

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Допущено Министерством обороны Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся
по специальности 210601.65 «Радиоэлектронные системы
и комплексы» (рег. № 492 от 11.12.2013)

Под редакцией доктора технических наук
В. М. Владимирова

Красноярск
СФУ
2014

УДК 528.8
ББК 26.0
Д487

Авторы:

В. М. Владимиров, Д. Д. Дмитриев, О. А. Дубровская,
А. М. Кармишин, В. Н. Тяпкин, Ю. Л. Фатеев, А. Н. Фомин,
Л. И. Шарова, А. Н. Борисевич, В. В. Иванов

Д487 **Дистанционное зондирование Земли** : учеб. пособие /
В. М. Владимиров, Д. Д. Дмитриев, О. А. Дубровская [и др.] ; ред.
В. М. Владимиров. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – 196 с.
ISBN 978-5-7638-3084-2

Приведены основные сведения о системах дистанционного зондирования Земли и применении их в хозяйственной и научной областях. Изложены принципы работы целевой аппаратуры действующих и перспективных российских и зарубежных космических аппаратов. Рассмотрены перспективы развития российских систем дистанционного зондирования Земли.

Предназначено для студентов специальности 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы», а также может быть использовано студентами (курсантами) военных кафедр (учебных военных центров), обучающимися по военно-учетной специальности «Эксплуатация и ремонт радиолокационных комплексов и систем РТВ ВВС».

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 528.8
ББК 26.0

ISBN 978-5-7638-3084-2

© Сибирский федеральный
университет, 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Практика получения изображений поверхности Земли из космоса насчитывает более полувека. Первый снимок земной поверхности был получен при помощи фотоаппарата, установленного на баллистической ракете Fau-2 немецкого производства, запущенной в 1945 г. с американского военного полигона White Sands. Ракета достигла высоты 120 км, после чего фотоаппарат с отснятой пленкой был возвращен на Землю в специальной капсуле. Началом систематического обзора поверхности Земли из космоса можно считать запуск 1 апреля 1960 г. американского метеорологического спутника Tiros-1. Первый отечественный спутник аналогичного назначения «Космос-122» был выведен на орбиту 25 июня 1966 г.

С тех пор область применения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса значительно расширилась. В сельском хозяйстве космические снимки используют для инвентаризации сельскохозяйственных угодий, выделения и идентификации различных типов сельскохозяйственных культур, прогнозирования урожаев. В климатологии важно контролировать концентрацию газов, вызывающих парниковый эффект, содержание озона, загрязнение атмосферы, температуру поверхности океана, облачный покров. Космическая информация широко используется в геологических исследованиях для изучения структурных особенностей новейших тектонических движений, при поисках нефтегазоносных структур и рудных месторождений. Для решения вопросов землепользования важно отслеживать растительный покров, пастбища, снежный и ледовый покровы, городские территории, водные массивы.

Очень важным является наблюдение прибрежных зон и океанов, контроль динамики развития фитопланктона, изучение океанских ресурсов (поиск рыбы, а также полезных ископаемых: нефти, газа), выявление источников загрязнения океана.

В лесном хозяйстве с помощью космических снимков ведется картографирование лесов, определяются типы лесонасаждений и доминирующие породы. Космические снимки используют для обнаружения участков, поврежденных шелкопрядом и другими вредителями леса.

Космические снимки имеют важное значение для мониторинга чрезвычайных ситуаций: паводков и наводнений, лесных пожаров и землетрясений.

Для получения всей этой информации используется широкий спектр космических аппаратов (КА) ДЗЗ, оснащенных многими видами целевой аппаратуры (ЦА).

Цель дисциплины «Дистанционное зондирование Земли» – дать основные понятия о предмете, изучить основные типы систем ДЗЗ, виды прикладных задач, решаемых с применением данных ДЗЗ, основные направления развития систем ДЗЗ. В результате изучения дисциплины обучающиеся должны знать основные характеристики данных ДЗЗ, принципы построения системы ДЗЗ, методы и приборы ДЗЗ, прикладные задачи, решаемые с помощью данных ДЗЗ.

В связи с бурным развитием систем ДЗЗ существующая литература быстро устаревает. В настоящем учебном пособии авторы систематизировали как действующие КА ДЗЗ, так и перспективные. Кроме того, изложены способы применения данных ДЗЗ в интересах науки и народного хозяйства.

В первой главе учебного пособия изложены общие сведения о методах наблюдения Земли из космоса; дана общая характеристика систем ДЗЗ. Приведены характеристики космической информации.

Особое внимание уделено рассмотрению принципов выбора орбит КА. Приведены характеристики орбит, орбитальные элементы и эволюции. Освещены способы приема информации с КА ДЗЗ. Приведены назначение, состав и основные характеристики наземных комплексов приема и обработки данных.

Во второй главе изложены различные методы и приборы ДЗЗ. Основное внимание уделено описанию оптико-электронных приборов, при этом подробно рассмотрены основные схемы построения объективов и принципы работы матриц приборов с зарядовой связью.

Кроме того, детально освещены вопросы радиолокационного наблюдения в ДЗЗ и методы увеличения разрешающей способности при этом. Рассмотрены принципы создания радиолокаторов бокового обзора с синтезированной апертурой. Также приведены сведения о многозональной и гиперспектральной съемке.

Третья глава посвящена рассмотрению КА ДЗЗ как российского, так и зарубежного производства. Подробно изложены характеристики ЦА и средств связи каждого из КА.

