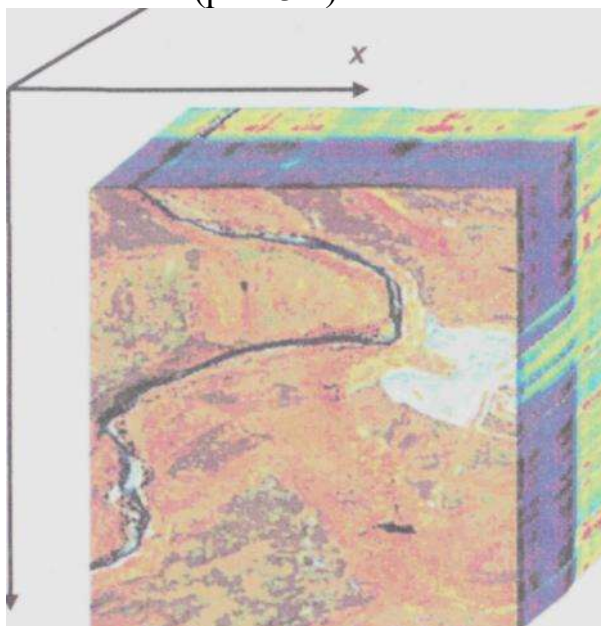


Рис. 3.1. Кубическая модель гиперспектрального изображения

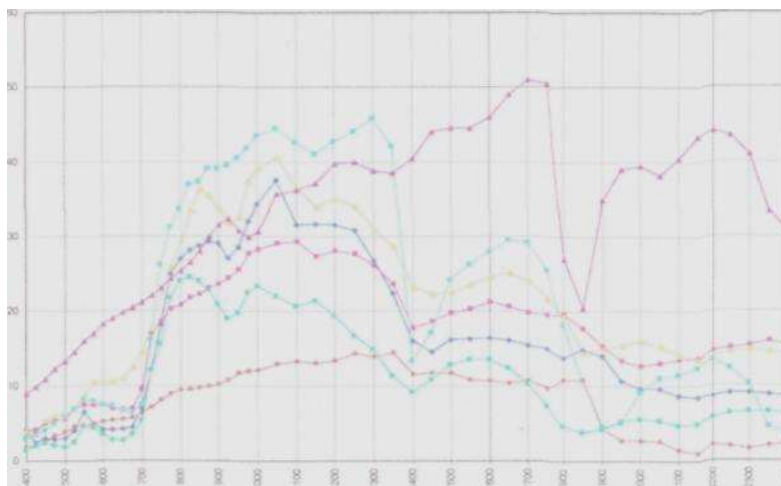


Рис. 3.2. Спектральные сигнатуры семи объектов ландшафта средней полосы России в 55 каналах, спектральное разрешение 25 нм

Но форме спектральной кривой можно различать объекты. Например, растительность имеет высокую отражательную способность в ближнем инфракрасном диапазоне и низкую отражательную способность и, в среднем по сравнению с почвами.

На разных спектральных каналах каждый элемент изображения, в зависимости от своей отражательной способности соответствующего шемента ландшафта, оставляет уникальную спектральную сигнатуру). которую также называют кривой спектрального отражения. Разные материалы распознаются по общей форме спектральной кривой, а также расположению и яркости полос поглощения. Спектры отражения материалов, чей состав известен, рассчитываются в лабораторных условиях, а затем собираются в библиотеку спектров, что облегчает анализ гиперспектральных снимков. В открытом доступе находится несколько библиотек, содержащих спектры отражения природных и искусственных материалов. Эти библиотеки дают сведения, облегчающие дешифрирование гипер- и мультиспектральных снимков.

В многоспектральном датчике электромагнитное излучение разбивается на множество узких, смежных полос, и энергия в каждой полосе измеряется отдельным датчиком.

Мировая тенденция развития относительно новой и пока не получившей широкого практического использования технологии гиперспектрального ДЗЗ из космоса свидетельствует о ее перспективности. Необходимость внедрения в практику ДЗЗ детальных (в смысле спектрального разрешения, но, к сожалению, в ущерб пространственной разрешающей способности) съемочных систем видеоспектрометрического класса - это можно рассматривать как одно из условий дальнейшего эффективного применения космических систем ДЗЗ.

Первый проект гиперспектральной съемки (после неудачи с выводом КА Lewis с гиперспектрометром на борту в 1997 г.) был реализован запуском в 2002 г. экспериментального КА EO-1, на борту которого работал гиперспектрометр Hyperspec (съемочная система имела 220 каналов в видимой и ИК-области диапазона электромагнитных колебаний 0,4-2,5 мкм). Пространственное разрешение снимков прибора - 30 м.

Второй космический гиперспектрометр FTNSI был установлен на борту КА MightySat 11. Камера FTNSI работает в диапазоне 0,45-1,05 мкм, разделенном на 145 каналов и позволяет получать снимки с пространственным разрешением лучше 30 м. В процессе обработки на борту спутника спектральные изображения сравниваются с массивом эталонных данных. На наземную станцию передается только отобранная (представляющая интерес) в результате бортовой обработки видеoinформации. Несмотря на то, что гиперспектральная камера FTNSI была создана по заказу ВВС США, было достигнуто соглашение с фирмой Kesler Corp. на открытие доступа экологических и коммерческих организаций к некоторым изображениям, а также на выполнение ряда заказов на съемку в гражданских целях.

В настоящее время разработан целый ряд видео- или гиперспектрометров высокого спектрального и пространственного разрешения, использующие различные физические принципы разложения спектра и оптико-электронного сканирования. Из них действующими российскими образцами являются следующие видеоспектрометрические комплексы: гиперспектральная аппаратура разработки

НТЦ «Реагент» при участии ОАО «Газпром», видеоспектрометр «Фрегат» разработки ООО «Аэроэкологии», гиперспектральная оптико-электронная камера «ГСК-3Л» разработки НПО «Лептон» и др. Этот тип данных нашел широкое применение лишь в последнее время. Это объясняется недавним запуском спутников с датчиками такого типа на борту, а следовательно, данные стали легкодоступны.

Что из себя представляют многоспектральные и гиперспектральные изображения? Многоспектральные изображения получаются цифровыми датчиками (обзорными спектрометрами), которые измеряют отраженную от поверхности Земли энергию в разных спектральных диапазонах. Принцип получения гиперспектральных изображений тот же, что и многоспектральных. Отличие состоит в том, что многоспектральные датчики имеют десятки каналов, а гиперспектральные - со-ши. Это позволяет в определенном диапазоне длин волн производить съемку практически непрерывного спектра. Используя эту особенность, можно довольно точно определять сканируемую поверхность, например, состав горных пород, тип растительности, почвы. Можно находить сами объекты, используя спектральные банки данных.

Вопрос 3.2.2. Бортовые гиперспектральные датчики КЛА

В настоящее время на околоземных орбитах работают более десятка космических аппаратов, на борту которых имеются гиперспектральные сенсоры. В табл. 4.1 представлены сравнительные технические характеристики гиперспектральных систем, информация с которых наиболее доступна широкому кругу заинтересованных пользователей.

Таблица 3.1 Сравнительные характеристики зарубежных действующих и перспективных гиперспектральных сенсоров космического датирования

Сенсор	Агентство, страна	КА программа	Дата	Ширина полосы обзора, км	Пространственное разрешение	Количество каналов	Спектральный диапазон, нм
MODIS	NASA	TERRA(EOS) AQUA(EOS)	1999	2330	250(каналы 1-2) 500 (каналы-7)	36	405 2155 (каналы 1-19) 3660-14385 (каналы 20-36)
ASTER	NASA	TERRA(EOS)	1999	60	15 (каналы 1 3) 30(каналы 3 7) 90(каналы 4-9)	14	520 860 (каналы 1 3) 1600-2430 1 каналы 4-9) 8125 11650
MERIS	ESA	ENVISAT	2000	1150	300	15	400-800
"Hyperion	NASA	EO-1	2000	7,54 01)	30x30	220	400 2500
ALI	NASA	EO-1	2000	37	30x30	9	433-2350
GLI	NASDA (Japan)	ADEOS-2	20(H)	1600	250 1000	36	400-2500

LISS-3	India	IRS-2A	2000	127 134	237	4x23	520-1700
FTHSI	DANA/ ASC	Mihytosat-2.1	2000	15*20	30	150	450 1050
Warfighter HSI	DANA/ ASC	Warfighter-1 ISTD	2001	5 (5x20)	8	280	450 5000
COIS	ONR/ STDC	NEMO	>2006	20 (20x100)	30x30	210	400-2500
ARIES	CSIRO (Австра- лия)	ARIES	>2006	15	30x30	128	400 2500
PRISM	ESA	Earth Ex- plorer	2003	50	50	190	400 2500
GLI-2	NASDA (Japan)	ADEOS- 2++	2004	1500	75 250	42	-
AMODI S	NASA	EOS-AM2	-	-	-	-	-
SkyMed -	ASI (Италия)	COSMO- Sky Med	2007	10-200	10	-	-
AMODI S	NASA	EOS-PM2	2006	-	-	-	-

Рассмотрим целевую аппаратуру, позволяющую получить реальный результат при мониторинге природной среды, в частности, слежением за изменчивостью лесного фонда, поиске полезных ископаемых и др.

Вопрос 3.2.3. Аппаратный комплекс TERRA/ASTER

Космический аппарат TERRA (рис. 4.4) был запущен NASA 18 декабря 1999 г. с авиабазы Ванденберг (США). Аппаратура ДЗЗ спутника TERRA - это пять съемочных систем, предназначенных для одновременного согласованного сбора информации о радиационном балансе Земли, атмосферной циркуляции, взаимодействии суши и океанов. биопродуктивности. свойствах поверхности суши: На ее борту функционирует 5 сенсоров: ASTER, CERES, MISR, MODIS, MOPITT.

ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) усовершенствованный термально-оптический радиометр космического базирования. Своему появлению ASTER обязан совместному проекту NASA, японского министерства экономики, торговли и промышленности (METI) и японского Центра анализа данных ДЗЗ ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*). КА выведен на солнечно-синхронную круговую орбиту высотой 705 км с периодом обращения 98,9 мин (периодичность съемки одного участка земли - 16 шей). Расчетный срок пребывания на орбите составляет 6-7 лет.

Собственно комплекс ASTER состоит из трех различных подсистем: SWIR (видимый диапазон и ближний ИК). позволяет получать данные с разрешением до 15 м, SWIR (коротковолновый ИК диапазон) с пространственным разрешением 30 м и TIR (тепловой ИК диапазон) с пространственным разрешением 90

м. Основным преимуществом является широкий спектральный диапазон и возможность стереосъемки.

Сегодня материалы съемок с борта спутника ASTER интенсивно используются для получения детальных карт температуры поверхности Земли, коэффициента излучения, отражательной способности и преломления. Из всех датчиков, установленных на спутнике TERRA, ASTER - единственный радиометр с высоким пространственным разрешением. Он воспринимает излучения в видимом, ближнем, среднем ПК (или тепловом) диапазонах, размер сцены 60*60 км.

В целом, области применения данных дистанционного зондирования, полученных со спутника ASTER, направлены на детальное картографирование и обновление картографического матришта масштаба до 1:100 000; создание ЦМР с точностью порядка 25-30 м и детальное изучение рельефа и морфологии элементов земной поверхности: исследование глобальных изменений больших территориальных комплексов; мониторинг природных катастроф, а также геологические, гидрологические, климатологические, почвенные исследования.

Абсолютная радиометрическая точность по спектральным зонам составляет 4% для видимого и ближнего инфракрасного диапазона, и 1-3°K для теплового диапазона, в зависимости от температуры. Зоны видимого и SWIR диапазона предназначены для измерения характеристик снежного покрова, воды, растительности и степени окисления поверхности объектов. Зоны SWIR диапазона оптимальны для распознавания минералов, в особенности гидратированных минералов в глинистых почвах. Зоны теплового диапазона предназначены для регистрации температуры земной поверхности и дешифрирования основных типов горных пород

Основные технические характеристики целевой аппаратуры представлены в табл. 3.2, а пример изображения, полученного с КА TERRA, представлен на рис. 3.3.

