

ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Настоящая глава дает общее представление о наблюдении Земли из космоса, включая его потенциальные выгоды и ограничения. В ней изложены основные понятия, относящиеся к орбитам, и характерные особенности наблюдения Земли из космоса. В ней также приводятся принципы дистанционного зондирования.

2.1 ОРБИТЫ И НАБЛЮДЕНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

За Землей можно наблюдать из космоса с различных орбит при различных условиях обзора. В настоящем разделе рассматриваются следующие вопросы:

- a) поле зрения спутниковых приборов;
- b) орбитальный период, геостационарная орбита, цикл наблюдения и периодичность повторения орбиты;
- c) орбитальная прецессия, солнечно-синхронные орбиты и дрейфующие орбиты;
- d) эллиптические орбиты;
- e) пусковые установки и вывод на орбиту.

2.1.1 Поле зрения спутников и приборов

Самым большим преимуществом наблюдений со спутниковой платформы по сравнению с наземными наблюдениями или при помощи шаров-зондов является широкое потенциальное поле зрения или зона обслуживания (FOV). Спутниковые платформы наблюдений обычно работают на орбитах минимальной высотой 400 км. Во многих случаях их орбиты еще и выше, вплоть до геостационарной орбиты (35 786 км). FOV зависит от высоты орбиты, конфигурации измерительной аппаратуры и целевого применения. Эти факторы могут ограничивать полезный диапазон зенитных углов (ζ), под которыми можно вести наблюдение Земли. Если FOV спутника характеризуется как максимальное расстояние на поверхности Земли, которое потенциально можно видеть с высоты спутника при данном зенитном угле, то отношение, представленное на рисунке 2.1, может быть записано как:

$$\text{FOV} = 2 R \delta \pi / 180 \quad \sin(\zeta - \delta) = \frac{R}{H + R} \sin \zeta \quad (2.1)$$

где $R = 6\,371$ км (радиус Земли), H = высота орбиты в км, и δ = геоцентрический угол в градусах.

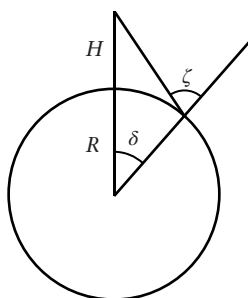


Рисунок 2.1. Поле зрения в зависимости от зенитного угла ζ

Таблица 2.1. Потенциальное поле зрения спутника и соответствующий геоцентрический угол в зависимости от высоты орбиты спутника и зенитного угла, под которым ведется наблюдение участка Земли

Зенитный угол для различных применений	<i>H</i> = 400 км		<i>H</i> = 600 км		<i>H</i> = 800 км		<i>H</i> = 35 786 км	
	FOV	δ	FOV	δ	FOV	δ	FOV	δ
$\zeta = 90^\circ$ (горизонт-горизонт)	4 401 км	19,79°	5 326 км	23,95°	6 076 км	27,32°	18 082 км	81,31°
$\zeta = 85^\circ$ (телесвязь)	3 423 км	15,39°	4 322 км	19,43°	5 057 км	22,74°	16 978 км	76,34°
$\zeta = 70^\circ$ (качественное использование)	1 746 км	7,85°	2 405 км	10,82°	2 980 км	13,40°	13 752 км	61,84°
$\zeta = 60^\circ$ (количественное использование)	1 207 км	5,43°	1 707 км	7,68°	2 157 км	9,70°	11 671 км	52,48°

В таблице 2.1 представлены значения FOV спутника (в км) в зависимости от высоты орбиты для типичных значений зенитного угла ζ . Также приводится соответствующий геоцентрический угол δ .

Потенциальное FOV спутника может не полностью покрываться одним измерительным прибором. Как принцип зондирования, так и технические характеристики прибора могут задавать верхний предел для FOV прибора. Например, радиолокационные альтиметры могут функционировать только в надирной геометрии. Они поэтому не имеют в собственном смысле FOV, за исключением расширения луча вследствие дифракции. Формирователи изображения очень высокого разрешения обычно имеют FOV в диапазоне нескольких десятков километров, как например радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА).

Движение спутника позволяет измерительной аппаратуре обеспечивать последовательное покрытие FOV вдоль орбиты. Они собственно представляют собой полосу наблюдаемой поверхности Земли, которую называют полосой захвата. Полоса захвата может быть центрирована вдоль подспутниковой трассы или может быть параллельна ей в приборах бокового обзора (например, РСА). Для некоторых задач (управление ориентацией при чрезвычайных ситуациях, стереоскопия в связи с последовательными орбитами и т. п.) определённые приборы с ограниченной полосой захвата могут менять наклон таким образом, что полоса захвата будет в стороне от трассы, внутри так называемого эффективного поля зрения. Ширина полосы захвата является поперечной составляющей фактического FOV прибора. Полоса захвата не определяется для приборов на геостационарной орбите.

2.1.2 Орбитальный период, геостационарная орбита, цикл наблюдения и периодичность повторения орбиты

Высота орбиты H определяет орбитальный период T . Это отношение записывается как:

$$T = a \left(1 + \frac{H}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.2)$$

где $a = 84,47$ мин (T выражается в минутах).

Высота, которая соответствует одним звездным суткам (23 ч 56 мин 04 с), составляет 35 786 км. Спутник с орбитой на этой высоте называется геосинхронным. Орбита

называется геостационарной, если орбита лежит в экваториальной плоскости и направлена на восток: спутник кажется неподвижным по отношению к поверхности Земли в надире экваториальной подспутниковой точки.

Для орбиты, наклоненной по отношению к экваториальной плоскости, спутник пересекает экватор на определенной долготе. Спустя T минут произойдет еще одно экваториальное пересечение на долготе со смещением на запад на величину в градусах, соответствующую вращению Земли в течение орбитального периода. Разница по долготе (или космическое расстояние) между двумя последовательными пересечениями экватора в одну и ту же фазу (спуска или подъема) называется смещением. Вместе с полосой захвата прибора смещение определяет время необходимое для полной съемки поверхности Земли (покрытие наблюдениями) (рисунок 2.2).

Если полоса захвата прибора имеет размер, по крайней мере, не меньше смещения, покрытие, обеспечиваемое двумя соприкасающимися орбитами, является непрерывным. Поэтому время, необходимое для глобального покрытия (цикл наблюдения), зависит от отношения между полосой захвата прибора и смещением.

В таблице 2.2 указываются период и соответствующее смещение для высот орбит, приведенных в качестве примеров в таблице 2.1. Помимо этого, указываются циклы наблюдения, соответствующие нескольким полосам захвата приборов. Эти полосы захвата связаны с количественным и качественным использованием, а именно для зенитных углов 70° и 60° соответственно. Когда приборы могут использоваться для наблюдений в дневное и ночное время, время наблюдения следует делить на два. Смещение и цикл наблюдения не приводятся для $H = 35\,786$ км (геостационарная высота).