В четвертой главе приведены примеры использования космической информации, получаемой при помощи систем ДЗЗ, в хозяйственной и научной сфере. Рассмотрены дистанционные методы изучения сейсмичности, приведены примеры оценок сейсмической обстановки.

Применение систем ДЗЗ в природопользовании показано на примерах мониторинга загрязнения водных поверхностей разливом нефти и нефтепродуктов, окружающей среды отходами промышленного производства и обнаружения лесных пожаров и оценки выброса в атмосферу дымовых газов и аэрозоля. Кроме того, приведены примеры оценки гидрологической обстановки и динамики снегового покрытия в паводкоопасный период, а также контроля за развитием и оценкой последствий чрезвычайных ситуаций на примере аварии на японской атомной электростанции (АЭС) «Фукусима-1».

Пятая глава посвящена рассмотрению основных направлений развития российских систем ДЗЗ: подробно изложены требования к составу орбитальной группировки; приведены необходимые данные по строящимся космическим системам и комплексам, требования, предъявляемые к ним.

В каждой главе даны вопросы для самоконтроля с целью повторения и закрепления учебного материала обучающимися.

В конце учебного пособия приведены перечень сокращений и библиографический список.

Изложение учебного материала соответствует учебной программе дисциплины «Дистанционное зондирование Земли», при этом предполагается, что обучаемые имеют необходимый объем знаний по основным разделам математики, физики, информатики, радиоэлектронных систем.

В основу учебного пособия положен учебный материал, апробированный на протяжении ряда лет авторами при проведении занятий по дисциплине «Дистанционное зондирование Земли» со студентами, обучающимися по военно-учетной специальности «Эксплуатация и ремонт радиолокационных комплексов и систем РТВ ВВС» Военно-инженерного института Сибирского федерального университета.

Актуальность данного учебного пособия обусловлена требованиями к высокому качеству подготовки офицеров, необходимостью проводить обучение на высоком теоретическом и методологическом уровне, а также недостаточностью учебной литературы по данной теме.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы», а также может быть использовано студентами (курсантами) военных кафедр (учебных военных центров) по военно-учетной специальности «Эксплуатация и ремонт радиолокационных комплексов и систем РТВ ВВС».

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

1.1. Общая характеристика систем дистанционного зондирования Земли

Дистанционное зондирование Земли – получение информации о поверхности Земли и объектах на ней, атмосфере, океане, верхнем слое земной коры бесконтактными методами, при которых регистрирующий прибор удален от объекта исследований на значительное расстояние. Общей физической основой дистанционного зондирования является функциональная зависимость между зарегистрированными параметрами собственного или отраженного излучения объекта и его биогеофизическими характеристиками и пространственным положением.

Учитывая чрезвычайно большое разнообразие сфер хозяйственного и научного использования космической информации (КИ) ДЗЗ, полный состав задач ДЗЗ содержит весьма разнородные требования к видам и характеристикам космических данных и велик по номенклатуре. Однако существует важная особенность, объединяющая весь спектр задач ДЗЗ в одно целое и позволяющая решать большинство подобных задач на КА, оснащенных бортовой аппаратурой для съемки и зондирования в разных диапазонах спектра. Известно, что в основе всех методов ДЗЗ лежит требование регистрации и измерения потоков собственного (т. е. теплового) или отраженного электромагнитного излучения от интересующих природных и хозяйственных объектов, расположенных на земной поверхности, несколько заглубленных под ней или существующих в атмосфере нашей планеты.

По результатам таких наблюдений и измерений, передаваемым в виде поступающей КИ ДЗЗ на наземные пункты ее приема, обнаруживаются, отождествляются и конкретизируются (классифицируются) типы и фиксируется состояние природохозяйственных объектов и процессов, важных для проведения эффективной природоохранной деятельности, прогнозирования погоды и опасных гидрометеорологических явлений, оценки масштабов чрезвычайных ситуаций (ЧС) с целью принятия адекватных мер по уменьшению их последствий и минимизации ущерба, налаживания эффективных производственных процессов в отраслях природопользования, научного изучения эволюции Земли и т. д.

ДЗЗ в основном осуществляется в видимой области спектра, что соответствует современному уровню развития высокоточных бортовых приборов ДЗЗ. Вместе с тем уже в настоящее время широко применяются и развиваются опережающими темпами методы и аппаратура ДЗЗ в радиодиапазоне (радиолокаторы с синтезированной антенной, скаттерометры, радиовысотометры и другие приборы активного СВЧ-зондирования – сверхвысокочастотного зондирования), а также пассивные микроволновые многоканальные радиометры инфракрасной (ИК) области спектра (ИК-радиометры и спектрометры, Фурье-спектрометры, абсорбционные спектрометры и т. д.). Постепенно возрастает разнообразие новых приборов ДЗЗ для наблюдения в ультрафиолетовой (УФ) области спектра и для реализации новых технологий ДЗЗ (новые методы лимбового и затмённого зондирования, многополяризационные и многоугловые методы, двух- и многопозиционная радиолокация, формирование сверхбольшой апертуры для СВЧ-зондирования на основе кластерных систем спутников и т. д.). Некоторые традиционные методы наблюдения Земли, использовавшиеся еще в годы существования СССР, например, фотографические, по-видимому, близки к практическому исчезновению из состава перспективных способов ДЗЗ. Таким образом, в ближайшем будущем должно произойти существенное расширение методов и номенклатуры приборов ДЗЗ в направлении внедрения все более эффективных средств зондирования в СВЧ-, ИК- и УФ-областях спектра, хотя ведущая роль многоспектральных съемочных приборов видимой (В) области спектра в целом должна сохраниться.