Таблица 3.2

Технические характеристики целевой аппаратуры

Страна	США		
Оператор	NASA/CSA		
Оборудованные на борту КА	ASTER - гиперспектральная 14-канальная съемка в диапазоне от 0,52 до 11,65 мкм с разрешением 15-90 м и стереосъемка в диапазоне 0,76-0,86 мкм, CERES (<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>) - съемка в трех широких спектральных зонах в диапазоне от 0,3 до более 100 мкм с разрешением от 20 км (в надире), MISR (<i>Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer</i>) - четырехзональная съемка под 9 углами наклона в диапазоне от 0,42 до 0,87 мкм с разрешением от 250*275 до 1100x1100 м, MODIS (<i>Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer</i>) - гиперспектральная 36-канальная		
Мощность, Вт	2053		
Режимы:	VNIR	SWIR	TIR

Номер каяала: спектральный диапазон, нм	1: 0,52-0,60 2: 0,63-0,69 3N: 0,76-0,86 3B: 0,76-0,86	1,600-1,700 2,145-2,185 2,185-2,225 2,235-2,285 2,295-2,365	10:8,125-8,475 11:8,475-8,825 12: 8,925-9,275 13: 10,25-10,95 14:10,95-11,65
Пространственное разрешение, м	15	30	90
Скорость передачи данных на наземный сегмент, Мбит/с	62	23	4,2
Ширина полосы съемки, км	60	60	60
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	8	8	12
Формат видеоданных Обработка	GeoTIFF Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции		
Периодичность съемки, дни	16		
Возможность получения стереотары	Да, с одного витка		
Срок выполнения заказа (для архивных данных), дни	7-14		
Минимальная площадь заказа (одна с цена для архивных данных), км	60*60		
Масса, кг	1350		
Орбита	Круговая, солнечно-синхронная		
Высота, км	514		
Наклонение, градусы	97,4		
Период обращения, мин	95		
Период поет, просмотра, сут	11		

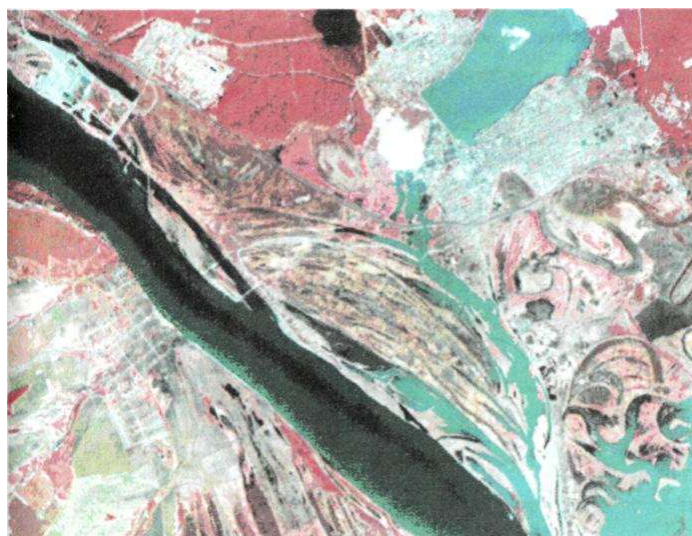


Рис. 3.3. Изображения земной поверхности, полученные КА TERRA (радиометр ASTER), разрешение 15 м

Вопрос 3.2.4. Аппаратный комплекс TERRA/MODIS и AQUA/MODIS

Космический аппарат AQUA был запущен 4 мая 2002 г. с авиабазы Ванденберг (США). Спутник AQUA является частью комплексной программы НАСА ЕОА (*Earth Observing System*), направленной на исследование Земли, и состоящей из трех специализированных спутников TERRA (EOS-AM1), AQUA (EOS-PM1) (Aqua) и AURA (EOS-AM 1), предназначенных для исследования суши, воды и атмосферы соответственно. Спутник AQUA как и спутник TERRA имеет солнечно-синхронные полярные орбиты (высота - 705 км, период обращения - 99 мин, наклонение - $98,2^\circ$). Но спутник EOS-AM, двигаясь по орбите, пересекает экватор с севера на юг в 10 ч 30 мин по местному времени, а спутник EOS-PM - с юга на север - в 13 ч 30 мин). Срок службы каждого спутника 5 лет, по его истечении планируются дальнейшие запуски. Вся программа рассчитана на 15 лет.

На борту спутника AQUA установлены шесть научных инструментов, часть из которых предназначена для изучения свойств облачного покрова и определения температуры воды в морях, другая - для определения температуры атмосферы Земли и ее влажности.

Одним из ключевых инструментов американских спутников серии EOS является спектрорадиометр MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем и ИК-диапазонах и позволяет производить регулярную съемку одной территории с пространственным разрешением до 250 м. Расчетный срок пребывания на орбите составляет около 6 лет. Характеристики спектральных каналов сканера и группы природохозяйственных и научных задач по диапазонам приведены в табл. 4.3.

Области применения данных дистанционного зондирования, полученных со спутника AQUA:

- гидрометеорология, океанография и океанология;
- экологический мониторинг территории;
- мониторинг снежного и ледового покрова;
- обнаружение лесных пожаров и оценка причиненного ущерба;
- исследования почв и растительности;
- изучение озонового слоя;
- решение прикладных задач.

Примеры изображений, полученных с КА TERRA/MODIS, представлены на рис. 3.4 и 3.5, а основные технические характеристики целевой аппаратуры - в табл. 3.3.

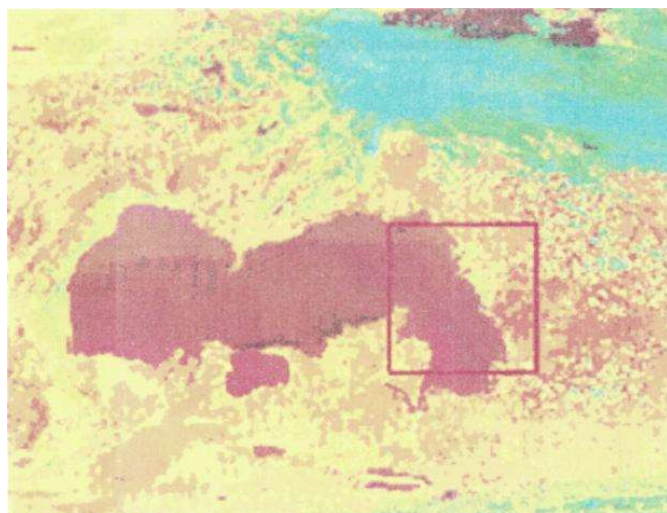


Рис. 3.4. Гиперспектральное изображение акватории Каспийского моря, разрешение 30 м

Т а б л и ц а 3.3. Характеристики спектральных каналов системы TERRA/MODIS

Разрешение, м	Группа	Номер канала	Длина волны, мкм	Объект (предмет) исследования
250	А	1	0.620-0.670	Контуров облаков и земных объектов
		2	0,841-0.876	
500	В	3	0.459-0,479	Свойства облаков и земных объектов
		4	0.545-0.565	
		5	1.230-1.250	
		6	1.628-1.652	
1000	С	7	1.628-1.652	Цвет, фитопланктон и биогеохимия океана
		8	0.405-0,420	
		9	0,438-0,448	
		10	0.483-0.493	
		11	0.526-0.536	
		12	0.546-0,556	
		13	0.526-0.536	
		14	0,546-0,556	
1000	D	15	0.662 0.672	Водяной пар
		16	0.673 -0,683	
		17	0,890-0.920	
1000	П	18	0.931 0.941	Температура облаков и поверхности Земли
		19	0.915-0.965	
		20	3,660-3,840	
1000	F	21	3,929-3,989	Температура воздуха
		22	3.929-3,989	
		23	4.020-4.080	
1000	G	24	4,433-4,498	Перистые облака, водяной пар
		25	4,482-4,549	
1000	G	26	1.360 1.390	

1000	H	27	6.535-6.895	Свойства облаков
		28	7.175-7.475	
		29	8,400-8.700	
1000	I	30	9,580-9.880	Озоновый слой
1000	K	31	10,780-11.280	Температура облаков и поверхности Земли
		32	11.770-12.270	
1000	L	33	13.185-13,485	Высота верхней границы облаков
		34	13.485-13.785	
		35	13,785-14.085	
		36	14.085-14,385	

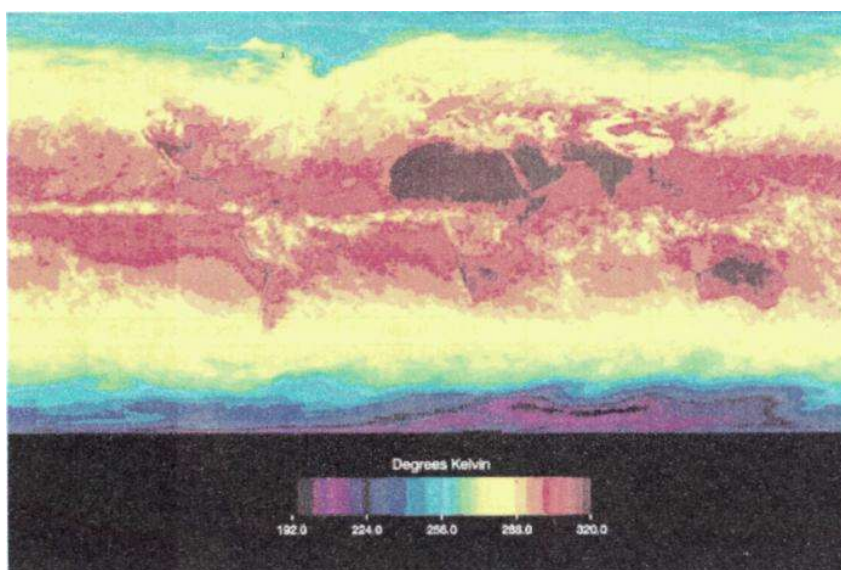


Рис. 3.5. Синтезированное изображение земной поверхности

Технические характеристики целевой аппаратуры

Режимы/Каналы.....	1/2; 3/7; 8/19; 20/25; 26; 27/36
Спентральный диапазон, мкм.....	0,62- 0,88; 0,46 -2,16; 0,41-0,97; 3,66-4,55; 1,36 -1,39; 0,54-14,39
Пространственное разрешение, м	250; 500; 1000
Ширина полосы съемки, км.....	2300
Радиометрическое разрешение, бит/пиксел	12
Периодичность съемки, дни.....	2-3

Вопрос 3.2.5. Аппаратный комплекс ДЗЗ КА EO-1 (HYPERION, ALI)

Космический аппарат EO-1 (*Earth Observing-1*) был запущен 21 ноября 2000 г. с авиабазы Ванденберг (США). Спутник EO-1 стал первым спутником программы «Новое тысячелетие», проводимой NASA. Основная идея разработки

спутника состояла в поиске замены космическую аппарата Landsat-7, действующего на орбите начиная с 1999 г. Спутник EO-1 был выведен на полярную солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км (в плоскость орбиты Landsat-7, но с отставанием на одну минуту). EO-1 несет на своем борту полезную нагрузку и виде приборов ALI, HYPERION и дополнительно - аппаратуру LAC, которая позволяет установить и исключить возмущающее влияние атмосферы. Гиперспектральный сенсор HYPERION предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением до 30 м в 220 спектральных диапазонах видимой и инфракрасной областях. КА EO-1 со съемочной аппаратурой движется по той же орбите, что и Landsat-7, отставая от последнего на 1 мин. что позволяет проводить сравнительный анализ снимков, полученных этими двумя космическими аппаратами. Изначально планировался годовой орбитальный полет спутника, но после успешного завершения этого периода было принято решение о продлении пребывания EO-1 на орбите на неопределенный срок.

Гиперспектрометр HYPERION снимает территорию размером 7,5 x 100 км, фиксируя ее спектральные особенности во всех 220 диапазонах с высокой радиометрической точностью. Использование нескольких сотен спектральных диапазонов вместо традиционных десяти позволяет детально изучить сложные экосистемы (береговые линии, леса, города, сельскохозяйственные области). Как показывает опыт, гиперспектральная съемка чрезвычайно эффективна в геологии и горном деле, для оценки и прогноза урожая и т.п. В состав системы HYPERION входят оптическая система с телескопом, основой для которой стала аппаратура EOC спутника KOMPSAT и два видовых спектрометра. Кроме того, узел приемников излучения фокальной плоскости с отдельными коротковолновыми и длинноволновыми детекторами (запасной комплект от LEWIS) и криохолодильник для охлаждения коротковолновых детекторов, идентичный установленному на КА LEWIS.

Как отмечено выше, на борту EO-1 впервые была установлена и успешно внедрена аппаратура коррекции изображений, искажаемых поглощением и рассеянием света в атмосфере - главным образом из-за водяного пара. Прибор LAC (*Linear Etalon Imaging Spectrometer Array Atmospheric Corrector*) разработан Директоратом прикладной техники и технологии Центра Годдарда NASA. Это так же гиперспектральный инструмент умеренного пространственного разрешения с клиновидным фильтром. Рабочие диапазоны выбраны в пределах 0,85-1,5 мкм так, чтобы обеспечивать оптимальную коррекцию снимков с высоким пространственным разрешением. Коррекция данных осуществляется за счет измерения фактических, а не модельных уровней поглощения. Ожидается, что работа LAC позволит повысить точность оценки отражающих свойств поверхности. Такая аппаратура может быть установлена на любом научном или коммерческом аппарате ДЗЗ.

Основные технические характеристики целевой аппаратуры представлены в табл. 3.4.

Т а б л и ц а 3.4. Технические характеристики целевой аппаратуры

Страна	США		
Оператор	NASA		
Оборудование	Прибор ALI (<i>Advanced Land Imager</i>), гиперспектральный инструмент HYPERION, Прибор атмосферной коррекции LAC (<i>Atmospheric Corrector</i>)		
Режимы	Гиперспектральный	Мультиспектральный	Панхроматический
Спектральный диапазон, мкм	0,43-2,40 (220 каналов)	0,433-0,453 0,450-0,515 0,525-0,605 0,630-0,690 0,775-0,805 0,845-0,890 1,200-1,300 1,550-1,750 2,080-2,350	0,480-0,690
Спектральное разрешение, нм	10	25-200	-
Пространственное разрешение, м	30	30	10
Ширина полосы съемки, км	37		
Скорость передачи данных на наземный сегмент, Мбит/с	105		
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	16		
Периодичность съемки, сут (на широте России)	16		
Масса, кг	3150		
Орбита	Круговая солнечно-синхронная		
Высота, км	705		
Наклонение, Градусы	98,7		
Период обращения, мин	99,8		
Мощность, Вт	2200		
Телеметрия	С-диапазон; горизонтальная поляризация		

Успешно отработав годовой испытательный орбитальный полет, КА EO-1 позволил апробировать инструменты с уникальными спектральными и пространственными характеристиками, а также внедрить новейшие технологии, нацеленные на снижение стоимости и повышение производительности будущих миссий спутниковых систем семейства LANDSAT.

Вопрос 3.3. Радарная и лидарная съемки местности.