Для геостационарного спутника, который непрерывно видит одну и ту же область поверхности Земли, цикл наблюдения определяется только характеристиками прибора и его завершение может занять несколько минут или даже меньше, в зависимости от области сканирования. В пределах зоны покрытия спутника наблюдение с геостационарной орбиты прекрасно подходит для непрерывного мониторинга. Например, такой мониторинг необходим для обнаружения мгновенных событий, таких как удары молнии или для высокочастотной временной выборки при быстро развивающихся ситуациях, таких как активная конвекция. При этом, однако, из охвата исключаются очень высокие широты или любые точки, находящиеся слишком далеко от подспутниковой точки. Из таблицы 2.1 видно, что $\delta = 81,31^\circ$ является максимальным геоцентрическим углом.

Для негеостационарного спутника считается, что орбита характеризуется периодичностью повторения, если он проходит точно над той же трассой после определённого числа витков. В течение периода повторения орбиты трасса спутника день ото дня может смещаться по заданной схеме, которая может иметь определенную повторяемость, и это называется подциклами. Некоторые подциклы могут представлять интерес потому, что

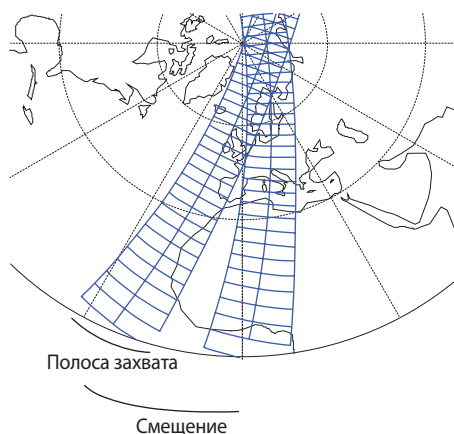


Рисунок 2.2. Смещение между двумя последовательными орбитами и полосой захвата прибора

Таблица 2.2. Период, смещение и цикл наблюдения для орбит, представленных в таблице 2.1

Орбитальный параметр	$H = 400$ км	$H = 600$ км	$H = 800$ км	$H = 35\,786$ км
Период T	92,6 мин	96,7 мин	100,9 мин	23 ч 56 мин 4 с
Смещение	2 570 км	2 690 км	2 800 км	0 км
Цикл наблюдения для $\zeta = 70^\circ$ (только днем)	35 ч	27 ч	23 ч	с прибора
Цикл наблюдения для $\zeta = 60^\circ$ (только днем)	51 ч	38 ч	31 ч	с прибора
Цикл наблюдения для $\zeta = 70^\circ$ (днем и ночью)	18 ч	13 ч	11 ч	с прибора
Цикл наблюдения для $\zeta = 60^\circ$ (днем и ночью)	26 ч	19 ч	16 ч	с прибора

спутник заходит в разные, но достаточно близкие друг к другу области в течение коротких промежутков времени, другие же подциклы могут представлять интерес, поскольку покрываемые области являются смежными по пространству.

Если орбита является солнечно-синхронной (см. раздел 2.1.3), то наличие периодичности повторения означает, что целое число витков может быть совершено за целое число дней. Орбитальный период определяет N — количество орбит, которые спутник проходит за 24 ч. Оно обычно не является целым числом. Для того чтобы получить периодичность повторения орбиты за m дней, орбитальный период подбирается таким образом, чтобы N , умноженное на m , было целым числом. Тогда N можно записать в таком виде, при котором n и ℓ , соответственно, есть частное и остаток деления « $N \cdot m$ » на m :

$$N = n + \ell/m \quad (2.3)$$

где n , ℓ и m являются целыми числами ($\ell < m$).

Уравнение 2.3 также применимо к орбитам, не являющимся солнечно-синхронными. Однако, в таких случаях периодичность повторения m уже не может быть выражена в астрономических сутках, равных 24 ч, и должна быть немного скорректирована в связи с дрейфом орбиты. Таблица 2.3 содержит примеры периодичности повторения орбиты и основных подциклов для ряда орбит.

Орбита с периодичностью повторения является необходимым элементом, если наблюдение определенной территории требуется проводить с фиксированными интервалами при совершенно одинаковых условиях. Это относится к альтиметрическим измерениям для геодезических применений, либо к формирователям изображений высокого разрешения, которые используются в наблюдениях за сушей для обнаружения локальных изменений.

Периодичность повторения орбит может быть полезной, когда полоса захвата прибора существенно уже, чем смещение, и глобального охвата невозможно достичь за один день. В таком случае согласно определенной логике может быть выстроена последовательность, обеспечивающая охват день за днем, если в этом есть необходимость. Подобная логика может потребоваться для обеспечения регулярной прогрессии или во избежание систематических смещений в результате ненадлежащей выборки.

На рисунке 2.3 графически представлена эволюция орбитальных траекторий для орбиты с однодневным подциклом (такой как ранняя версия Landsat). Как показывает рисунок 2.3,

Таблица 2.3. Периодичность повторения и основные подциклы для ряда орбит

Высота орбиты	Солнечно-синхронные орбиты					Несолнечно-синхронные орбиты
	909 км (например, Landsat 1—3)	705 км (например, Landsat 4—8)	832 км (например, SPOT)	791 км (например, Envisat)	820 км (например, Metop)	1 336 км (например, Jason) ^a
Период	103,2 мин	98,9 мин	101,5 мин	100,6 мин	101,3 мин	112,4 мин
Количество орбит/день	13 + 17/18	14 + 9/16	14 + 5/26	14 + 11/35	14 + 6/29	12 + 7/10 ^a
Периодичность	18 дней	16 дней	26 дней	35 дней	29 дней	10 дней ^a
Витки/цикл	251	233	369	501	413	127
Основной(ые) подцикл(ы)	1 день	7 дней, 2 дня	5 дней	16 дней, 3 дня	5 дней	3 дня ^a

Примечание:

- а Что касается Совместной сети спутников для альтиметрии в интересах океанографии (JASON), спутники которой не являются солнечно-синхронными, значения приводятся для продолжительности дня, равной 23 ч 48 мин, т. е. 0,99156 от продолжительности астрономических суток.