В соответствии с составом и характеристиками задач ДЗЗ выделим следующие основные области применения КИ ДЗЗ и кратко сформулируем их особенности:

1. Гидрометеорология, для решения конкретных задач которой необходимо высокочастотное получение в глобальном масштабе космических данных об облачном и снежно-ледовом покровах, трехмерных полях температуры и влагосодержания атмосферы, трехмерном поле ветра, температуре и других физико-химических параметрах поверхности Земли, зонах и интенсивности осадков, крупномасштабных и опасных процессах в атмосфере и на поверхности Земли (циклоны, антициклоны, тропические штормы и ураганы, стихийные гидрометеорологические явления и др.), всех составляющих элементов для изучения эволюции климата (альбедо Земли, малые газы, аэрозоль, вариации солнечного излучения и т. д.), гелиогеофизических

параметрах «погоды» Земли в околоземном космосе и динамике изменения растительного покрова.

2. Экологический мониторинг на глобальном, региональном и локальном уровнях за распространением загрязнений во всех трех основных природных сферах (атмосфера, поверхность суши, водная среда), развитием эрозионных и других процессов деградации природной среды; обнаружение факта и адресная локализация крупных промышленных и иных источников загрязнения окружающей среды; контроль трансграничного переноса загрязнений; экологический мониторинг районов добычи полезных ископаемых, транспортировки углеводородного топлива и других химических продуктов (аммиак и т. д.) и крупнейших скоплений промышленных предприятий и мегаполисов.

3. Мониторинг чрезвычайных ситуаций, включая обнаружение факта ЧС, оценку масштабов и характера разрушений; прогнозирование землетрясений и других разрушительных природных явлений; оповещение о цунами, наводнениях, селях, химическом и ином заражении местности, лесных пожарах, крупных разливах нефтепродуктов и т. д.

4. Создание и обновление широкого спектра общегеографических и тематических картографических материалов (топографические карты, карты в цифровом виде, геоинформационные системы (ГИС) разного назначения, карты сейсмичности и геологического риска, карты лесных массивов, сельхозугодий и другие карты тематического назначения).

5. Информационное обеспечение деятельности по землеустройству, прокладке транспортных магистралей, строительству промышленных объектов и градостроительству, составлению кадастров земельных и иных природных ресурсов.

6. Информационное обеспечение хозяйственной деятельности в ведущих отраслях социальной экономики, связанных с использованием и переработкой возобновляемых и невозобновляемых природных ресурсов, включая сельское, рыбное, лесное, водное хозяйство, геологию и разработку месторождений полезных ископаемых.

7. Океанография и океанология (зондирование водных поверхностей с целью определения их температуры, солености, цветности, прозрачности, биопродуктивности, загрязнений, течений, ледовой обстановки, волнения, приводного ветра, а также изучение шельфа).

8. Фундаментальное изучение закономерностей и тенденций изменения глобальных и крупнейших региональных процессов в атмосфере и других оболочках нашей планеты (гидросфера, криосфера, биосфера, околоземный космос и магнитосфера).

1.2. Характеристики космической информации

Космическая информация ДЗЗ, получаемая в интересах решения природохозяйственных и научных задач, должна удовлетворять ряду требований к ее параметрам, основными из которых являются следующие:

- пространственное разрешение (т. е. разрешение на местности);
- радиометрическое разрешение (характеризует число градаций яркости на космических снимках или чувствительность приборов ДЗЗ);
- количество спектральных каналов или спектральное разрешение;
- периодичность обзора (перерывы между повторениями наблюдений одних и тех же местностей);
- общий интервал электромагнитного спектра (ширина спектральной области съемки) для рассматриваемого бортового прибора ДЗЗ;
- размах полос захвата;
- ширина полос обзора (в пределах которых фиксируется в текущий момент полоса захвата);
- географические районы наблюдений;
- ежегодные площади съемок для разных видов КИ ДЗЗ или иной показатель требуемой производительности ДЗЗ;
- географическая точность привязки снимков на местности;
- оперативность доставки КИ ДЗЗ потребителям.

Конкретные значения требований к перечисленным параметрам существенно изменяются в зависимости от рассматриваемой задачи ДЗЗ и используемого для ее решения типа бортового съемочного или зондирующего прибора, т. е. от вида получаемой КИ ДЗЗ.

Качество данных, получаемых в результате дистанционного зондирования, зависит от их пространственного, спектрального, радиометрического и временного разрешения.

Разрешение – количественные показатели, характеризующие изобразительное качество снимков, их детальность. Разрешение определяет возможности использования снимков для решения определенного круга задач. В космическом зондировании наибольшее распространение получили два показателя: *разрешающая способность* и *пространственное разрешение*.

Разрешающую способность определяют числом белых и черных штрихов, отдельно воспроизводимых на 1 мм изображения снимка и выражают в мм в минус первой степени. Для цифровых снимков нередко выражают разрешающую способность числом точек на дюйм.