Вопрос 3.3.1. Введение в радарную съемку

В настоящее время все более востребованными становятся данные радиолокационного наблюдения (РЛН) с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Это продиктовано как теоретическими возможностями (всепогодное и круглосуточное наблюдение, расширенные возможности дешифрирования и оценки обстановки, формирование цифровых моделей рельефа наблю-

даемой поверхности и др.) так и появлением КА РЛН с продвинутыми техническими характеристиками получаемых радиолокационных данных (геометрическое разрешение, отношение сигнал/шум, точность геопривязки).

В космических аппаратах радиолокационного наблюдения используются радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА, англ. SAR). При этом, в мире все больше внимания уделяется разработке РСА и программных комплексов формирования радиолокационных изображений (РЛИ), высокого (1 метр и более) и сверхвысокого (менее 1 метра) разрешения. Также, в развитии РСА можно отметить такие направления как сокращение периодичности наблюдения до одних суток (в том числе, для обеспечения возможности получения интерферометрических пар РЛИ), использование различных диапазонов частот и типов поляризации (в том числе, для повышения информативности РЛИ). Обработанные РЛИ используются для решения ряда тематических задач, в том числе, для оценки характеристик наблюдаемых пространственно распределенных объектов (количественные характеристики нефтяных разливов, оценка площадей пожаров и наводнений, оценка урожайности и объема биомассы растительности, контроль границ застройки, целостность дорог, трубопроводов и др.).

Решаемые задачи определяют требования к РСА по разрешающей способности. В таблице ниже в качестве примера приведен список задач и соответствующих требований к ним по разрешению в метрах.

Таблица 3.5. Задачи радарной съемки и требования к их обеспечению

Решаемые задачи / Наименование объекта	Обнаружение, м	Распознавание, м (общее / точное)	Детальное описание, м
Общие задачи ДЗЗ			
Мониторинг ледовых образований	---	1000 / 300	---
Судоходство, рыбная ловля	300	30 / 15	---
Мониторинг растительности, лесов, землепользование	---	25 / ---	2 - 5
Экологический мониторинг	---	25 / ---	2 - 5
Геологическое картирование	---	25 / ---	3
Мониторинг чрезвычайных ситуаций			
Землетрясения, извержения	---	25 / ---	2 - 5
Аварии трубопроводов	---	--- / ---	2 - 5
Картографирование			
Местность	---	90 / 4.5	1.5
Населенные пункты	60	30 / 3	3
Дороги	6 - 9	6 / 1.8	0.6
Мосты	6	4.5 / 1.5	1
Обнаружение и дешифрирование объектов			
Корабли	7.6 - 15	4.5 / 0.6	0.3
Самолеты	4.5	1.5 / 1	0.15
Автомобили	1.5	0.6 / 0.3	0.05

В настоящее время в мире существует, и достаточно много, космических РСА, позволяющих получать РЛИ с разрешением порядка 1 метра. На рис. 3.6 представлена информация о ряде существующих и перспективных КА РЛН.

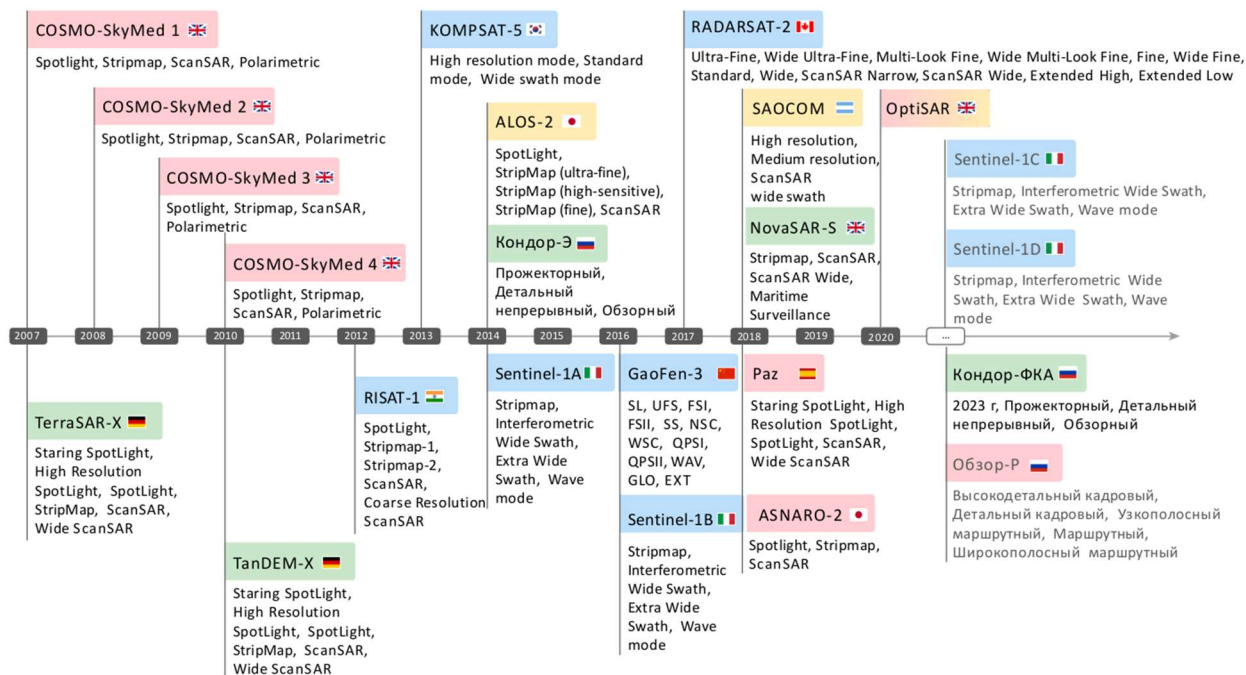


Рис.3.6. Пример существующих и перспективных КА ДЗЗ РЛН

Если сопоставить используемые длины волн с заявленными значениями разрешения РЛИ (рис 3.7), то обращает внимание, что, в основном, эксплуатируемые и разрабатываемые системы РЛН, обеспечивающие разрешение до 1 м и меньше осуществляют съемку в X- (длина волны 2,5 - 3,75 см) диапазоне длин волн. Дело в том, что для получения разрешения 1 – 2 м по наклонной дальности (поперек направлению движения КА) необходима ширина полосы зондирующего импульса в диапазоне 150 – 200 МГц. В соответствии с Регламентом Радиосвязи такие значения полосы разрешены только для S- или X-диапазонов длин волн. Чаще всего выбирают X-диапазон, т.к. в этом случае для получения высокого разрешения в азимутальном направлении требуется меньшее время накопления сигнала (время непрерывного сканирования одного объекта), что облегчает обработку и формирование РЛИ.

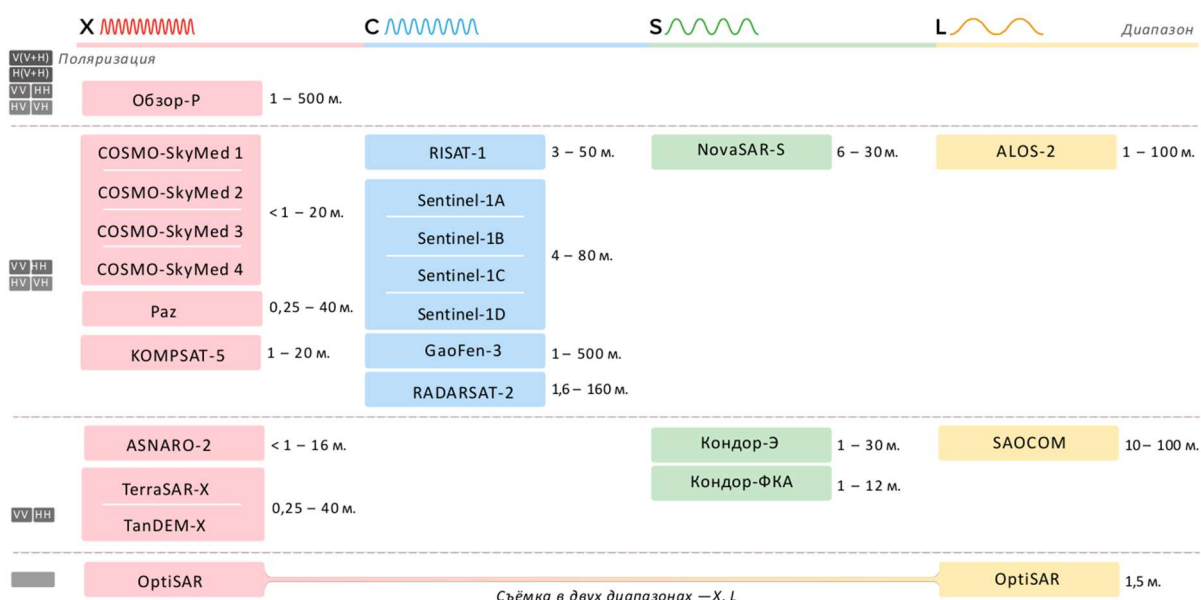
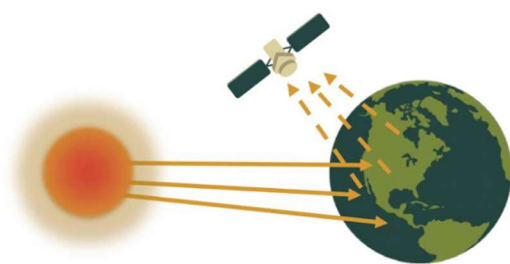


Рис 3.7. Примеры используемых диапазонов длин волн КА ДЗЗ РЛН

Вопрос 3.3.2. Принцип радиолокационной съемки

Системы радиолокационного обзора относятся к классу активных систем. Информация о земной поверхности формируется за счет генерации радиолокатором электромагнитного излучения с последующим приемом и специальной обработкой отраженных от наземных объектов электромагнитных импульсов. В отличие от активных систем при пассивном зондировании (например, оптико-электронное наблюдение) информация о земной поверхности может быть получена путем приема излучений, сформированными сторонними источниками, например, солнечное излучение, инфракрасное излучение при пожарах и др. (Рис 3.8).

Passive Sensors



Active Sensors

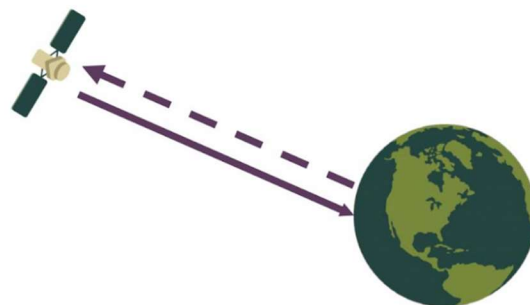


Рис. 3.8 Отличие пассивных (слева) и активных (справа) систем ДЗЗ

Излучаемая электромагнитная волна распространяется во все стороны с одинаковой световой скоростью. При этом мощность излучения разная в разных направлениях. В системах РЛН характер распределения мощности по направлениям определяется свойствами антенной системы. Зависимость мощности излучения от направления формирует так называемую диаграмму направленности антенны (ДНА).

На Рисунке 3,9 представлен пример горизонтального сечения диаграммы направленности, на которой в полярной системе координат для каждого направления (угла отклонения от оси диаграммы) отложено соответствующее значение мощности излучения.

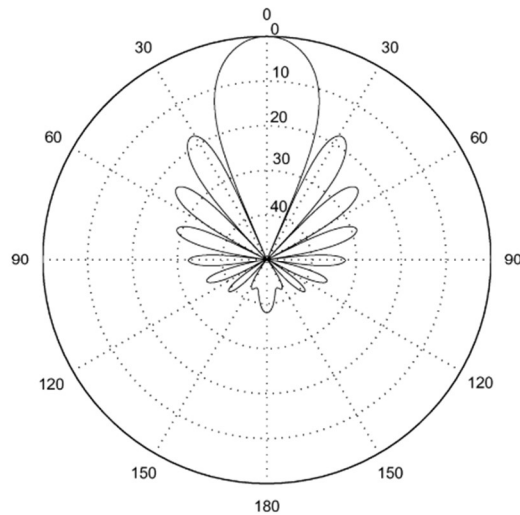


Рис. 3.9. Пример горизонтального сечения ДНА

Излученный сигнал отражается от земной поверхности, энергия сигнала частично поглощается, частично рассеивается, частично отражается в пространство, а часть энергии отражается в сторону радиолокатора. Отраженный сигнал детектируется приемником радиолокатора, демодулируется и записывается на бортовой носитель. Полученная совокупность сигналов образует радиолокационную голограмму, которая требует дальнейшей обработки (синтез) для получения РЛИ. На 3.10 представлены фрагменты РЛИ, элементы которого соответствуют различным типам поверхности.