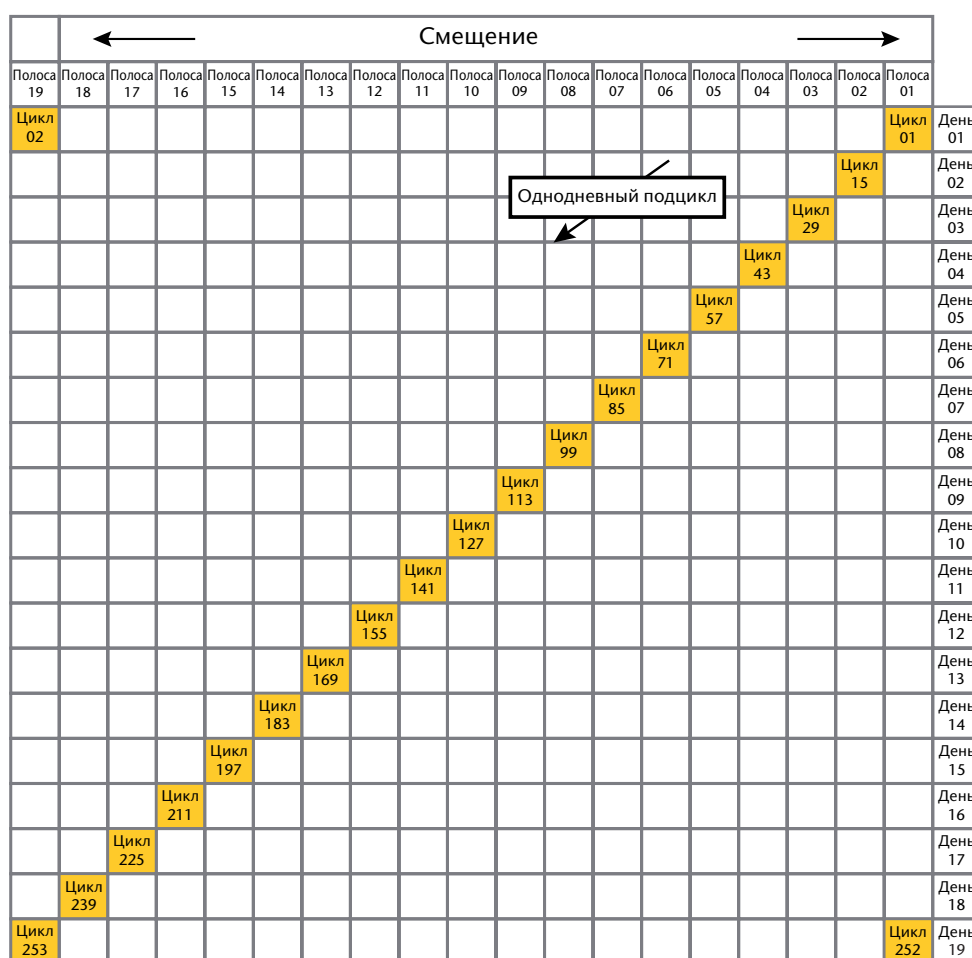


Рисунок 2.3. Схематическое представление эволюции орбитальной трассы спутника Landsat на протяжении периода повторения орбиты ($N = 13 + 17/18$, периодичность повторения: 18 дней, 251 витков/цикл)

при однодневном подцикле каждый день полоса покрытия примыкает к полосе, которую наблюдают в предыдущий день. Ширина полосы покрытия может быть подобрана таким образом, чтобы соответствовать полосе захвата прибора для того, чтобы избежать каких-либо пропусков. Недостатком является то, что после первых нескольких ежедневных заходов в область над целевой территорией или близко к ней, следующая серия заходов состоится только после завершения периода повторения орбиты.

В текущей модификации спутника Landsat временная эволюция орбитальных трасс в течение периода повторения орбиты (16 дней) приводит к двум основным подциклам, показанным на рисунке 2.4. Двухдневный подцикл обеспечивает более короткий временной разрыв, а семидневный цикл обеспечивает более близкое географическое совпадение.

Несмотря на то, что концепция периодичности повторения орбит и подциклов вытекает из требований, предъявляемых к использованию приборов с узкой полосой захвата, включая те, которые ведут наблюдения только в надире, орбиты с подциклами могут быть также полезны для приборов с относительно широкой полосой захвата. Например, приборы зондирования могут иметь полосу захвата шириной до нескольких тысяч километров. (К примеру, усовершенствованный микроволновый прибор зондирования (AMSU) или интерферометр зондирования атмосферы в инфракрасном диапазоне (IASI) имеют полосы захвата более 2 200 км). Однако качество получаемой продукции выше, когда прибор ближе к надирной подтрассе. Поэтому существует интерес к обеспечению

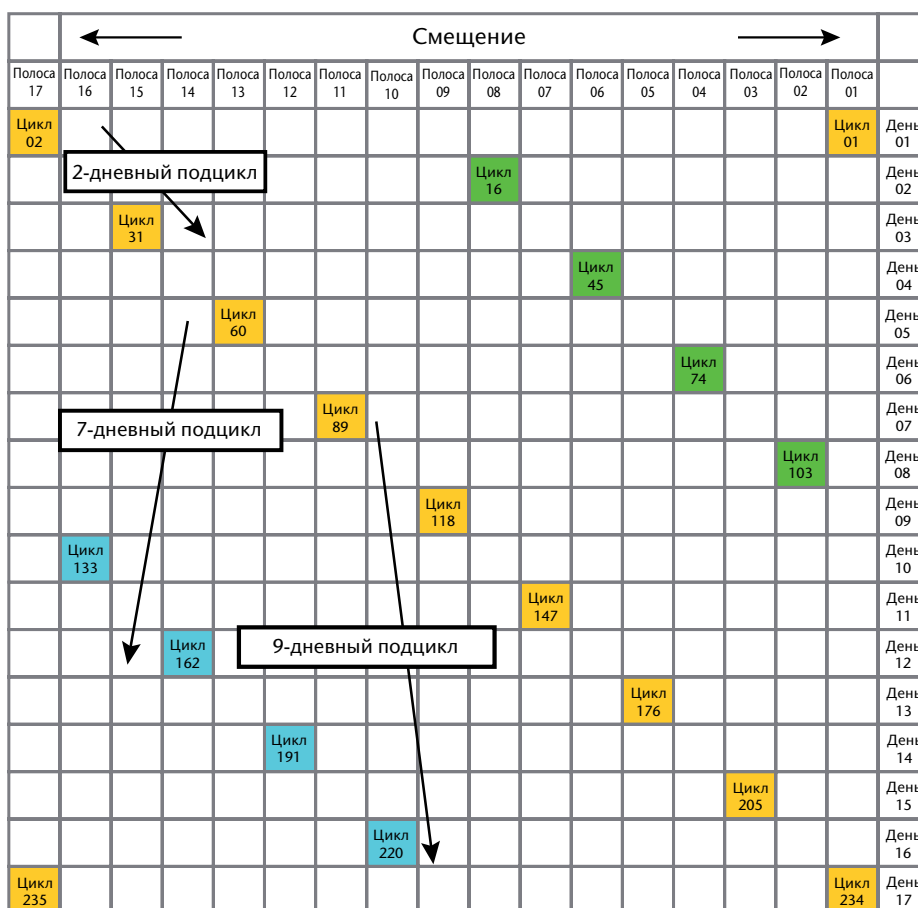


Рисунок 2.4. Схематическое представление эволюции орбитальной трассы находящегося в полете спутника Landsat на протяжении периода повторения орбиты ($N = 14 + 9/16$, периодичность повторения: 16 дней, 233 витков/цикл). Показаны три подцикла: 7 дней (на запад) — главный подцикл, обеспечивающий самые близкие наблюдения по пространству; 2 дня (на восток), обеспечивающий самые близкие наблюдения по времени; 9 дней (на восток), представляющий ограниченный интерес, получаемый сложением первых двух.

того, чтобы покрытие позволяло получать достаточно хорошее сочетание данных более высокого и более низкого качества. Орбиты спутников Национального управления по океанам и атмосфере (НУОА) и метеорологических оперативных спутников (Metop) имеют пятидневный подцикл, как показано на рисунке 2.5 на примере Metop.