1.2.1. Пространственное разрешение

Под **пространственным разрешением** обычно понимают минимальную линейную величину изображающихся на снимке деталей местности. Для фотографических снимков в качестве такого количественного показателя принимают *линейное разрешение*, т. е. наименьшую ширину на местности линейного протяженного объекта, еще воспроизводимого конкретным снимком. Под *пространственным разрешением* цифровых снимков понимают размер на местности минимального элемента изображения – пиксела. Космические снимки варьируют по разрешению от низкого, измеряемого километрами, до очень высокого, субметрового.

Кроме количественных, для оценки снимков предложен также качественный показатель – *географическое разрешение*, которое характеризует воспроизводимость на снимках определенных (репрезентативных) объектов.

Помимо пространственного, используют и другие виды разрешения.

1.2.2. Радиометрическое разрешение

Радиометрическое (яркостное) разрешение определяется числом уровней яркости, регистрируемых приемником излучения. Обычно варьируется от 8 до 14 бит, что дает от 256 до 16 384 уровней.

1.2.3. Спектральное разрешение

Спектральное разрешение определяется шириной спектральных зон съемки при многозональной и гиперспектральной съемке и измеряется в нанометрах или микрометрах. Наиболее низкое спектральное разрешение в сотни нанометров имеют панхроматические снимки, а наиболее высокое, до 10 нм – гиперспектральные.

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

1.2.4. Временное разрешение

Иногда понятие разрешение, так называемое временное разрешение, применяют для характеристики периодичности повторных аэрокосмических съемок, осуществляемых для мониторинга изменяющихся объектов, т. е. частота пролета КА над интересующей областью поверхности. Имеет значение при исследовании серий изображений, например, при изучении динамики лесов.

1.3. Выбор орбит космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

1.3.1. Орбита и орбитальные элементы

Орбита – траектория движения материальной точки в заранее заданной системе пространственных координат для заданной в этих координатах конфигурации поля сил, которые на неё действуют.

В небесной механике это траектория небесного тела в гравитационном поле другого тела, обладающего значительно большей массой. В прямоугольной системе координат, начало которой совпадает с центром масс, траектория может иметь форму конического сечения (окружности, эллипса, параболы или гиперболы). При этом его фокус совпадает с центром масс системы.

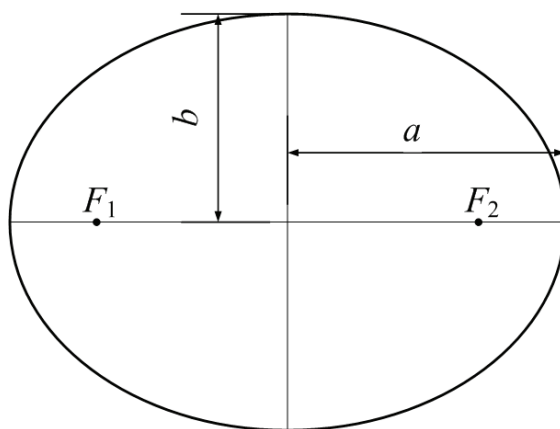


Рис. 1.1. Элементы эллипса

Согласно первому закону Кеплера тело, обращающееся вокруг Земли (в нашем случае), движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится центр Земли (рис. 1.1). Элементы эллипса, показанные

на рис. 1.1: F_1 и F_2 – фокусы эллипса; a – большая полуось; b – малая полуось. Через них находится эксцентриситет эллипса e :

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (1.1)$$

Согласно третьему закону Кеплера, квадраты периодов обращения T спутников относятся как кубы их больших полуосей a :

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad (1.2)$$

Для того чтобы задать параметры и ориентацию орбиты КА в пространстве, нужно указать шесть так называемых кеплеровских элементов (орбитальных элементов) – рис. 1.2:

1. Большая полуось a . Равна среднему расстоянию КА от центра Земли.

2. Эксцентриситет e , определяемый по формуле (1.1), – мера сплюснутости эллипса.

3. Наклонение орбиты i к экваториальной плоскости Земли – угол пересечения плоскости орбиты КА с плоскостью экватора Земли. Отсчитывается против часовой стрелки, если смотреть со стороны восходящего узла орбиты. Измеряется от 0 до 180° . Если наклонение не более 90° , то движение спутника считается прямым, если более 90° – обратным.

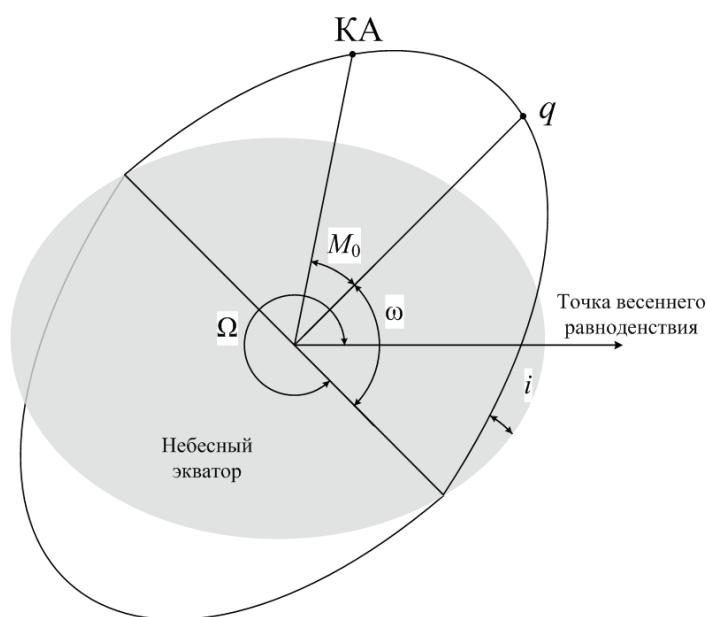


Рис. 1.2. Орбитальные элементы

4. Аргумент перигея (АП) ω – угол, отсчитываемый в плоскости орбиты КА от восходящего узла орбиты до точки перигея (точка, где расстояние между КА и центром Земли наименьшее). Угол отсчитывается против часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса мира. *Линия, соединяющая восходящий и нисходящий узлы, называется линией узлов.*

5. Долгота восходящего узла (ДВУ) Ω – угол, отсчитываемый в плоскости земного экватора от восходящего узла до точки весеннего равноденствия. Угол отсчитывается против часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса мира.