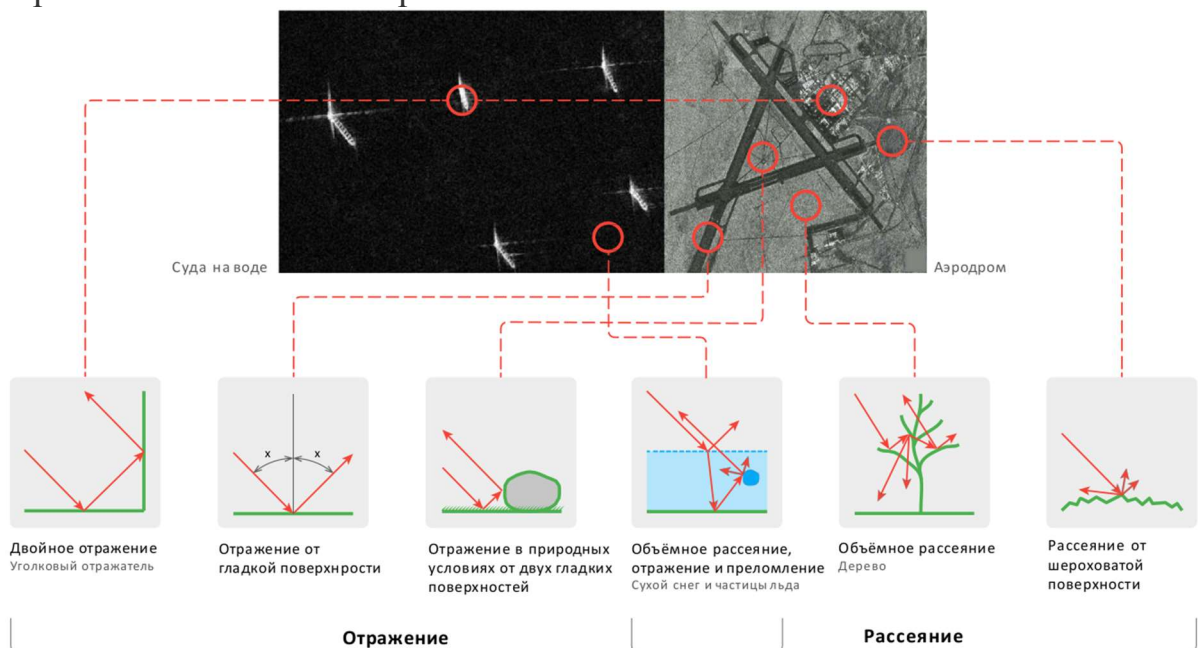


Рис. 3.10. Типы поверхности и соответствующие им элементы РЛИ

Временная диаграмма работы радиолокатора (интервалы излучения, приема, задержки) рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить прием излучения, соответствующего только области, задаваемой шириной диаграммы направленности. Ширина диаграммы направленности определяется по уровню, соответствующему половине мощности главного лепестка. Это ограничение обу-

словливает зону “пятна сканирования” в пределах которого за один такт (излучение / прием) будет получена информация о земной поверхности. При приеме на вход приемника поступают радиолокационные сигналы, отраженные от всех наземных целей, попадающих в зону главного лепестка диаграммы направленности антенны. При этом происходит сложение отраженных сигналов.

Вопрос 3.3.3. Геометрия радиолокационной съемки

Одной из особенностей радиолокационной съемки является принципиальное требование бокового обзора (съемка не производится в полосе надир на ширину диаграммы направленности в обе стороны). Это требование устанавливается для того, чтобы избежать так называемой неоднозначности по дальности - одновременного приема отраженного сигнала от объектов, расположенных на одинаковой дальности в плоскости, проходящей через ось диаграммы направленности и поперечной траектории движения КА. Иллюстрация бокового обзора приведена на рис 3.11.

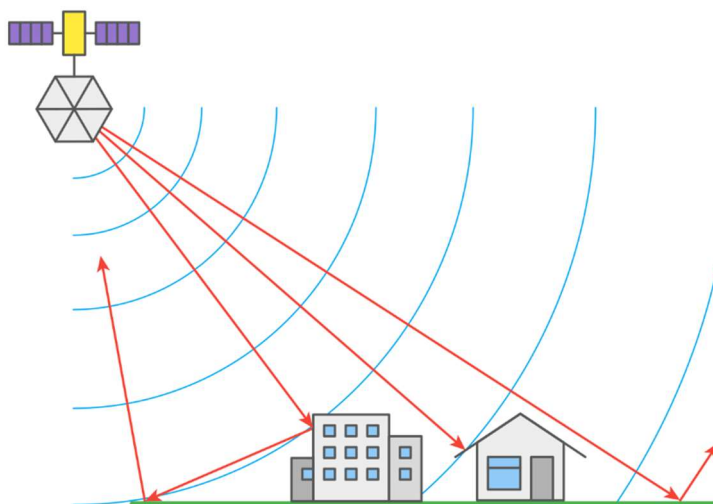


Рис. 3.11. Боковой обзор радиолокационной съемки

При приеме отраженного радиолокационного сигнала в течение заданного временного интервала осуществляется его дискретизация с определенной частотой. Каждому дискрету сигнала можно поставить в соответствие значение наклонной дальности до точки на земной поверхности, от которой произошло переотражение излученного сигнала. Синтезированное РЛИ представляет собой набор строк, каждый пиксель которых соответствует положению объекта на соответствующей дальности от КА. Расстояние по Земле от подспутниковой точки в момент съемки до цели называют наземной дальностью, расстояние от КА до этой же цели называют наклонной дальностью.

На рис 3.12 приведена иллюстрация геометрии обзора и соответствия наземных целей (A_g, B_g) с пикселями в строке изображения (A_{sl}, B_{sl}).

за этого от наземных объектов на РЛИ формируются так называемые радиолокационные тени. Ниже, на рис 3.14, приведен пример РЛИ с наличием радиолокационных теней.



Рис 3.14. Пример РЛИ с наличием радиолокационных теней

Что касается геометрических искажений, то они появляются, прежде всего, из-за влияния рельефа на значение наклонной дальности. Но даже на ровной поверхности разница между значениями наклонной дальности для соседних объектов будет изменяться при изменении угла обзора. Из-за перепада высот на склонах гор может наблюдаться эффект сжатия или растяжения изображений. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем больше угол падения. Примеры растяжения / сжатия для различных углов падения приведены на Рис. 3.15-3.17.

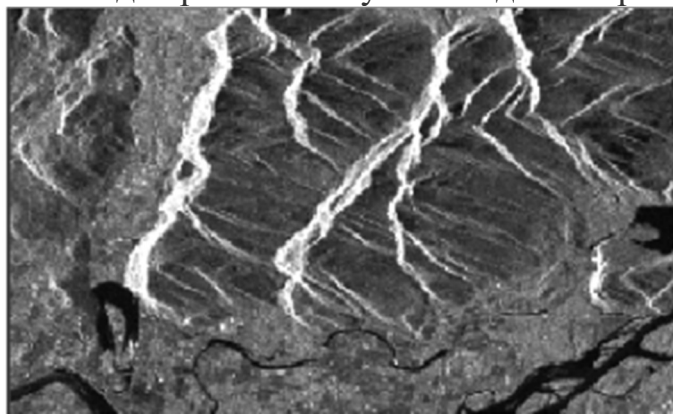


Рис 3.15. Эффект растяжения / сжатия, угол падения - 47 град

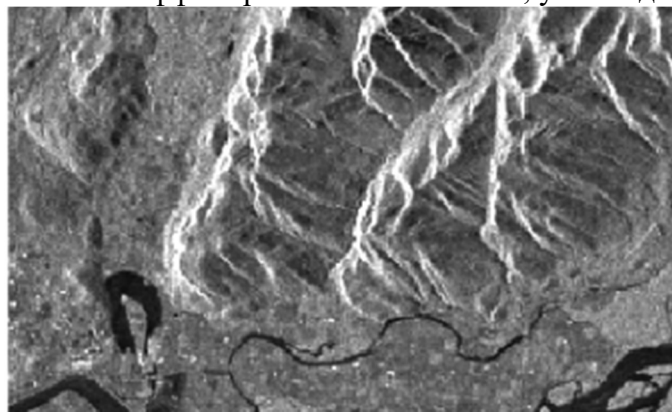


Рис 3.16. Эффект растяжения / сжатия, угол падения - 36 град

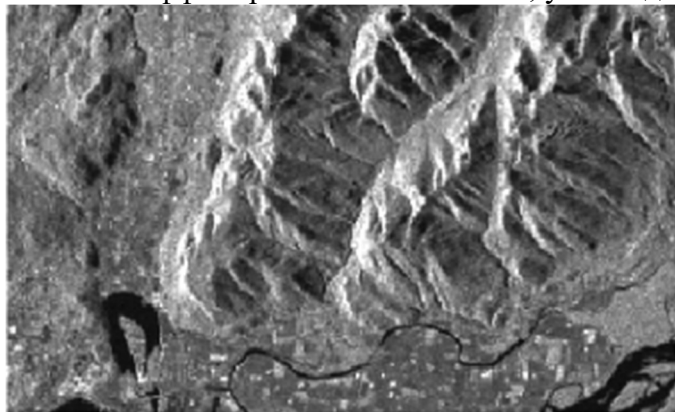


Рис 3.17. Эффект растяжения / сжатия, угол падения - 23 град

При резких перепадах высот передних склонов может наблюдаться эффект перекрытия объектов (рис 3.18), когда на изображении склоны перекрывают изображение подножия возвышенности.

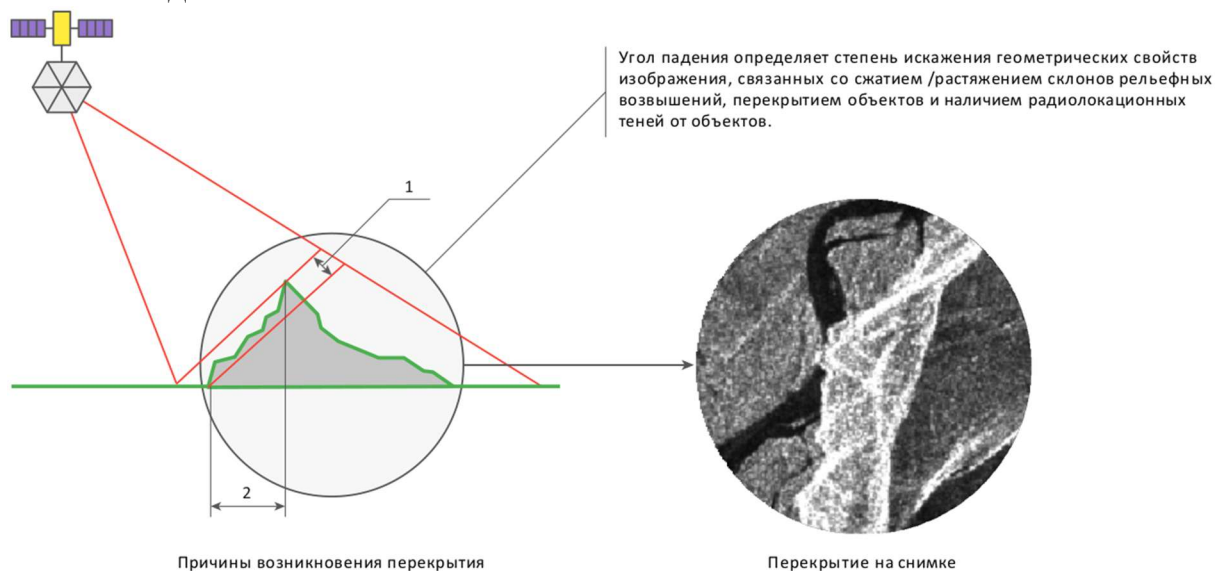


Рис. 3.18. Условия и проявление эффекта перекрытия объектов

Вопрос 3.3.4. Спектральные диапазоны длин волн

Радиолокационная съемка выполняется в радиодиапазоне электромагнитного спектра с длинами волн от 1 мм до 1 м. Наиболее часто используемые диапазоны принято классифицировать и обозначать следующим образом (таблица 3.6)

Таблица 3.6. Основные диапазоны радиолокационных съемочных систем

Диапазон	Длина волны, см	Частота, ГГц
Ku	1.67 - 2.5	18 - 12
X	2.5 - 3.75	12 - 8
C	3.75 - 7.5	8 - 4
S	7.5 - 15	4 - 2
L	15 - 30	2 - 1
P	30 - 100	1 - 0.3

Задача оптимального выбора рабочих диапазонов длин волн для РСА является ключевой при проектировании радиолокационной аппаратуры ДЗЗ. При выборе длины волны исходят из поставленных задач для съемочной системы, требуемого разрешения и свойств электромагнитных волн того или иного спектрального диапазона.

Длина волны определяет проникающую способность излучения, принципиальный уровень пространственного разрешения и уровень спекл-шума.

Спекл-шум образуется в результате когерентного суммирования отраженных электромагнитных волн от пространственно случайных источников рассеяния, попадающих в элемент разрешения РСА. Из-за этого на изображении однородного фона появляется пятнистость, вызванная флуктуациями суммарного процесса при переходе от одного элемента к другому. Спекл-шум ухудшает радиометрическое разрешение РЛИ. Для снижения спекл-шума применяют различные методы фильтрации РЛИ. Но это приводит к потере пространственного разрешения РЛИ, а также полезной информации, содержащейся в спекл-шуме, которая может быть использована для идентификации пространственно распределенных объектов. Пример проявления спекл-шума на РЛИ представлен на Рисунке 3.19.

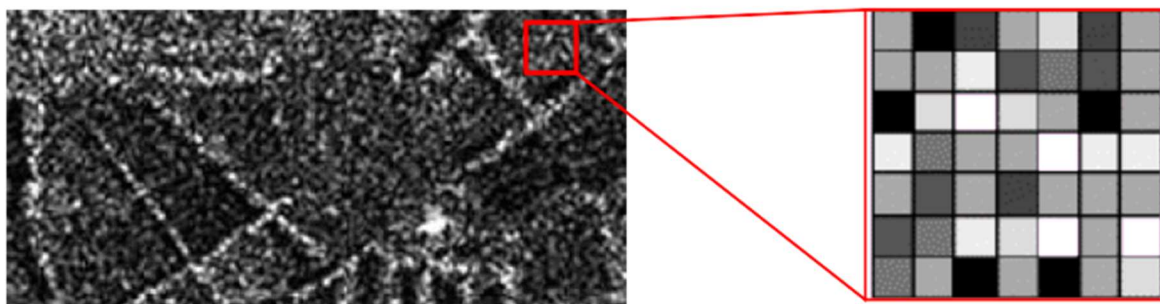


Рисунок 3.19. Пример проявления спекл-шума на РЛИ

Технические возможности использования того или иного диапазона длин волн определяются ограничениями, задаваемыми Регламентом Радиосвязи. Получение разрешающей способности РСА поперек линии пути (по наклонной дальности) в доли метра возможно в Ku-, X- либо в C-диапазонах волн. Разрешение 1 м и больше возможно также в S-диапазоне.