Периодичность повторения орбит и подциклы удобны по ряду причин, однако необходимо также отметить и несколько связанных с ними недостатков:

- если полоса захвата прибора слишком узкая по отношению к смещению и количеству витков по орбите в течение периода повторения цикла, некоторые области никогда не будут видны. Крайним примером является прибор, проводящий наблюдения только в надире, например альтиметр;
- каждодневная последовательность наблюдений с орбиты с периодичностью повторения может вносить систематические ошибки в выборку во время наблюдений (ложная длина волны, соответствующая периодичности повторения цикла или подциклам);
- обеспечение периодичности повторения цикла/подциклов требует затратных систем контроля спутниковых орбит.

Поэтому, если вся бортовая аппаратура имеет достаточно широкую полосу захвата, к периодичности повторения/подциклу обычно не прибегают.

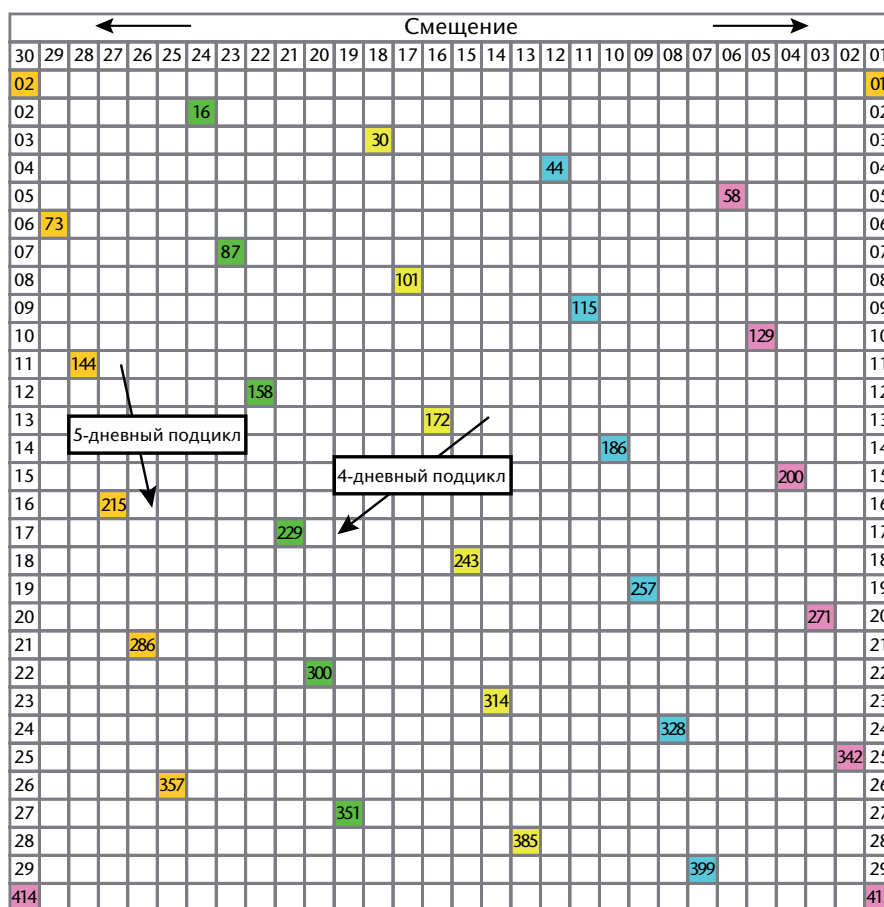


Рисунок 2.5. Схематическое представление эволюции орбитальной трассы спутника Metop ($N = 14 + 9/16$, периодичность повторения: 29 дней, 412 витков/цикл). Показаны два подцикла: 5 дней (на восток) — главный подцикл, обеспечивающий самые близкие наблюдения по пространству; 4 дня (на запад) для несколько более близких наблюдений по времени.

2.1.3 Орбитальная прецессия, солнечно-синхронные орбиты и дрейфующие орбиты

Орбитальная плоскость может лежать в экваториальной плоскости Земли или быть наклонена на ε градусов (см. рисунок 2.6).



Рисунок 2.6. Определение наклонной орбиты

При $\varepsilon = 90^\circ$ спутник следует по меридианной линии, и орбита является полярной. Это удобно для наблюдения за поверхностью Земли от полюса к полюсу.

Гравитационное поле, действующее на спутник, перпендикулярно геопотенциальной поверхности на высоте спутника, которая является несколько эллипсоидной аналогично геоиду. При $\varepsilon \neq 90^\circ$, действие этих сил является прецессией орбитальной плоскости вокруг полярной оси. Скорость прецессии α рассчитывается как:

$$\alpha = -10,02 \cos \varepsilon \left(1 + \frac{H}{R}\right)^{-\frac{7}{2}} \quad (\text{градус/день}) \quad (2.4)$$

Для чисто полярной орбиты ($\varepsilon = 90^\circ$) скорость прецессии равна нулю. Орбитальная плоскость имеет неизменную ориентацию по отношению к неподвижным звездам. Однако, поскольку Земля совершает вращение вокруг Солнца за один год, условия освещения поверхности, которую видит спутник, меняются каждый день на $360/365$ градусов, то есть 59 мин. Область, наблюдаемая в дневное время в 12:00, в день t_0 , будет наблюдаться на рассвете в день $t = t_0 + 3$ месяца (рисунок 2.7, слева). Для измерений в дневное время это будет означать различные условия наблюдения день за днем, причем условия наблюдений зависят от времени года. В частности, когда направление Земля-Солнце становится перпендикулярным орбитальной плоскости, освещенность на рассвете и в сумерки делает невозможными многие измерения.

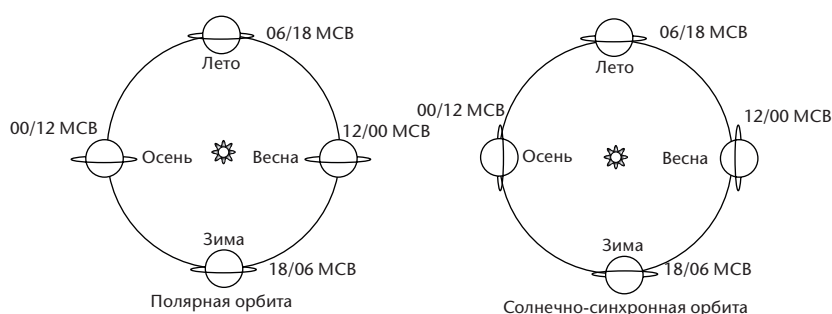


Рисунок 2.7. Слева: чисто полярная орбита с изменяющимся местным солнечным временем (МСВ) в течение года; справа: солнечно-синхронная орбита с неизменным МСВ в течение года

Наклонение орбиты ε может быть задано таким образом, чтобы скорость прецессии точно соответствовала полному обороту Земли вокруг Солнца за год. Вводя величину $\alpha = 360/365$ (градусов/день) в уравнение 2.4, получаем, что наклонение ε_0 должно удовлетворять условию:

$$\cos \varepsilon_0 = -0,0988 \left(1 + \frac{H}{R}\right)^{\frac{7}{2}} \quad (2.5)$$

Орбита, которая удовлетворяет этому условию, называется солнечно-синхронной. Отрицательный знак ε_0 указывает на то, что орбита движется в направлении, обратном вращению Земли. Местное солнечное время для территорий, над которыми пролетает спутник на данной широте, является постоянным на протяжении всего года (см. рисунок 2.7, справа). В таблице 2.4 перечислены значения ε_0 ряда солнечно-синхронных орбит в зависимости от высоты орбиты.