6. Средняя аномалия (СА) M_0 – угол, отсчитываемый в плоскости орбиты КА от перигея до КА на орбите. Угол отсчитывается против часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса мира.

Рассмотрим общий вид орбиты КА – эллиптическая орбита (рис. 1.3). Как было указано выше, из первого закона Кеплера следует, что в фокусе эллиптической орбиты будет находиться Земля (З), вокруг которой вращается КА. Двигаясь по эллиптической орбите, КА ближе всего подлетает к центру Земли в точке П – перигее, а дальше всего находится в точке А – апогее. *Линия, соединяющая перигей и апогей, называется линией апсид.* Из наблюдений КА можно определить большую полуось и эксцентриситет орбиты, из которых можно вычислить значения перигейного q и апогейного Q расстояний:

$$q = a(1 - e) \quad (1.3)$$

$$Q = a(1 + e) \quad (1.4)$$

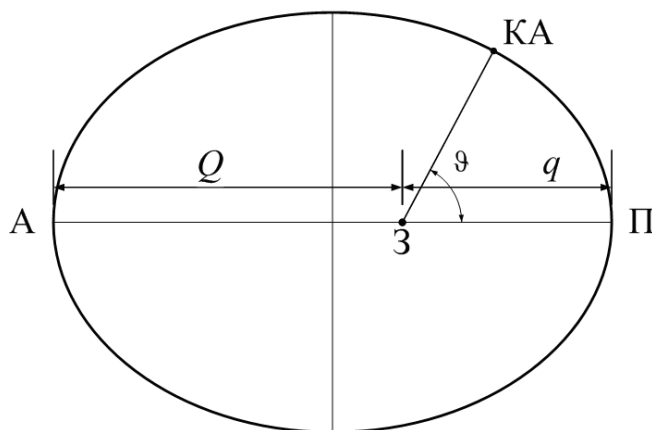


Рис. 1.3. Перигей и апогей

Из формул (1.3) и (1.4) видим, что $Q + q = 2a$. При движении по орбите изменяется расстояние r от Земли до КА – величина радиус-вектора r задаётся выражением

$$r = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \vartheta} \quad (1.5)$$

Скорость КА v (км/с) в любой точке эллиптической орбиты задаётся выражением

$$v = 7,91 \cdot \sqrt{\frac{2R}{r} - \frac{R}{a}} \quad (1.6)$$

где R – радиус Земли.

Период обращения T (мин) для КА на эллиптической орбите вычисляется по следующей формуле:

$$T = 84,4 \cdot \left(\frac{a}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.7)$$

1.3.2. Эволюции орбиты космического аппарата

Реальная форма Земли – геоид, полярный радиус которого $R_{\text{П}} = 6356,8$ км, а экваториальный – $R_{\text{Э}} = 6378,2$ км, т. е. экваториальный радиус больше полярного на 21,4 км. Земля имеет экваториальный «горб», который своей массой оказывает влияние на движение КА. Влияние это не такое уж явное – масса «горба» не вызывает изменения наклона i орбиты за счёт притягивания плоскости орбиты к плоскости экватора, но плоскость орбиты медленно поворачивается вокруг земной оси в направлении, противоположном вращению КА.

Этот процесс называется **прецессией**. Угол прецессии плоскости орбиты КА остаётся неизменным. Угловая скорость прецессии X_1 (град в сут) определяется в основном наклоном орбиты:

$$X_1 = 9,97 \cdot \left(\frac{R_{\text{Э}}}{a} \right)^{3,5} \cdot \frac{\cos i}{(1 - e^2)^2} \quad (1.8)$$

Если КА движется с запада на восток, орбита поворачивается с востока на запад. Чем меньше наклонение КА, тем больше значение прецессии (рис. 1.4). Если КА вращается с востока на запад (обратное

движение КА), то прецессия орбиты происходит в обратную сторону. При этом линия узлов также поворачивается.

Следующим важным эффектом, влияющим на эволюцию орбиты КА, является поворот плоскости эллиптической орбиты. Эффект этот, как и предыдущий, вызван существованием экваториального «горба» Земли, но, в отличие от прецессии, действует только на эллиптические орбиты. Эффект заключается в том, что эллиптическая орбита постоянно поворачивается в своей плоскости вперёд для спутников с нулевым наклонением и назад – для спутников с наклонением, близким к 90° . За счёт этого точки перигея движутся вперёд или назад по орбите.

Скорость вращения эллиптической орбиты (град/сут) определяется выражением

$$X_2 = 4,98 \cdot \left(\frac{R_{\text{Э}}}{a} \right)^{3,5} \cdot (5 \cdot \cos^2 i - 1) \quad (1.8)$$

Графики зависимости $X_2(i)$ для КА с разными значениями больших полуосей a приведены на рис. 1.5.