С одной стороны, при уменьшении длины волны уменьшается проникающая способность электромагнитного излучения (мешающим фактором могут становиться даже атмосферные изменения) и увеличение уровня спекл-шума, с другой, при увеличении длины волны при неизменных параметрах съемки ухудшается достижимое азимутальное разрешение синтезированного РЛИ (рис 3.20).

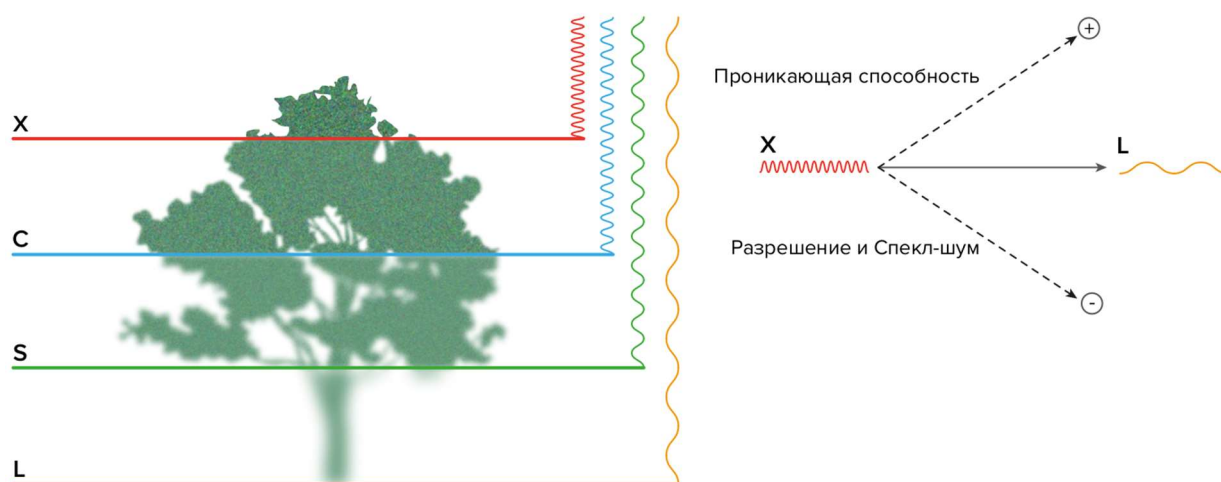


Рис. 3.20. Зависимость проникающей способности и разрешения от длины волны

При большей длине волны для сохранения разрешения в азимутальном направлении (вдоль линии пути) требуется увеличивать длину синтезированной апертуры (обеспечивается увеличением длительности съемки одних и тех же объектов), что приводит к изменениям в структуре получаемых сырых данных, обуславливающих усложнение их обработки, появление искажений РЛИ и ухудшение азимутального разрешения. В то же время, длинные волны обладают лучшей проникающей способностью, например, через растительный покров, что актуально при решении таких задач, как геологическая разведка и картографирование, обнаружение искусственных объектов под покровом леса, получение цифровых моделей рельефа. Также, использование более длинных волн дает уменьшение уровня спекл-шума на получаемых РЛИ.

Следует также учитывать и различие отражающих свойств объектов в разных частотных диапазонах. Визуальные свойства радиолокационных снимков растительного покрова, а также геологических особенностей земной поверхности выше (более выражены) в дециметровом L-диапазоне ($\lambda = 15 - 30$ см, достижимое разрешение - от 3 м) и в близком к нему S-диапазоне, чем в X- и C-диапазонах. Использование Ku-диапазона, несмотря на возможность получения РЛИ субметрового разрешения, имеет ограниченные возможности в силу малой проникающей способности и высокого уровня спекл-шума. Применение Ku-диапазона целесообразно, например, для получения изображений ледникового покрова.

Вопрос 3.3.5. Поляризация

Одним из неотъемлемых свойств электромагнитных волн, наряду с амплитудой и фазой, является поляризация. Фиксация и анализ поляризационных параметров сигналов позволяет повысить информативность радиолокационных данных и расширить возможности в части обнаружения и дешифрирования снимаемых объектов, анализа их свойств и классификации.

Поляризация определяется направленностью вектора электрической составляющей (E) волны в плоскости, перпендикулярной направлению распространения радиоволны. Иллюстрация горизонтальной и вертикальной поляризации волн показана на Рис. 3.21.

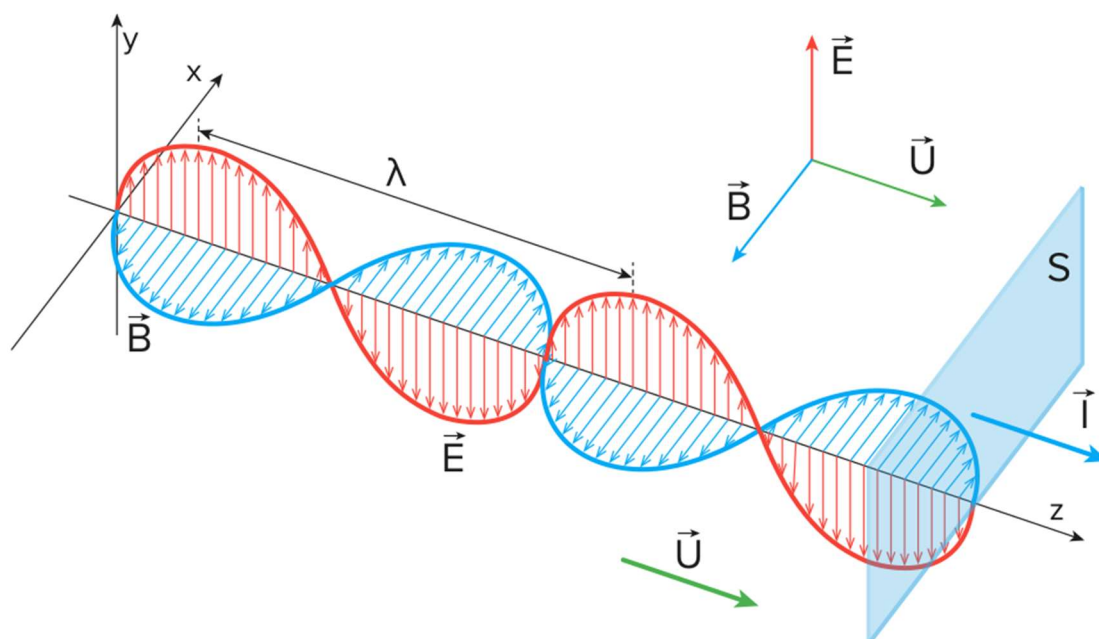


Рисунок 3.21. Схема горизонтальной и вертикальной поляризации волн

Поляризация может быть плоской (вектор E меняет направление в одной плоскости), круговой и эллиптической. При горизонтальной поляризации вектор E электрического поля параллелен наблюдаемой поверхности. При вертикальной поляризации вектор E лежит в плоскости, проходящей через ось диаграммы направленности и перпендикулярной поверхности, и направлен под углом падения волны к местной вертикали.

На практике при радиолокационном наблюдении при передаче используют зондирующие сигналы в основном с плоской поляризацией (горизонтальной или вертикальной, реже круговой). РСА могут быть однополяризационными либо поляризационными. В однополяризационных РСА излучение и прием сигналов ведутся с согласованными поляризациями: вертикальная (VV), горизонтальная (ГГ) или круговая. В поляриметрических РСА реализована возможность передачи и приема в различных поляризациях (вертикальная либо горизонтальная). Соответственно, возможны различные комбинации поляризаций на передачу / прием: VV, VH, HH, HV.

Известно, что объекты простой формы (сфера, уголкового отражатель) дают отраженный сигнал только при согласованных поляризациях излучения и приема (VV, HH). Вертикальные линейные объекты (столбы, трубы, деревья и т.п.), а также горизонтальные линейные объекты (линии электропередач, рельсы), расположенные по направлению от РЛС, дают отражение при VV-поляризации. Горизонтальные линейные объекты, если они параллельны вектору E , дают отражение при HH-поляризации.

Произвольно направленные сложные объемные и линейные объекты дают отражения в любых комбинациях поляризаций. Если нет искажающих внешних воздействий, таких как ионосфера, то комбинации VH и HV дают одинаковый результат.

В поляриметрических РСА распространено использование следующих режимов.

Режим двух поляризаций – в этом режиме на излучение используется одна поляризация (V или H) на прием - две (V + H).

Полнополяриметрический - режим четырех поляризаций, когда на соседних зондированиях на излучение поочередно переключают поляризацию (V, H), а на прием отраженных сигналов одновременно используются два канала V и H. Для реализации этой схемы приходится удваивать частоту зондирования, что может привести к одновременному приему отраженных сигналов от предыдущих зондирований - это накладывает определенные ограничения при съемке. Аналогичным образом реализуется режим двух поляризаций в комбинации VV, HH в соседних зондированиях.

В общем случае коэффициент рассеяния земной и водной поверхности при вертикальной поляризации выше, чем при горизонтальной и перекрестной.

Ниже, на рис.3.22, приведены примеры изображений в поляризациях HH и VV.

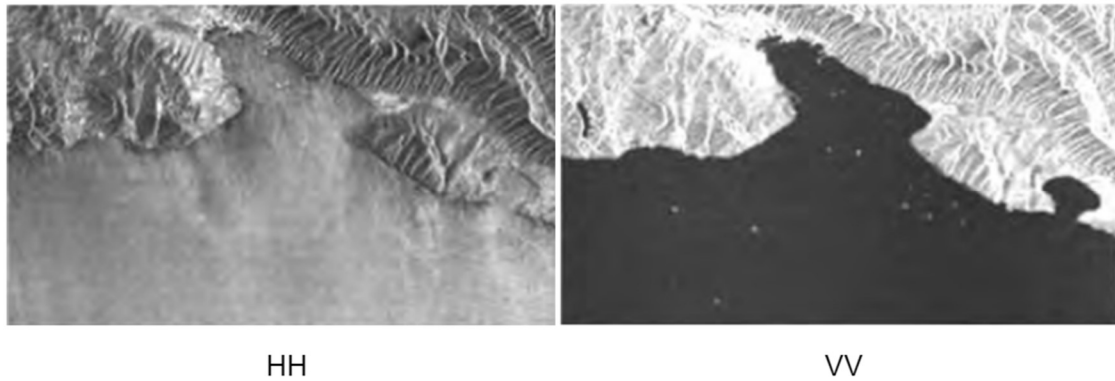


Рис. 3.22. Изобразительные отличия РЛИ в разных поляризациях

Использование режима нескольких поляризаций увеличивает информативность получаемых данных радиолокационной съемки и позволяет получать новые типы продуктов, например, RGB синтез изображений с изображениями разных поляризаций в разных каналах, как показано на рис.3.23.

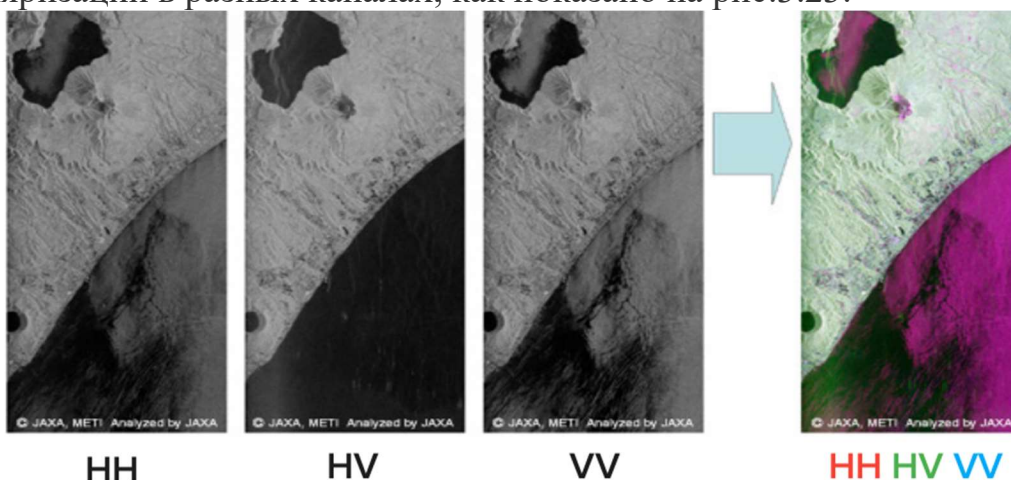


Рис.3.23. Использование РЛИ, полученных в нескольких поляризациях

Такие продукты увеличивают возможности последующего извлечения информации (обнаружение, распознавание, дешифрирование, классификация, оценка количественных и качественных характеристик объектов).

Комбинирование поляризаций позволяет улучшить распознавание различных объектов. Обработка РЛИ, сделанных одновременно в нескольких поляризационных каналах, называется поляриметрической. Уникальная особенность поляриметрических данных состоит в возможности классификации объектов на снимке по физическому типу отражения, так как каждый тип отражения по-своему отображается на снимках различной поляризации.

Вопрос 3.4. Радиометрическая корректировка данных дистанционного зондирования.

Радиометрическая коррекция - исправление на этапе предварительной подготовки снимков аппаратных радиометрических искажений, обусловленных характеристиками используемого съемочного прибора. Для сканерных съемочных приборов такие дефекты наблюдаются визуально как модуляция изображения (полосы) в направлениях параллельно или перпендикулярно оси изображения. При радиометрической коррекции также удаляются дефекты изображения, наблюдаемые как сбойные пиксели изображения, выпадающие строки, черезполосица (stripping).