Таблица 2.4. Наклонение солнечно-синхронных орбит в зависимости от высоты орбиты

400 км	600 км	800 км	1 000 км	1 200 км	1 400 км
97,02°	97,78°	98,60°	99,47°	100,41°	101,42°

Необходимо отметить, что отклонение от полярной оси увеличивается с высотой орбиты. Это является причиной существующего недостатка высоких солнечно-синхронных орбит: полюса могут быть не видны, если у прибора недостаточно широкая полоса захвата. Вместе с тем, при относительно малых высотах орбит орбитальная плоскость является околополярной.

Важнейшая особенность солнечно-синхронной орбиты — это неизменное местное солнечное время, что возможно является неблагоприятным фактором для проведения некоторых видов измерений. Явления, изменяющиеся в течение суток (например, конвективные облака, осадки, радиационный баланс, уровень моря под влиянием астрономических приливов) имеют смещенную выборку при наблюдениях с солнечно-синхронного спутника, т. е. при постоянном местном солнечном времени.

В целом спутники для оперативной метеорологии, наблюдений за поверхностью суши и океанографии, за исключением альтиметрии геодезического назначения, используют солнечно-синхронную орбиту. Для научных целей, предусматривающих изучение процессов, зависящих от суточных колебаний и требующих несмещенной выборки, не солнечно-синхронные (дрейфующие) орбиты, возможно, являются более предпочтительными.

2.1.4 Эллиптические орбиты

Предыдущие разделы относятся к круговым орбитам, которые гораздо чаще используются для наблюдений за Землей, особенно солнечно-синхронные и геостационарные. Однако, как околополярные низкие околоземные орбиты (НОО), так и геостационарные орбиты (ГСО) имеют ряд ограничений.

Околополярный низкоорбитальный (НОО) спутник обеспечивает глобальный охват, но делает это нечасто. Даже если полоса захвата прибора не меньше смещения, что позволяет иметь перекрывающееся покрытие орбитами, следующими одна за другой, один спутник может обеспечить полное покрытие поверхности Земли в лучшем случае два раза в день (или даже один раз в день, если зондирование возможно проводить только в условиях дневного освещения или в ночное время). Если необходим более частый глобальный охват, то требуются дополнительные спутники в комплементарных орбитальных плоскостях (см. таблицу 2.5).

Из таблицы 2.5 видно, что любой цикл наблюдения, составляющий приблизительно менее трех часов, будет чрезвычайно затруднительным, поскольку он потребует группировки НОО спутников на скоординированных орбитах.

Таблица 2.5. Количество спутников на НОО, необходимое для достижения требуемого цикла наблюдений (предполагаемая высота: $H = 800$ км)

Полоса захвата прибора	Возможность проведения наблюдений	Требуемый цикл наблюдений						
		24 ч	12 ч	8 ч	6 ч	3 ч	2 ч	1 ч
2 800 км	Только днем	1 сп	2 сп	3 сп	4 сп	8 сп	12 сп	24 сп
	Ночью и днем	0,5 сп	1 сп	1,5 сп	2 сп	4 сп	6 сп	12 сп
1 400 км	Только днем	2 сп	4 сп	6 сп	8 сп	16 сп	24 сп	48 сп
	Ночью и днем	1 сп	2 сп	3 сп	4 сп	8 сп	12 сп	24 сп

Охват существенно улучшается для высоких широт (см. рисунок 2.2); так, например, он в два раза чаще на широте 60° , чем на экваторе. В полярных районах частота охвата становится близкой к орбитальному периоду T (т. е. ~ 100 мин) или будет менее часа при большем количестве спутников.

Более короткого периода наблюдения можно добиться, если оставить без внимания солнечную синхронность и принять более низкое наклонение, однако тогда охват уже не будет глобальным. Орбиты с низким наклонением используются для мониторинга внутритропических зон.

Орбита ГЕО позволяет проводить наблюдения со скоростью, которая ограничена только возможностями прибора. Однако потребуется группировка приблизительно из шести спутников вокруг экватора для того, чтобы покрыть все долготные сектора до широты как минимум 55° ; самые высокие широты охватить не представляется возможным.

Некоторые из перечисленных ограничений могут быть сняты путем принятия эллиптической орбиты. При эллиптической орбите скорость спутника меняется вдоль орбиты; она является минимальной в районе апогея, что дает больше времени для выполнения измерений над пролетаемой территорией. Эллиптические орбиты обычно оптимизируются для конкретных целей, особенно для целей космической науки, таких как сбор данных измерений *in situ* до очень высоких высот при прохождении через ионосферу и плазмосферу.

Проблема эллиптических орбит заключается в том, что поскольку на аргумент перигея влияют вековые возмущения, апогей находится на широте, которая меняется со временем. Вековое возмущение может быть компенсировано, если орбитальное наклонение $\varepsilon = \sin^{-1} (4/5)^{1/2} \approx 63,4^\circ$. В этом случае район апогея, где спутник проводит большую часть времени, является неизменным. В этом положении измерения могут проводиться более часто в квазигеостационарном режиме.

Две орбиты такого типа использовались для телекоммуникационных спутников и планируются к использованию для наблюдений за Землей: спутники Молния (рисунок 2.8), который имеет период 12 ч и апогей на 39 800 км, и Тундра, который имеет период 24 ч и апогей на высоте 48 300 км. На орбите спутник Молния является почти геостационарным в течение почти 8 ч из 12-часового периода, а на орбите спутник Тундра — около 16 ч из 24-часового периода.

Орбиты спутников Молния и Тундра обслуживают только одну полусферу. Кроме того, зона 8-часового или 12-часового квазистационарного наблюдения центрирована на конкретное местное солнечное время. Если требуется охват всех широт выше 60° в течение 24 ч в сутки, то необходимо иметь три спутника Молния или два спутника Тундра. Интересным вариантом орбиты является орбита с тремя апогеями и 16-часовым периодом и апогеем на 43 500 км. В таблице 2.6 представлены основные характеристики орбит спутников Молния и Тундра. В положении апогея, которое подходит для частой выборки, высота спутника превышает высоту ГЕО.



Рисунок 2.8. Орбита спутника Молния

Таблица 2.6. Основные характеристики орбит спутников Молния и Тундра (высоты апогея и перигея могут быть слегка скорректированы по мере необходимости)

Тип орбиты	Наклонение	Период	Апогей	Перигей	Покрывтие (от одного спутника)	Спутники полусферного охвата
Молния	63,4°	12 ч	~39 800 км	~1 000 км	Виден над 2 точками в течение ~8 ч	3
Тундра	63,4°	24 ч	~48 300 км	~24 000 км	Виден над 1 точкой в течение ~16 ч	2

2.1.5 Пусковые установки и вывод на орбиту

Спутники выводятся на орбиту при помощи пусковой установки. Пусковая установка должна выполнять следующие функции:

- обеспечивать содержание спутника в обтекателе, где должны быть обеспечены жизненно важные функции спутника. При нахождении в обтекателе спутник хранится в компактной геометрии для минимизации занимаемого объема и защиты от эффектов ускорения;
- выводить спутник на орбиту. Для того чтобы минимизировать общую массу, доставляемую на большие высоты, пусковая установка обычно имеет ступенчатую структуру. Первая ступень, которая является самой тяжелой, должна обеспечить максимальную тягу для отрыва от пусковой установки и отделяется в первую очередь. Обтекатель сбрасывается на соответствующей высоте. Другие ступени (одна или две) воспламеняются и последовательно отделяются;
- отпускать спутник. Для спутников на круговых орбитах НОО пусковая установка выпускает спутник непосредственно на окончательную орбиту. Для эллиптических орбит пусковая установка отпускает спутник в перигее и придает ему последнее ускорение для получения энергии, соответствующей целевой орбите.