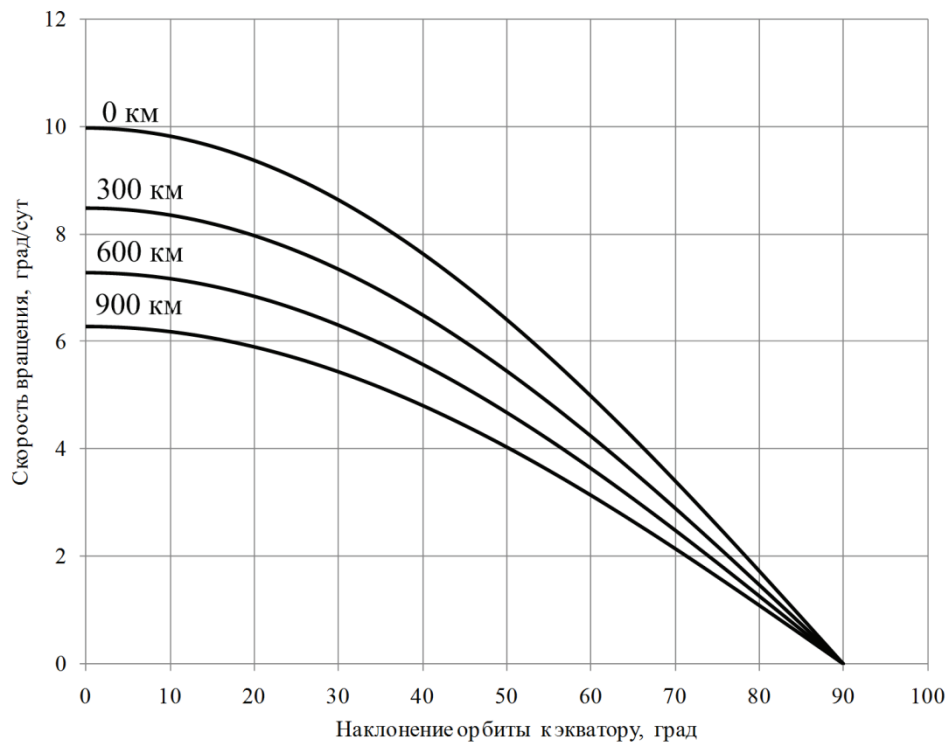
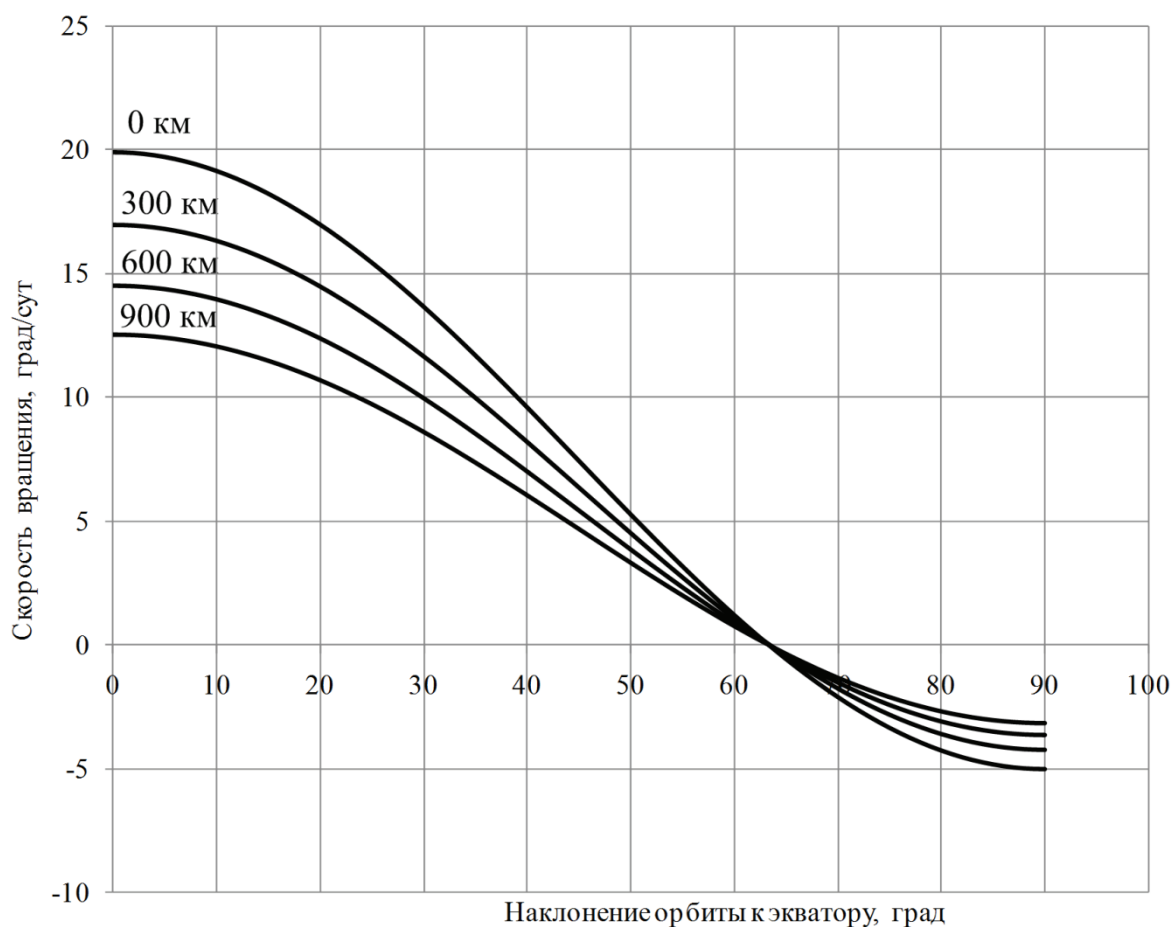