Радиометрическая коррекция данных ДЗЗ выполняется, в основном, двумя методами:

- с использованием известных параметров и настроек съемочного прибора (корректировочных таблиц);

- статистически

В первом случае необходимые корректировочные параметры определяются для съемочного прибора на основе длительных наземных и полетных испытаний. Коррекция статистическим методом выполняется путем выявления дефекта и его характеристик непосредственно из самого изображения, подлежащего коррекции. Как следует из определения, качество коррекции в первом случае выше, чем при статистическом расчете, так как такой тип коррекции учитывает особенности системы которые такие данные производит.

Для данных ДЗЗ полученных с разных спутников могут применяться совершенно разные алгоритмы радиометрической коррекции. Рассмотрим проведение радиометрической коррекции для спутников ASTER и Landsat.

Данные ASTER прошедшие только обработку уровня L1A не проходят более сложную радиометрическую коррекцию по первому типу. Поэтому качество данных даже визуально может не устраивать, не говоря уже о классификации. И они нуждаются в дальнейшей обработке. Для радиометрической коррекции данных необходимо извлечь из файла с данными специальные таблицы, содержащие коэффициенты необходимые для пересчет яркостных характеристик пикселей.

Эти таблицы могут быть извлечены с помощью, например, программы NOeSYS (разработчик компания RSINC), которая позволит экспортировать таблицы в удобную текстовую форму, просмотреть эти таблицы также можно с помощью программы SciSpy (того же разработчика, программа представляет собой урезанный вариант первой программы).

Данные ASTER распространяются в формате HDF (расширение формата HDF-EOS), который имеет иерархическую структуру упаковки собственно растровых данных и сопутствующих метаданных, включая таблицы для радиометрической коррекции (рис 3.24).

		Dimension 1		
Index		1	2	3
Dimension 2	1	-2.6339	1.7965	2.472
	2	-1.1312	1.7489	2.472
	3	-2.6264	1.7844	2.472
	4	-1.1336	1.7361	2.472
	5	-2.6182	1.7896	2.472
	6	-1.0807	1.724	2.472
	7	-2.6409	1.7963	2.472

Name	Min	Current	Max	Units
Dimension 1	1	1	3	-
Dimension 2	1	1	4100	-

Рис 3.24. Таблицы коэффициентов для снимков Aster

Из таблицы видно, что 3 коэффициента радиометрической коррекции заданы для каждого пиксела строки изображения. Для следующей строки изображения будет использоваться тот же набор коэффициентов.

Для радиометрической коррекции изображения ASTER в видимом и ближнем ИК (VNIR каналы) используется следующая формула :

$$L = A_v V / G_v + D_v$$

D_v , A_v , G_v - это 3 коэффициента, взятые из таблицы

L =отражение

V =выходное значение (DN)

A_v =slope

G_v =gain

D_v =оффсет

Пример пересчета значения пиксела:

$$L = 1.7965 * 57 / 2.472 + (-2.6339) = 38.7902504854$$

57 - значение текущего пиксела (DN)

1.7965, 2.472, -2.6339 - соответствующие коэффициенты из таблицы

Как видно из результата, цифры, которые мы получаем уже не являются целочисленными, соответственно размер изображения существенно возрастает, кроме того, полученные значения это уже не масштабированные Digital Numbers

(DN), а реальные (или почти реальные, без учета атмосферной коррекции) значения имеющие единицы измерения $w/m^2/sr/\mu m$

Успешно выполнив данный пересчет для всех пикселей изображения, получаем существенно лучшую картину (рис 3.25)

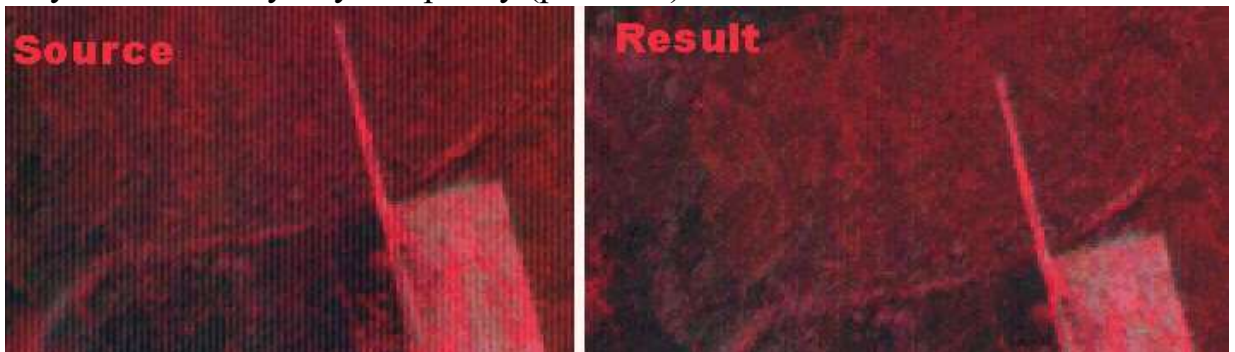


Рис. 3.25. Исходное и откорректированное изображение

Примечание: формула действительна только для видимых (VNIR) каналов ASTER. Для коррекции SWIR и TIR каналов будет применяться другая формула.

Значения, содержащиеся в файлах каналов многозонального изображения, представляют собой безразмерную величину. Она пропорциональна интенсивности излучения, достигающего орбиты, на которой находится спутник Landsat[1]. То, что мы получаем из файла – дискретное калиброванное значение пикселя Q , – номинировано в условных относительных единицах DN (Digital Numbers – числовые значения).

Требуется получить из Q значения отражающей способности (альбедо) ρ наземных объектов, видимых на космоснимке. Для материалов Landsat до 7 включительно, полученных из архива USGS, это производится следующим образом (1):

$$\rho = \frac{\pi R d^2}{E \sin \theta},$$

где R – интенсивность излучения от объекта, достигшего орбиты Landsat, d – расстояние между Землёй и Солнцем, E – коэффициент светимости для каждого канала, θ – высота стояния Солнца над горизонтом в момент съёмки.

Интенсивность излучения объекта, достигающего орбиты R , вычисляется по формуле (2):

$$R = M_R Q + A_R.$$

Калибровочные коэффициенты M_R и A_R можно найти в файле мета-данных с именем «*_mtl.txt», который поставляется вместе со сценой в одном архивном файле. Из списка параметров, приведённых на рис. 3.26, должны быть выбраны RADIANCE_MULT (M_R) и RADIANCE_ADD (A_R), соответствующие нужному каналу.

```

GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 0.671
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.322
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.044
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 0.876
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 0.120
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 0.055
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 0.066
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -2.19134
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -4.16220
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -2.21398
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -2.38602
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -0.49035
RADIANCE_ADD_BAND_6 = 1.18243
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -0.21555
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING

```



Рис. 3.26 Содержимое файла с метаданными сцены Landsat 7, необходимыми для получения интенсивности излучения на сенсоре

Значение интенсивности излучения на сенсоре R имеет размерность Вт/м²/ср/мкм, т.е. мощность излучения, падающая на единицу площади земной поверхности сквозь телесный угол в 1стерадиан, взятого относительно единицы длины волны излучения.

Расстояние между Землёй и Солнцем d может быть вычислено по приближённой формуле:

$$d = 1 - 0,01668 \cos\left(i \frac{2\pi}{365}\right)$$

где i – порядковый номер в году дня получения изображения. Его можно определить по дате регистрации сцены, которая также находится в файле метаданных (рис. 3.27):

```

WRS_PATH = 187
WRS_ROW = 013
DATE_ACQUIRED = 2004-07-30
SCENE_CENTER_TIME = 09:10:20.7587952Z

```



Рис. 3.27 Метаданные сцены: дата регистрации (DATE_ACQUIRED)

Если для вычислений использовать MS Excel, то в нём для получения значения i удобно использовать формулу =Ref-ДАТА(ГОД(Ref);1;1), где Ref – ссылка на ячейку, где записана дата регистрации.

Величина d измеряется в астрономических единицах (а.е.).

Значения светимости E для каждого канала могут быть взяты из следующей таблицы (табл. 3.7):

Таблица. 3.7. Коэффициенты светимости для каналов Landsat, Вт/м²/мкм

Каналы	1	2	3	4	5	7	8
Landsat 4	1957	1825	1557	1033	214.9	80.72	–
Landsat 5	1957	1826	1554	1036	215.0	80.67	–
Landsat 7	1970	1842	1547	1044	225.7	82.06	1369

И последний, необходимый для вычисления альбедо, параметр θ – высота стояния Солнца над горизонтом в момент съёмки – может быть взят из файла с метаданными сцены (рис. 3.28). Значение это в файле приведено в градусах. Перед подстановкой в формулу его надо перевести в радианы.

```
CLOUD_COVER = 3.00
IMAGE_QUALITY = 9
SUN_AZIMUTH = 165.18443824
SUN_ELEVATION = 40.84173381
```



Рис. 3.28. Метаданные сцены: высота Солнца (SUN_ELEVATION)

Для материалов Landsat 8, взятых из архива USGS, альбедо ρ вычисляется проще:

$$\rho = \frac{2 \cdot 10^{-5} Q - 0,1}{\sin \theta}, \quad (3)$$

Калибровочные коэффициенты M_R и A_R для сцены Landsat 8 также можно найти в файле метаданных (рис. 3.29).

RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2402E-02	RADIANCE_ADD_BAND_1 = -62.00935
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2700E-02	RADIANCE_ADD_BAND_2 = -63.49833
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1703E-02	RADIANCE_ADD_BAND_3 = -58.51317
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.8683E-03	RADIANCE_ADD_BAND_4 = -49.34160
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.0389E-03	RADIANCE_ADD_BAND_5 = -30.19460
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5018E-03	RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.50912
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.0620E-04	RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.53098
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1168E-02	RADIANCE_ADD_BAND_8 = -55.84111
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3601E-03	RADIANCE_ADD_BAND_9 = -11.80073
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04	RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04	RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000

Рис 3.29 Калибровочные коэффициенты Landsat 8

Вопрос 3.5. Формирование синтезированных изображений.

В зависимости от типа исследуемых по снимкам (картографируемых) объектов используются различные комбинации спектральных каналов, обеспечивающие максимальную различимость объектов по отношению к фону. В ряде случаев комбинации каналов применяются последовательно с целью поэтапного отделения объектов и их свойств. Стандартная комбинация в «естественных цветах» подразумевает размещение каналов R, G, B в соответствующих позициях (слотах) многоканального растра, рассматриваемого на экране компьютера (визуальное дешифрирование), либо обрабатываемого машинными методами классификации (автоматизированное дешифрирование). При визуальном дешифрировании на три слота растра могут помещаться любые спектральные каналы (особенно информативны ближний и средний ИК диапазоны), либо что-то еще – например, каналы разновременных снимков, результат расчета вегетационного индекса и т.п. При автоматизированном дешифрировании число каналов в многоканальном растре может быть больше трех. В данном разделе мы ограничимся кратким обзором наиболее распространенных комбинаций каналов, полученных одной съемочной системой.

Вначале целесообразно дать краткий обзор отдельных каналов с указанием объектов и их свойств, для которых обеспечивается наилучшая различимость. Далее в тексте будет использоваться нумерация каналов спутника LANDSAT-8 (сенсоры OLI, TIRS).

Канал 1 (B, Coastal/Aerosol) - голубой и фиолетовый. Сильно рассеивается пылью и частицами атмосферы, используется для обнаружения дыма и тумана. Обеспечивает оценку «здоровья» биосферы океана по степени яркости.

Каналы 2, 3,4 (Blue, Green, Red) - видимые цвета спектра.

Канал 5 (NIR) - невидимый ближний ИК канал. Обеспечивает оценку состояния растительности суши по степени яркости, что обусловлено сильным отражением здоровой растительности.

Каналы 6, 7 (Shortwave Infrared, SWIR-1/2) - инфракрасные каналы. Излучение сильно поглощается водой. Данные используются для различения видов растительности и почвы, облаков, снега и льда.

Канал 8 (PAN, Panchromatic) - панхроматический канал. За счет широкого диапазона (и большего количества энергии) обеспечивает максимальное пространственное разрешение 15 м/пиксел.

Канал 9 (Cirrus) обеспечивает различимость перистых и кучевых облаков.

Каналы 10, 11 (Thermal Infrared, TIR-1/2) - каналы дальнего ИК (теплового) диапазона, дающие информацию о температуре поверхности Земли.

Для исследований объектов на поверхности Земли наиболее востребованы каналы с номерами 1-7 с разрешением 30 м/пикс, общее число комбинаций которых составляет 343. Визуально эти комбинации можно оценить с помощью интерактивного инструмента, а особенности применения некоторых из них обсуждаются в источниках.

Синтез каналов 4-3-2 (Red, Green, Blue), «естественные цвета». Применяется для анализа состояния водных объектов и процессов седиментации, оценки глубины и изучения антропогенных объектов. Вырубки и разреженная растительность детектируются плохо, в отличие от комбинации 4-5-1 или 4-3-2. Облака и снег выглядят одинаково белыми и трудноразличимы. Кроме того, здесь трудно отделить один тип растительности от другого. Эта комбинация не позволяет отличить мелководье от почв. Объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Здоровая растительность выглядит зеленой, убранные поля - светлыми, нездоровая растительность - коричневой и желтой, дороги - серыми, береговые линии - белесыми.