После выхода на орбиту спутник разворачивает солнечные батареи и начинает работу в автономном режиме. Одним из этапов полета является достижение окончательной орбиты путем запуска силовой установки. При нахождении на геостационарной орбите спутник в перигее на высоте 35 786 км переходит на эллиптическую орбиту, благодаря наличию двигателя, включаемого в апогее. Двигатель использует твердое, гибридное или

чаще всего жидкое топливо (жидкостный двигатель апогея), которое сжигается во время нахождения в апогее для придания ускорения, необходимого для формирования круговой орбиты (см. рисунок 2.9).



Рисунок 2.9. Достижение ГЕО

Запуск спутника — это сложное и затратное дело. Для того чтобы оптимизировать экономическую эффективность, во многих случаях производят запуск сразу нескольких спутников. Тогда задача последней стадии заключается в том, чтобы выпустить разные спутники в различное время для разделения орбит друг от друга. Соответствующие силовые установки платформы в дальнейшем обеспечивают переход на окончательные орбиты.

Группировки мини-спутников, запуски которых по отдельности были бы совершенно неэкономичными, представляют собой хороший образец группового запуска. Одним из примеров эффективной стратегии запуска спутников является так называемая группировка Walker Delta Pattern. Наклонение орбиты ε всех спутников должно быть одинаковым. Пусковая установка выпускает спутники на различных высотах, либо силовые установки спутников разносят их на разные высоты. Тогда каждая орбита будет иметь различную скорость прецессии согласно уравнению 2.4 и орбитальные фазы будут отличаться друг от друга со временем. Когда орбиты всех спутников будут должным образом разнесены, силовые установки платформы обеспечат доставку каждого из них на требуемую высоту H . Из уравнения 2.4 видно, что на практике стратегия хорошо работает для малых наклонений и относительно низких высот, в других же случаях время, необходимое для развертывания группировки, становится слишком большим. Например, для того, чтобы развернуть группировку спутников системы наблюдений в области метеорологии, исследований ионосферы и климата (COSMIC) (6 спутников, $H = 800$ км, $\varepsilon = 71^\circ$), потребовался один год.

2.2 ПРИНЦИПЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Наблюдения за Землей из космоса в основном проводятся с использованием электромагнитного излучения. Исключение составляют измерения *in situ* на уровне платформы (гравитационного поля, магнитного поля, электрического поля и плотности заряженных частиц в солнечном ветре). В настоящем разделе обсуждается дистанционное зондирование Земли и уделяется особое внимание следующим вопросам:

- а) электромагнитный спектр и диапазоны, используемые для дистанционного зондирования;

- b) основные закономерности взаимодействия электромагнитного излучения и вещества;
- c) наблюдения в окнах прозрачности атмосферы;
- d) наблюдения в полосах поглощения;
- e) лимбовое зондирование и радиозатменные измерения;
- f) активное зондирование.

2.2.1 Электромагнитный спектр и диапазоны, используемые для дистанционного зондирования

Спектр электромагнитного излучения, наблюдаемый из космоса (спутниковые наблюдения в надире), представлен на рисунке 2.10. Представленный здесь диапазон от 0,2 мкм до 3 см (или 10 ГГц) включает все длины волн, которые используются для дистанционного зондирования из космоса. Изменения с длиной волны объясняются влиянием атмосферы с пропускной способностью от 1 (атмосферное окно прозрачности) до 0 (полная непрозрачность вследствие атмосферного поглощения).

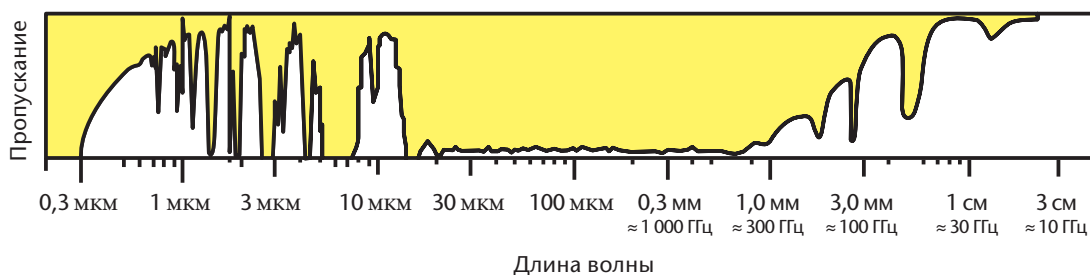


Рисунок 2.10. Спектр (коэффициент пропускания) электромагнитного излучения, наблюдаемый из космоса в надире; диапазон: от 0,2 мкм до 3 см

В таблице 2.7 представлены области спектра, которые общеприняты, хотя и не стандартизированы. Помимо широко используемого параметра длины волны λ и частоты ν , приводится также волновое число ν^* , которое, главным образом, используется в спектроскопии.

В таблице 2.8 приводится дальнейшая подразбивка микроволнового диапазона и соседнего ДИК-диапазона, используемых в радиолокации и пассивной радиометрии.

Полный спектр, представленный на рисунке 2.10, состоит из различных областей с достаточно различными характеристиками.

В УФ-области спектра атмосферное поглощение будет сильным, главным образом, благодаря основным компонентам воздуха (азоту (N_2) и кислороду (O_2)) и малым газовым составляющим (из которых наиболее важным является озон (O_3)). В этой спектральной области поверхность Земли наблюдать невозможно. Источником излучения для дистанционного зондирования является отраженная солнечная радиация.

В ВИД-, БИК- и КВИК-областях спектра от 0,4 до 3 мкм, в некоторых случаях до 4 мкм, зондирование может осуществляться по отраженной солнечной радиации. В этих областях спектра существует несколько прозрачных областей (окон прозрачности) и большое количество полос поглощения (см. рисунок 2.11).