Рис. 1.4. Скорость вращения плоскости орбиты КА за счёт прецессии: числа у кривых указывают значение большой полуоси, эксцентриситет равен нулю

Рис. 1.5. Скорость вращения X_2 эллиптической орбиты КА

Вращение происходит в том же направлении, что и движение спутника, если наклонение $i < 63,4^\circ$, и в обратном направлении, если $i > 63,4^\circ$. При $i = 63,4^\circ$ поворот орбиты отсутствует.

1.3.3. Виды орбит космических аппаратов

Основное деление орбит производят по величине наклонения i орбиты и значению большой полуоси a . Кроме того, можно выделить деление по величине эксцентриситета e – малоэллиптические и высокоэллиптические орбиты.

1.3.3.1. Классификация орбит космических аппаратов по наклонению

В общем случае наклонение орбиты КА лежит в диапазоне $0^\circ < i < 90^\circ$. В зависимости от значения наклонения и высоты КА над поверхностью Земли положение областей его видимости имеет различные границы широты, а в зависимости от высоты над поверхно-

стью – и различный радиус этих областей. Чем больше наклонение, тем на более северных широтах может быть виден КА, а чем он выше – тем шире область видимости. Таким образом, наклонение i и большая полуось a определяют перемещение по поверхности Земли полосы видимости КА и её ширину.

Экваториальная орбита – крайний случай орбиты, когда наклонение $i = 0^\circ$. В этом случае прецессия и поворот орбиты будут максимальны – до 10 град/сут и 20 град/сут соответственно. Ширина полосы видимости спутника, которая расположена вдоль экватора, определяется его высотой над поверхностью Земли. Орбиты с малым наклонением i часто называют *околоэкваториальными*.

Полярная орбита – второй крайний случай орбиты, когда наклонение $i = 90^\circ$. В этом случае прецессия орбиты отсутствует, а поворот орбиты происходит в сторону, обратную относительно вращения КА, и не превышает 5 град/сут. Подобный полярный КА последовательно проходит над всеми участками поверхности Земли. Ширина полосы видимости КА определяется его высотой над поверхностью Земли, но КА рано или поздно можно увидеть из любой точки. Орбиты с наклонением i , близким к 90° , называют *приполярными*.

Солнечно-синхронная орбита (ССО) – особый вид орбиты, часто используемый КА, которые производят съёмку поверхности Земли. Представляет собой орбиту с такими параметрами, при которых КА проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время. Движение такого спутника синхронизировано с движением линии терминатора по поверхности Земли, за счёт чего КА может лететь всегда над границей освещённой и неосвещённой солнцем территории, или всегда в освещённой области, или наоборот – всегда в ночной. Причём условия освещённости при пролёте над одной и той же точкой Земли всегда одинаковые. Для достижения этого эффекта орбита должна прецессировать в сторону, обратную вращению Земли (т. е. на восток) на 360° в год, чтобы компенсировать вращение Земли вокруг Солнца. Такие условия соблюдаются только для определённого диапазона высот орбит и наклонений. Как правило, это высоты 600–800 км и наклонение i порядка 98° , т. е. КА на ССО имеют обратное движение. При увеличении высоты полёта КА наклонение должно увеличиваться, из-за чего он не будет пролетать над полярными районами. Как правило, ССО близки к круговым, но могут быть и заметно эллиптическими.