Синтез каналов 5-4-3 (NIR, Red, Green), «искусственные», или «красные» цвета. Применяется для изучения состояния растительного покрова, мониторинга дренажа и почвенной мозаики, изучения сельскохозяйственных культур. Насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой и (или) широколиственной растительности, в то время как более светлые оттенки характеризуют травянистую растительность или редколесья/ кустарники. Растительность в этой комбинации имеет оттенки красного, городская застройка - зелено-голубые цвета, почва - от темно до светло коричневого или серого, лед, снег и облака

- белые или светло голубые. Хвойные леса по сравнению с лиственными имеют более темно-красную или даже коричневую окраску.

Синтез каналов 7-5-3 (SWIR, NIR, Green). Данная комбинация весьма полезна при анализе пустынь, может быть использована для изучения сельскохозяйственных земель и водно-болотных земель. Пройденные пожарами территории выглядят ярко красными. Городская застройка отображается в оттенках розово-фиолетового.

Здоровая растительность выглядит ярко зеленой, травянистые сообщества - зелеными, ярко розовые участки детектируют открытую почву, коричневые и оранжевые тона характерны для разреженной растительности. Сухостойная растительность выглядит оранжевой, вода - голубой. Песок, открытая почва и минералы могут быть представлены большим числом цветов и оттенков.

Синтез каналов 5-6-2 (NIR, SWIR, Blue). Добавление SWIR канала обеспечивает различимость возраста растительности. Здоровая растительность отображается в оттенках красного, коричневого, оранжевого и зеленого. Почвы могут выглядеть зелеными или коричневыми, урбанизированные территории - белесыми, серыми и зелено-голубыми, ярко голубой цвет может детектировать недавно вырубленные территории, а красноватые - восстановление растительности или разреженную растительность. Чистая, глубокая вода будет выглядеть темно синей (почти черной), для мелководья или высокого содержания взвесей в цвете преобладают более светлые синие оттенки.

Синтез каналов 5-6-4 (NIR, SWIR, Red), «красные цвета». Применяется для анализа влажности, изучения почв и растительного покрова. В целом, чем выше влажность почв, тем темнее она будет выглядеть, что обусловлено поглощением водой излучения ПК диапазона. Комбинация позволяет четко различить границу между водой и сушей и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона. С большой точностью будут детектироваться водные объекты внутри суши. Растительность отображается в различных оттенках и тонах коричневого, зеленого и оранжевого.

Синтез каналов 7-6-4 (SWIR-2, SWIR-1, Red). Применяется для мониторинга пожаров, так как тепловые аномалии выглядят красноватыми или желтыми. Также хорошо выделяются затопленные территории. Они имеют темно-синий и почти черный цвет. Поглощение излучения в среднем ПК диапазоне водой позволяет четко выделять береговую линию и водные объекты на снимке. Растительность отображается в оттенках темно и светло зеленого, урбанизированные территории выглядят белыми, зелено-голубыми и малиновыми, почвы, песок и минералы могут иметь много разных цветов.

Синтез каналов 6-5-4 (SWIR, NIR, R) удобен для изучения растительного покрова и широко используется для анализа состояния лесных сообществ. Комбинация дает очень много информации и цветовых контрастов. Здоровая растительность выглядит ярко зеленой, а почвы - розовато-лиловыми. В отличие от

синтеза 7-4-2, включающего канал SWIR2 и позволяющего изучать геологические процессы, эта комбинация дает возможность лучше различать и анализировать сельскохозяйственные угодья

Комбинированием каналов сцен, полученных с одного спутника в одно время синтезирование изображений не ограничивается. Широко применяется комбинирование каналов разновременных сцен с одного или разных спутников ДЗЗ в том числе оптического и радиодиапазонов. Одним из вариантов синтезированных изображений является паншарпенинг.

Вопрос 3.6. Паншарпенинг данных дистанционного зондирования.

Паншарпенинг - это процесс увеличения разрешения растрового изображения без увеличения размера изображения. Он используется для улучшения качества изображения путем увеличения детализации мелких объектов.

Также стоит отметить, что паншарпенинг может быть использован не только для улучшения качества изображений, но и для восстановления старых изображений или изображений с низким разрешением.

Паншарпенинг (или увеличение разрешения изображения) может быть выполнено с использованием различных методов. Вот некоторые из них:

1. Статистические методы: Эти методы основаны на анализе статистических свойств изображения. Они включают в себя анализ гистограмм яркости, корреляцию пикселей и т.д.

2. Методы на основе машинного обучения: Эти методы используют алгоритмы машинного обучения для обучения модели на наборах изображений с высоким и низким разрешением. Затем эта модель используется для увеличения разрешения других изображений.

3. Методы на основе сверточных нейронных сетей: Сверточные нейронные сети (CNN) стали очень популярными в области компьютерного зрения благодаря своей способности к обучению и обобщению. CNN могут быть использованы для паншарпенинга путем обучения модели на больших наборах данных изображений.

4. Другие методы: Существуют и другие методы паншарпенинга, такие как методы на основе интерполяции, методы на основе фракталов и т.д.

Паншарпенинг на основе фракталов - это метод увеличения разрешения изображения, который использует свойства фракталов для создания более детализированных изображений. Этот метод основан на том, что фракталы имеют свойство самоподобия, то есть они выглядят одинаково на разных масштабах.

При использовании этого метода изображение разбивается на блоки, каждый из которых затем масштабируется с использованием фрактальных алгоритмов. Это позволяет добавить детали к изображению без увеличения его физического размера.

Однако стоит отметить, что этот метод может привести к потере качества изображения, так как фрактальные алгоритмы не всегда могут точно воспроиз-

вести исходные данные. Поэтому паншарпенинг на основе фракталов обычно используется для изображений с низким разрешением, где потери качества не так заметны.

Паншарпенинг на основе статистических свойств — это метод увеличения разрешения изображения, основанный на анализе статистических характеристик изображения. Этот метод использует гистограмму яркости, корреляцию пикселей и другие характеристики для определения деталей, которые нужно добавить в изображение. Этот метод может быть эффективен для увеличения разрешения, но также может привести к артефактам и потере качества изображения. Для избежания этих проблем необходимо правильно настроить параметры метода и выбрать подходящий набор данных для обучения.

Паншарпенинг на основе машинного обучения — это метод увеличения разрешения изображения, основанный на использовании алгоритмов машинного обучения для обучения модели на наборах данных с высоким и низким разрешением. Затем эту модель используют для увеличения разрешения других изображений.

Паншарпенинг на основе сверточных нейронных сетей (CNN) - это метод увеличения разрешения изображения, использующий сверточные нейронные сети для обучения модели. Модель обучается на больших наборах данных изображений, а затем применяется к исходному изображению низкого разрешения для получения более детализированного изображения.

Паншарпенинг на основе интерполяции - это метод увеличения разрешения изображения, который использует математические алгоритмы для расчета значений пикселей между исходными пикселями. Этот метод обычно используется для небольших увеличений разрешения, так как он может привести к размытию изображения.

Паншарпенинг (pan-sharpening или panchromatic sharpening) – это метод увеличения пространственного разрешения растрового изображения. Этот способ обработки заключается в применении канала панхроматического диапазона к многоканальному набору растровых данных.

Метод основан на различии пространственных разрешений разных каналов раstra: из-за ограничения количества информации, которую может записать матрица съемочной системы, панхроматический канал имеет разрешение выше, чем изображения, снятые в «цветных» каналах. Его значения лежат в промежутке от белого до черного – то есть у него низкое спектральное разрешение, зато высокое пространственное. Для изображений, полученных со спутника Landsat-9, разрешение панхроматического и цветных каналов равно 15 и 30 м соответственно.

В результате комбинации этих каналов в композитное изображение, мы можем получить необходимое качество материала для работы. Пространственное разрешение результирующего снимка будет соответствовать пространственному разрешению снимка в панхроматическом диапазоне, а спектральное разрешение сохранится в соответствии с синтезированным многоканальным изображением.

Плюсы и минусы паншарпенинга.

На первый взгляд кажется, что этот метод способен раз и навсегда решить все наши проблемы с пространственным разрешением растров, однако, кроме преимуществ, у него есть несколько значительных недостатков.

За счет повышения детализации нам доступен более качественный и подробный анализ земной поверхности.

Возможность точнее определять отдельные объекты помогает при решении задач, например, планового картографирования местности, где нужно знать каждый объект в отдельности.

Благодаря повышению точности определения отдельных объектов их классификация становится гораздо более точной и информативной.

Главный минус метода заключается в том, что он применим только для снимков, имеющих канал в панхроматическом диапазоне и набор растров/синтезированное многоканальное изображение в отдельных файлах. К сожалению, в текущей ситуации выбор доступных снимков ограничен.

Применяемые математические алгоритмы нарушают цветность изображения из-за разных методов пересчета ячеек (рис 3.30).



Рис. 3.30. Пример использования алгоритма IHS для снимка со спутника IKONOS.

Выше уже было сказано о различиях в цветовом наборе пикселей результирующего изображения. По этой причине строго не рекомендуется использовать паншарпенинг для задач с применением многоканальных индексов (например, NDVI), так как результаты будут недостоверными.

Где поможет паншарпенинг?

1. Вот уже много лет высокие позиции уверенно занимает городское планирование. Повышение детальности в пределах городских территорий помогает идентифицировать гораздо большее число объектов инфраструктуры, тем самым помогая при ее анализе;

2. Паншарпенинг важен и для сельского хозяйства: с его помощью можно лучше отслеживать рост урожая, а также занимаемые площади посадок, что помогает скорректировать планы развития;

3. Метод широко применяется в охране территорий, а также военном картографировании. Иногда используется для определения целей поражения и планов наступления.

Кроме этих областей применения, паншарпенинг получил развитие в торговле, экологическом мониторинге и других задачах, где необходимо дешифрирование объектов.

Обобщение результатов.

Задача паншарпенинга – повышение пространственного разрешения с сохранением свойств (цветов) синтезированного многоканального изображения. Панхроматическое слияние – это один из главных инструментов в работе с данными ДЗЗ, которыми должен уметь пользоваться каждый человек, хоть сколь угодно причастный к картографии и геоинформатике. Однако, помимо значительного повышения качества анализа земной поверхности, математические алгоритмы, использующиеся при слиянии изображений, зачастую отрицательно влияют на территории с большим количеством дифференцированных цветов.

Области применения панхроматического слияния настолько обширны, что в этой статье описано лишь около половины. Именно поэтому предлагаю делиться знаниями: присылайте в чат или нам на почту ваши примеры использования этого метода! Мы будем рады обсудить проекты и идеи.

Советую заглянуть в список литературы, чтобы познакомиться с основными математическими алгоритмами, а также попробовать самостоятельно создать изображение с паншарпенингом.

Реализация в ГИС.

Методы панхроматического слияния наиболее часто реализованные в ГИС программах: преобразование Бровея, слияние с панхроматическим каналом Esri, спектральный метод слияния Gram-Schmidt, преобразование по модели IHS и трансформация по среднему арифметическому. Каждый из этих методов использует собственную модель увеличения пространственного разрешения при обработке цвета, и каждый из них позволяет использовать взвешивание для включения четвертого канала данных (например, канал ближней инфракрасной области, доступный в большом количестве источников многозональных изображений). При добавлении взвешивания и включении инфракрасного компонента, визуальное качество выходных цветов улучшается.

Преобразование Brovey, основанное на спектральном моделировании, было разработано для увеличения визуального контраста в верхней и нижней областях гистограммы. Данное преобразование использует метод, в котором значение яркости каждого перевыбранного пиксела многозонального изображения умножается на отношение значения яркости соответствующего пиксела панхроматического изображения к сумме яркостей всех зон многозонального изображения. При этом, предполагается, что спектральный диапазон панхроматического изображения соответствует каналам многозонального.

При преобразовании Brovey, основное уравнение использует красный, зеленый, синий (RGB) и панхроматический каналы для вычисления новых красного, зеленого и синего каналов, например.

$$\text{Red_out} = \text{Red_in} / [(\text{blue_in} + \text{green_in} + \text{red_in}) * \text{Pan}]$$

Однако, при использовании весов и ближнего инфракрасного канала (если он есть), усовершенствованная формула для каждого канала приобретает вид:

$$\begin{aligned} \text{DNF} &= (P - IW * I) / (RW * R + GW * G + BW * B) \\ \text{Red_out} &= R * \text{DNF} \\ \text{Green_out} &= G * \text{DNF} \\ \text{Blue_out} &= B * \text{DNF} \\ \text{Infrared_out} &= I * \text{DNF}, \end{aligned}$$

где:

P = panchromatic image R = red band G = green band B = blue band I = near infrared W = weight

Esri Слияние с панхроматическим каналом Esri использует взвешенное усреднение и дополнительный канал ближней инфракрасной области (дополнительно) для создания слитых с панхроматическим выходных каналов. Результат взвешенного усреднения используется для вычисления значения уравнивания (ADJ), которое необходимо для получения выходных значений, например.

$$\begin{aligned} \text{ADJ} &= \text{pan image} - \text{WA} \\ \text{Red_out} &= R + \text{ADJ} \\ \text{Green_out} &= G + \text{ADJ} \\ \text{Blue_out} &= B + \text{ADJ} \\ \text{Near_Infrared_out} &= I + \text{ADJ} \end{aligned}$$

Веса для мультиспектральных каналов зависят от наложения кривых спектральной чувствительности для мультиспектральных каналов с панхроматическим каналом. Веса являются относительными, и могут быть нормализованы при использовании. Мультиспектральный канал с самым большим перекрытием с панхроматическим каналом должен получить наибольший вес. Мультиспектральный канал, который совсем не перекрывается с панхроматическим каналом, должен получить вес 0. Изменением взвешенного значения ближней инфракрасной области, можно получить более или менее естественный оттенок зеленого.