Таблица 2.7. Полосы электромагнитного спектра, используемые для дистанционного зондирования

	<i>Разбивка спектра</i>	<i>Длина волны λ</i>	<i>Волновое число $\nu^* = 1/\lambda$</i>	<i>Частота $\nu = c/\lambda$</i>
УФ	Ультрафиолетовый диапазон	0,01–0,38 мкм	26 320–1 000 000 см ⁻¹	
В	Голубой	0,436 мкм	22 935 см ⁻¹	
Г	Зеленый	0,546 мкм	18 315 см ⁻¹	
Р	Красный	0,700 мкм	14 285 см ⁻¹	
ВИД	Видимый	0,38–0,78 мкм	12 820–26 320 см ⁻¹	
БИК	Ближний инфракрасный	0,78–1,30 мкм	7 690–12 820 см ⁻¹	
ВБИК	Видимый и ближний инфракрасный (ВИД + БИК)	0,38–1,3 мкм	7 690–26 320 см ⁻¹	
КВИК	Коротковолновый инфракрасный	1,3–3,0 мкм	3 330–7 690 см ⁻¹	
КВ	Коротковолновый	0,2–4,0 мкм	2 500–50 000 см ⁻¹	
ДВ	Длинноволновый	4–100 мкм	100–2 500 см ⁻¹	
СВИК	Средневолновый инфракрасный	3,0–6,0 мкм	1 665–3 330 см ⁻¹	
ТИК	Тепловой инфракрасный	6,0–15,0 мкм	665–1 665 см ⁻¹	
ИК	Инфракрасный (СВИК + ТИК)	3–15 мкм	665–3 330 см ⁻¹	
ДИК	Дальний инфракрасный	15 мкм –1 мм	10–665 см ⁻¹	300–20 000 ГГц
Суб-мм	Субмиллиметровые волны (часть ДИК)	0,1–1 мм	10–100 см ⁻¹	300–3 000 ГГц
мм	Миллиметровые волны (часть МКВ)	1–10 мм	1–10 см ⁻¹	30–300 ГГц
МКВ	Микроволновый	0,1–30 см	0,033–10 см ⁻¹	1–300 ГГц

В СВИК и ТИК-областях спектра от 4 до 15 мкм источником излучения является тепловая эмиссия с поверхности Земли и из атмосферы, что главным образом обусловлено поглощением/эмиссией водяного пара и двуокиси углерода, которые вносят

Таблица 2.8. Полосы, используемые в радиолокации (согласно Американскому обществу фотограмметрии и дистанционного зондирования)

<i>Полоса</i>	<i>Диапазон частот</i>	<i>Диапазон длин волн</i>
P	220–390 МГц	77–136 см
UHF	300–1 000 МГц	30–100 см
L	1–2 ГГц	15–30 см
S	2–4 ГГц	7,5–15 см
C	4–8 ГГц	3,75–7,5 см
X	8–12,5 ГГц	2,4–3,75 см
K _u	12,5–18 ГГц	1,67–2,4 см
K	18–26,5 ГГц	1,1–1,67 см
K _a	26,5–40 ГГц	0,75–1,18 см
V	40–75 ГГц	4,0–7,5 мм
W	75–110 ГГц	2,75–4,0 мм

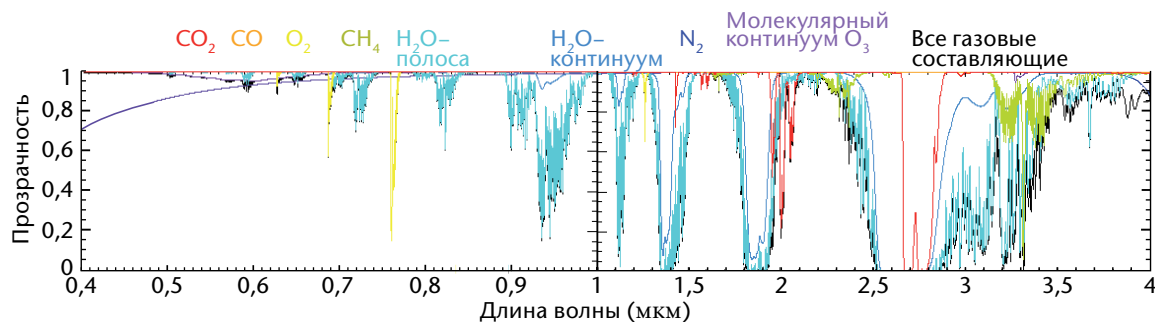


Рисунок 2.11. Атмосферный спектр в диапазоне от 0,4 до 4,0 мкм. В нем имеется несколько окон, а также полос поглощения окиси углерода (CO, около 2,3 мкм), двуокиси углерода (CO₂, около 1,6, 2,1 и 2,8 мкм), метана (CH₄, около 2,3 и 3,4 мкм), несколько полос кислорода (главным образом около 0,77 мкм), несколько полос азота (N₂) и озона (O₃) и много значимых полос водяного пара (главным образом 0,94; 1,13; 1,37; 1,8 и 2,7 мкм). Здесь также представлен молекулярный континуум, который препятствует использованию УФ для дистанционного зондирования поверхности земли и нижней атмосферы из космоса.

существенный вклад в парниковый эффект. В сочетании с основным окном прозрачности атмосферы это позволяет сохранять тепловое равновесие планеты на приемлемом уровне (см. рисунок 2.12).

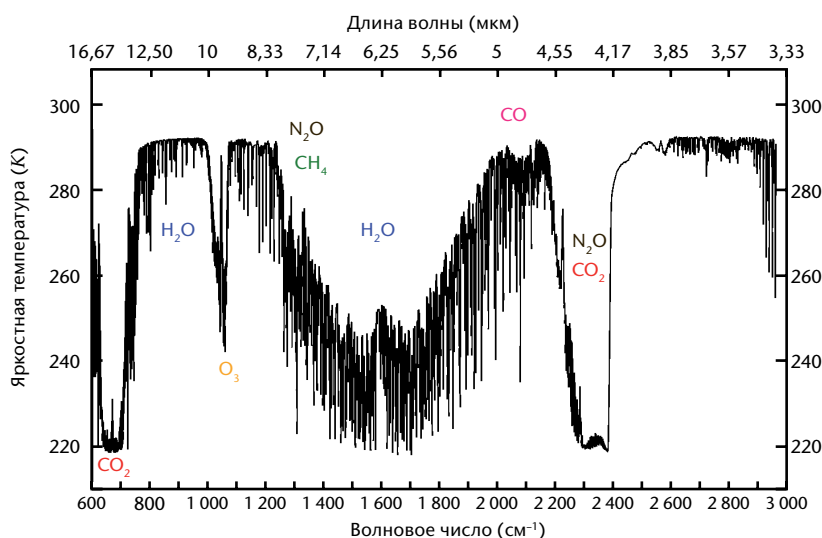


Рисунок 2.12. Атмосферный спектр в диапазоне от 3,33 до 16,67 мкм. Основные окна прозрачности атмосферы находятся в диапазонах от 3,7 до 4,0 и от 10 до 12 мкм. Имеются большие полосы поглощения водяного пара (H₂O) и двуокиси углерода (CO₂). Другие компоненты атмосферы: озон (O₃, около 9,7 мкм), метан (CH₄, около 7,7 мкм), монооксид углерода (CO, около 4,6 мкм) и закись азота (N₂O, около 4,5 и 7,7 мкм).