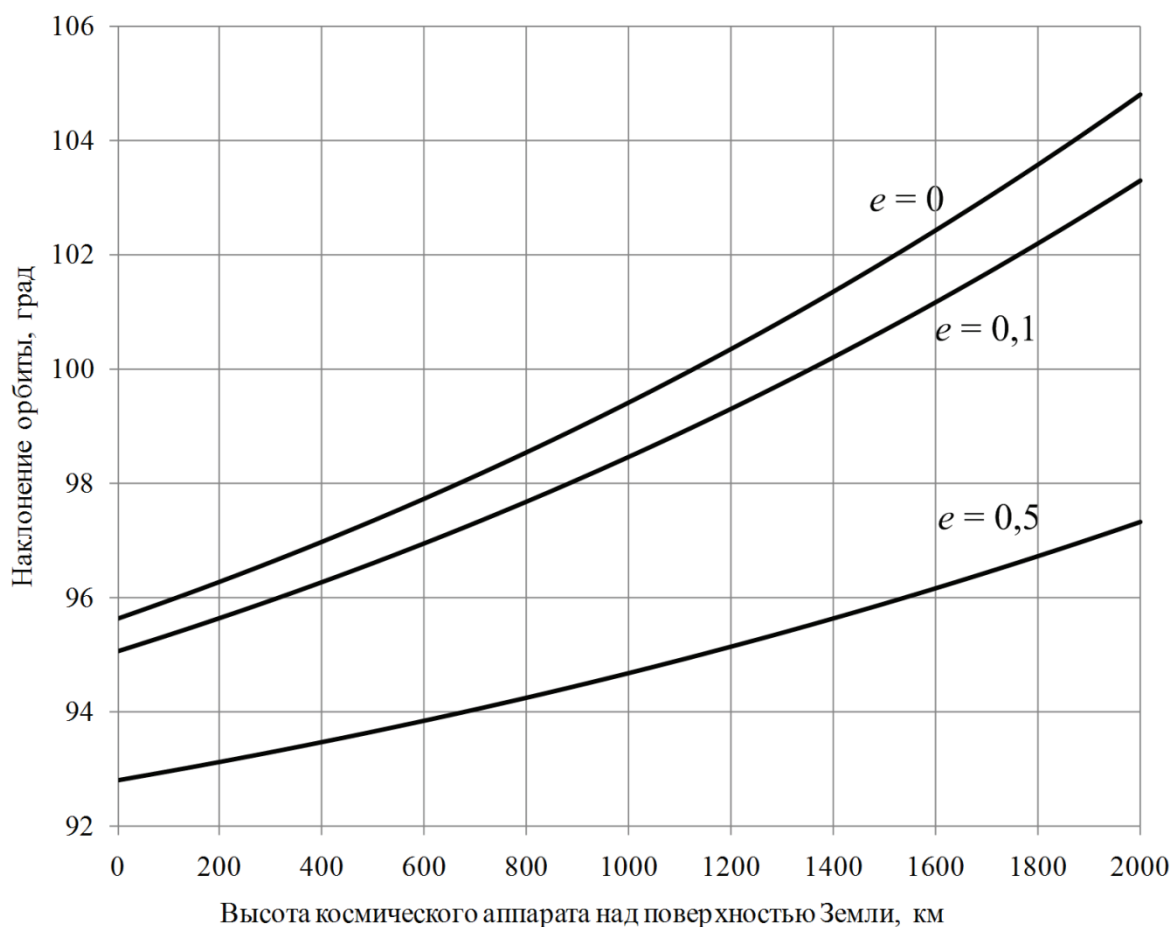


Рис. 1.6. Необходимое наклонение орбиты КА для ССО

В общем случае необходимое для ССО наклонение i_{cc} можно вычислить по формуле

$$i_{cc} = \arccos\left(-4,755411 \cdot 10^{-15} \cdot (1-e) \cdot a^{3,5}\right). \quad (1.9)$$

На рис. 1.6 показан график необходимого наклонения орбиты КА, чтобы она была солнечно-синхронной, для разных значений эксцентриситета и перигейной высоты над поверхностью Земли.

1.3.3.2. Классификация орбит космических аппаратов по величине большой полуоси

Рассмотрим классификацию орбит по величине большой полуоси, точнее, по высоте над поверхностью Земли.

Низкоорбитальными спутниками (НОС) обычно считаются КА с высотами от 160 км до 2 000 км над поверхностью Земли. Орбиты НОС подвержены максимальным возмущениям со стороны гравитационного поля Земли и её верхней атмосферы. Угловая скорость

спутников НОС максимальна – от 0,2 до 2,8 град/с, периоды обращения – от 87,6 до 127 мин.

Среднеорбитальными спутниками (СОС) обычно считаются КА с высотами от 2 000 км до 35 786 км над поверхностью Земли. Нижний предел определяется границей НОС, а верхний – орбитой геостационарных спутников. Эту зону в основном «заселяют» спутники навигации (КА системы GPS летают на высоте 20 200 км, КА системы ГЛОНАСС – на высоте 19 100 км) и связи, которые покрывают полюсы Земли. Период обращения – от 127 мин до 24 ч. Угловая скорость – единицы и доли угловой минуты в секунду.

Геостационарными спутниками (ГСС) считаются КА, имеющие период обращения вокруг Земли, равный звёздным (сидерическим) суткам – 23 ч 56 мин 4,09 с. Если наклонение i орбиты нулевое, то такие орбиты называют *геостационарными*. Геостационарные КА летают на высоте 35 786 км над поверхностью Земли. Так как их период обращения совпадает с периодом обращения Земли вокруг своей оси, то такие КА «висят» в небе на одном месте. Если наклонение i не равно нулю, то такие КА называют *геосинхронными*. В реальности многие ГСС имеют небольшое наклонение и подвержены возмущениям со стороны Луны и Солнца, в связи с чем они описывают на небе фигуры в виде «восьмёрок», вытянутых в направлении север-юг.

1.3.4. Орбиты космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Для КА ДЗЗ важно следить за всей земной поверхностью, поэтому наиболее оптимальными для них будут приполярные орбиты, т. е. ССО. Ценность ССО состоит в том, что, двигаясь по ней, КА пролетает над земными объектами всегда в одно и то же время суток, что важно для проведения космической съемки. Определенный выбор параметров ССО позволяет КА никогда не уходить в тень Земли, всегда оставаясь на солнце вблизи границы дня и ночи. КА при этом не испытывает перепадов температуры, а солнечные батареи непрерывно обеспечивают его энергией. Такие орбиты удобны для радарного картирования земной поверхности.

Для спутников ДЗЗ, от которых требуется различать предметы размером порядка метра, обычно выбирают орбиты с высотой 500–600 км. Для КА с разрешением съемки в 10–30 см такие высоты слишком велики, поэтому их орбиты часто выбирают так, чтобы перигей лежал над точкой съемки. Необходимость «подбираться» как можно