Метод слияния Gram-Schmidt основан на общем алгоритме для векторной ортогонализации – ортогонализации Gram-Schmidt. Данный алгоритм использует векторы в качестве входных данных (например, 3 вектора в трехмерном пространстве), которые не являются перпендикулярными, а затем поворачивает их таким образом, что после этого они становятся перпендикулярными (ортогональными). В случае с изображениями, каждому каналу (панхроматическому, красному, зеленому, синему и инфракрасному) соответствует вектор с несколькими измерениями (число измерений равняется числу пикселей).

Первым шагом в методе слияния Gram-Schmidt является создание панхроматического канала с низким разрешением, путем вычисления взвешенного среднего мультиспектральных каналов. Далее, эти каналы декоррелируются с

использованием алгоритма ортогонализации Gram-Schmidt, при этом каждый канал считается одним многомерным вектором. Этот смоделированный панхроматический канал с низким разрешением используется в качестве первого вектора; он не поворачивается и не изменяется с помощью преобразований. Панхроматический канал с низким разрешением затем заменяется панхроматическим каналом с высоким разрешением, и все каналы преобразуются обратно в высоком разрешении.

Для часто используемых предлагаются следующие веса (красный, зеленый, синий и инфракрасный, соответственно):

GeoEye – 0.6, 0.85, 0.75, 0.3

IKONOS – 0.85, 0.65, 0.35, 0.9

QuickBird – 0.85, 0.7, 0.35, 1.0

WorldView-2 – 0.95, 0.7, 0.5, 1.0

Подробное описание этой методики приводится в следующем патенте:

Laben, Craig A., and Bernard V. Brower. Process for Enhancing the Spatial Resolution of Multispectral Imagery using Pan-Sharpening. Патент США 6,011,875, подан 29 апреля, 1998 и издан 4 января, 2000.

Метод панхроматического слияния IHS конвертирует мультиспектральное изображение из RGB в значения яркости, оттенка и насыщенности. Канал с интенсивностью низкого разрешения заменяется панхроматическим каналом высокого разрешения. Если мультиспектральное изображение содержит инфракрасный канал, он вычитается с использованием весового коэффициента. Новое значение интенсивности вычисляется по формуле:

$$\text{Intensity} = P - I * IW$$

Затем изображение обратно трансформируется из IHS в RGB с более высоким разрешением.

Простое среднее. При трансформации по среднему арифметическому к каждой комбинации выходных каналов применяется усреднение по среднему арифметическому, например.

$$\begin{aligned} \text{Red_out} &= 0.5 * (\text{Red_in} + \text{Pan_in}) & \text{Green_out} &= 0.5 * (\text{Green_in} + \text{Pan_in}) \\ \text{Blue_out} &= 0.5 * (\text{Blue_in} + \text{Pan_in}). \end{aligned}$$

Вопрос 3.7. Перепроецирование, конвертация, переструктуризация и агрегирование данных дистанционного зондирования

Изображения, полученные различными системами космического дистанционного мониторинга, неизбежно содержат геометрические искажения, обусловленные различными причинами. Основной причиной геометрических искажений спутниковых снимков является кривизна поверхности Земли. Специфические искажения, связанные с тем, что наблюдение ведется под углом к надиру, возникают при использовании сканеров с линейной разверткой и радиолокационных станций бокового обзора. Неизбежным источником искажения является

также тот факт, что датчик, установленный на космическом носителе, формирует изображение, стороны которого ориентированы вдоль и поперек линии пути носителя, как правило, не совпадающей с направлениями север—юг или запад—восток. Поэтому возникает необходимость в повороте полученного кадра.

Кроме того, искажения возникают из-за пересеченного рельефа местности, нестабильности траектории летательного аппарата и т. д.

Оптико-электронный сенсор также вносит искажения. Вследствие того, что камера имеет линзу ограниченного размера и непостоянной толщины, на ее краях возникают бóльшие искажения, чем в центре. Наблюдается явление дисторсии оптических систем. Дисторсия — аберрация оптических систем, при которой линейное увеличение изменяется по полю зрения. При этом нарушается подобие между объектом и его изображением. В этом случае прямые линии изображаются кривыми, кроме тех, которые лежат в одной плоскости с оптической осью. Например, изображение квадрата, центр которого пересекает оптическая ось, может выглядеть по-разному. Оно имеет вид подушки (подушкообразная дисторсия) при положительной дисторсии и вид бочки (бочкообразная дисторсия) — при отрицательной.

Существуют и другие виды искажения, в том числе более сложные искажения формы.

Объекты на карте связаны с реальными объектами на местности с помощью пространственных координат. Местоположение объектов на поверхности Земли определяется при помощи географических координат: широты и долготы.

Самыми распространенными географическими системами координат для территории России являются: — универсальная общеземная система WGS-84 (World Geodetic System 1984), базирующаяся на эллипсоиде WGS-84 с центром в центре масс Земли. Система широко применяется за рубежом, ее используют практически для всех данных, производимых в мире; — референцная Система координат 1942 года (СК-42, «Пулково-1942»), базирующаяся на эллипсоиде Красовского. Начало координат смещено относительно центра масс на расстояние около 100 м, отчего эта система и носит название референцной, или относительной. Используется в России, странах бывшего СССР, бывшего СЭВ и в некоторых других.

Географические координаты хорошо подходят для определения местоположения объекта, но они не годятся для определения его пространственных характеристик, таких как длина, площадь и т. д. Для преодоления этих трудностей данные переводят из сферических географических координат в прямоугольные спроецированные координаты.

Картографическая проекция — математически определенный способ отображения поверхности эллипсоида на плоскости. Суть проекций заключается в том, чтобы фигуру Земли — эллипсоид, не развертываемый в плоскость, заменить другой фигурой, развертываемой на плоскость, или непосредственно плоскостью (коническая, цилиндрическая или азимутальная проекции). По характеру искажений, вносимых в содержание карты после ее проецирования, проекции де-

лятся: — на равноплощадные (равновеликие) — отсутствуют искажения площадей; — равноугольные — отсутствуют искажения углов и, следовательно, формы объектов; — равнопромежуточные — отсутствуют искажения длин, расстояния остаются неизменными в определенных направлениях. Существуют также проекции, в которых искажения минимизированы сразу по двум или трем показателям (углы, длины, площади). Проекций, в которых сохранялся бы масштаб длин во всех направлениях, не существует.

Достаточно широко распространены в России и мире группы проекций UTM (Universal Transverse Mercator) и Гаусса — Крюгера. Обе эти группы базируются на поперечной цилиндрической проекции Меркатора (Transverse Mercator), однако имеют различную номенклатуру и параметры. Таким образом, для установления соответствия между элементами изображения и геодезической координатной сеткой требуется провести процедуру геометрической коррекции изображения.

Геометрическая коррекция позволяет решить сразу несколько задач. Во-первых, в результате коррекции устраняются или, по крайней мере, уменьшаются геометрические искажения. Во-вторых, при геокоррекции выполняется процесс проецирования снимка на плоскость в соответствии с заданной картографической проекцией (либо процесс перепроецирования снимка из исходной проекции в требуемую), т. е. происходит привязка изображения. В-третьих, так как все картографические проекции связаны с картографическими координатами (широта и долгота), то процедура трансформирования включает в себя и географическую привязку.

Методы геометрической коррекции искажений делятся на строгие, аппроксимационные (для них необходимы параметры датчика, поверхности и/или опорные точки) и параметрические (только опорные точки).

Наиболее точным подходом к геометрической обработке снимков является моделирование процесса съемки (так называемая строгая модель), в результате которого восстанавливается пространственное положение луча (для съемки в центральной проекции) или совокупности лучей (для сканерной съемки), сформировавших снимок. Этот метод подразумевает определение траектории носителя (сенсора), его внешнюю ориентацию, а также использование геометрической модели сенсора (элементов внутреннего ориентирования). Применение строгой модели удобно для работы с аэрофотоснимками.

Для космических снимков, как правило, строгая геометрическая модель сенсора не является общедоступной, и в качестве альтернативы ей используется аппроксимационная модель рациональных функций («RPC-метод», «метод RPC-коэффициентов»), которая заключается в использовании для связи элементов кадра и элементарных участков земной поверхности дробно-рациональных функций где в числителях и знаменателях стоят полиномы третьей степени:

Соотношения связывают нормированные геодезические координаты (широту, долготу и высоту соответственно) точки местности N с «пиксельными» координатами n , — ее отображения на снимке. Нормировка осуществляется таким

образом, чтобы численные значения, находились в интервале $0 \dots 1$. Коэффициенты (всего 80 коэффициентов — по 20 на каждый полином) вычисляют поставщики данных, имеющие возможность использовать строгую модель камеры. Коэффициенты вычисляются для каждой поставляемой сцены (если договор на поставку данных предполагает передачу заказчику коэффициентов RPC-модели), а их использование при трансформировании снимков земной поверхности предусмотрено практически всеми современными пакетами обработки данных ДЗЗ.

При отсутствии информации о съемочной системе и параметрах ее движения используются универсальные (параметрические) методы, основанные на самых общих предположениях о геометрии съемки. Универсальные методы используют соотношения, описывающие связь между координатами опорных точек 32 объектов, опознанных на снимке, и геодезическими координатами этих же объектов (либо геометрически правильным изображением в необходимой проекции). Трансформирование изображения и его пространственная привязка с использованием параметрических методов (на основе линейных, нелинейных преобразований или преобразования «резиновый лист») являются наиболее доступными для потребителя, хотя их показатели точности выходных продуктов в большинстве случаев заметно ниже, чем при применении строгого или аппроксимационного подхода. Процесс трансформирования в этом случае состоит из следующих этапов: • определение местонахождения опорных точек; • вычисление коэффициентов и проверка преобразования; • создание выходного изображения, содержащего новые координаты (при этом пиксели должны быть пересчитаны в соответствии с новой сеткой координат).

Чтобы преобразование было выполнено с минимальной ошибкой, опорные точки следует выбирать определенным образом. Они должны попадать на хорошо различимые как на исходном изображении, так и на карте статические объекты (такие, как пересечение дорог, взлетно-посадочные полосы, основания башен, зданий и т. д.). Кроме того, опорные точки нужно располагать как можно более равномерно по всему снимку. Помимо общих требований, предъявляемых к опорным точкам, необходимо учитывать следующие специфические моменты. Космические снимки могут иметь большой угол наклона, причем заранее не известно его направление, поэтому точки должны располагаться на открытых местах. Между моментом съемки и определением координат опорных точек может пройти значительное время, нужно чтобы точки сохранились и хорошо распознавались в различное время года.

Данные преобразования используются для преобразования координат исходного изображения в исправленную картографическую систему координат. В зависимости от искажения, количества наземных опорных точек и их расположения относительно друг друга для точного преобразования могут потребоваться достаточно сложные полиномиальные формулы. Сложность полинома выражается через его порядок. Простейшим видом параметрического преобразования является линейное преобразование, или полиномиальное преобразование первой степени.

Для осуществления полиномиального преобразования первой степени необходимо найти 6 коэффициентов - по три на каждую координату (X и Y): a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 , b_2 . Эти коэффициенты, далее используются в собственно уравнениях полиномиального преобразования первой степени (эквивалентного также аффинному преобразованию):

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= a_0 + a_1 X + a_2 Y \\ Y_0 &= b_0 + b_1 X + b_2 Y \end{aligned} \right\},$$

где X, Y – координаты в исходной системе координат (известны);

X_0 , Y_0 – координаты в конечной системе координат (известны).

Для решения данной системы уравнений необходимо иметь координаты 3-х точек

Преобразования 2-го и более порядка относят к нелинейным. Эти преобразования могут корректировать нелинейные искажения. Преобразования 2-го порядка могут быть использованы для преобразования данных в географической системе координат (широта, долгота) в прямоугольную, для преобразования данных больших областей (для учета кривизны Земли), для точной привязки искаженных по той или иной причине данных (например, из-за искажений линз камеры, плохо отсканированных материалов) и т.д.

Решение задачи трансформации сводится к нахождению коэффициентов системы уравнений. В случае полиномиального преобразования 2-й степени, система уравнений выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 X^2 + a_4 XY + a_5 Y^2 \\ Y_0 &= b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 X^2 + b_4 XY + b_5 Y^2 \end{aligned} \right\},$$

где: X, Y – координаты в исходной системе координат (известны);

x' , y' – координаты в конечной системе координат (известны);

a_0 -5, b_0 -5 – коэффициенты (неизвестны).

Таким образом, имея 12 неизвестных, нам понадобится 6 пар точек с известными координатами до и после трансформации.

Уравнение полиномов 3-го порядка достаточно сложное. И для его решения уже требуются координаты уже 10 точек. Полиномы 3-го порядка используются для компенсации сложных искажений, которые могут возникать из-за влияния рельефа.

Преобразования 3-го порядка используются для привязки искаженных аэрофотоснимков и радарных изображений. Преобразования 4-го порядка могут быть использованы для очень искаженных снимков.

При трансформировании изображения методом конечных элементов, или методом резинового листа, оно разбивается на множество треугольников (каждый из них является конечным элементом), в вершинах которых находятся известные опорные точки. Обычно используется триангуляция Делоне [17]. Затем для каждого треугольника выполняется коррекция с использованием полиномиального преобразования. Так как размер треугольника невелик, то порядок преобразования небольшой. Чаще всего используется линейное преобразование, которое является самым простым и быстрым. Для данного преобразования не требуется дополнительной информации, потому что в каждом треугольнике есть три опорных точки. Однако этот алгоритм имеет один недостаток. Переходы между треугольниками получаются не всегда плавными. Для устранения этого недостатка при обработке в приграничных областях прибегают к полиномам более высоких порядков. Метод конечных элементов на основе треугольника используется, когда другие методы трансформирования не позволяют добиться приемлемых результатов.