Следующая спектральная область, дальний ИК-диапазон от 15 мкм до 1 мм (или 300 ГГц), является полностью непрозрачной из-за континуума водяного пара. В этой области, которую трудно исследовать из-за отсутствия эффективных методов обнаружения, имеются линии поглощения нескольких важных компонентов атмосферы, таких как гидроксил радикал (OH), известный как «очиститель» атмосферы, и хлористый водород

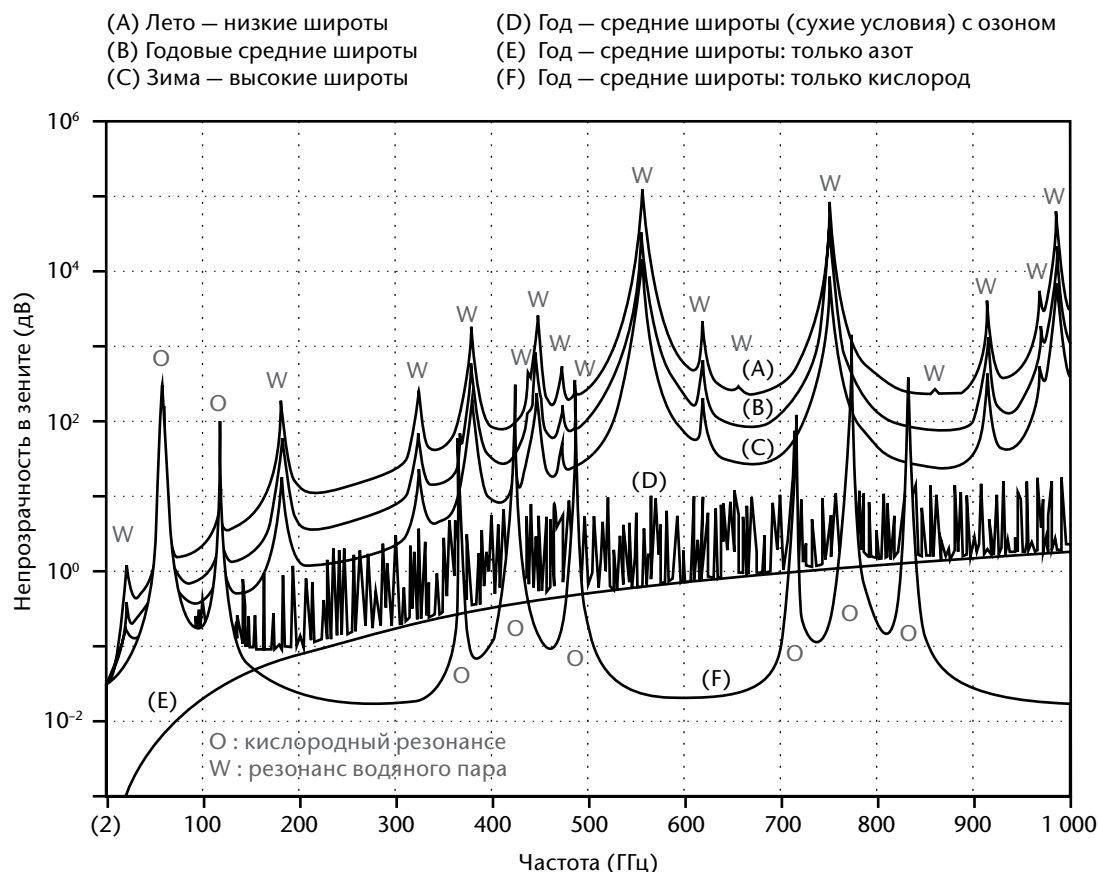


Рисунок 2.13. Атмосферный спектр в диапазоне от 2 до 1 000 ГГц. Здесь преобладает континуум водяного пара, который становится все более непрозрачным с увеличением частоты в ДИК-диапазоне. Это не позволяет вести наблюдения поверхности Земли на больших частотах из космоса. Вторгающиеся линии озона также превалируют в спектре. Наиболее полезными являются полосы кислорода (около 57, 118, 388, 424, 487 ГГц и выше), которые используются для определения температуры атмосферы, и полосы водяного пара (около 22, 183, 325, 380, 448 ГГц и выше).

Источник: Klein and Gasiewski (2000).

(HCl) — буферный компонент, из которого высвобождается хлор, разрушающий озон. Гидроксил радикал и хлористый водород можно наблюдать только в ДИК-диапазоне (например, около 120 мкм $\approx$ 2 500 ГГц и 480 мкм $\approx$ 625 ГГц соответственно).

В микроволновом диапазоне от 1 до 300 ГГц источником излучения является тепловое излучение с поверхности Земли и атмосферы. На рисунке 2.13 представлен атмосферный спектр, начиная с 2 ГГц до субмиллиметровых частот 1 000 ГГц.

В той части микроволнового диапазона, в которой атмосфера является более прозрачной, т.е. на частотах ниже 100 ГГц, длины волн превышают 3 мм и, следовательно, они гораздо больше размера облачных капель, за исключением облаков, дающих осадки. Поэтому микроволновый диапазон используется для наблюдения за поверхностью Земли или определения свойств атмосферы почти во всех погодных условиях.

Активное зондирование зависит от используемой технологии, а в случае микроволнового диапазона от регламента, регулирующего использование радиочастотного спектра. Радиолокатор использует микроволновый диапазон, в то время как лидар — оптические длины волн, где имеются соответствующие источники (кристаллы). В таблице 2.9 перечислены некоторые из широко используемых частот и длины волн лидаров. В порядке сравнения в таблице также приводятся частоты, используемые Глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС), и соответствующие средства радиозатменного зондирования атмосферы (см. 3.2.7, глава 3 настоящего тома).

Таблица 2.9. Использование спектра в активных приборах (радиолокаторы и лидары) и для радиозатменного зондирования

	<i>Наблюдения</i>	<i>Аппаратура</i>	<i>Частота или длина волны</i>
Радиолокатор	Ветер над поверхностью океана	Скаттерометр	С-диапазон (~5,3 ГГц) или K _u -диапазон (~13,4 ГГц)
	Топография океана	Альтиметр	С-диапазон (~5,3 ГГц) + K _u -диапазон (~13,6 ГГц)
	Облака и осадки	Радиолокатор осадков, радиолокатор обнаружения облачности	K _u -диапазон (~13,6 ГГц) и/или K _a -диапазон (~35,5 ГГц) или W-диапазон (~94 ГГц)
	Изображения	Радиолокатор с синтезированной апертурой	L-диапазон (~1,3 ГГц) или С-диапазон (~5,4 ГГц) или Х-диапазон (~9,6 ГГц)
Лидар	Ветер в безоблачной атмосфере	Доплеровский лидар	УФ-лидар (355 нм)
	Аэрозоль, верхняя граница облаков	Лидар обратного рассеяния	УФ-лидар (355 нм), ВБИК-лидар (532 + 1 064 нм)
	Топография ледяного щита	Альтиметр	ВБИК-лидар (532 + 1 064 нм)
Радиозатменное зондирование	Атмосферная рефракция	ГНСС + приемник на НОО	L-диапазон: ~1 580 + ~1 250 + ~1 180 ГГц (Глобальная система определения местоположения (ГСОМ), Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) и Galileo)

2.2.2 Основные законы взаимодействия электромагнитного излучения и вещества

Макроскопические свойства плотного тела, на которые не влияют химические или ядерные реакции, в отношении электромагнитного излучения при термодинамическом равновесии, выражаются тремя коэффициентами, связанными следующим уравнением:

$$\rho(\lambda, T, \zeta, \varphi) + \tau(\lambda, T, \zeta, \varphi) + \varepsilon(\lambda, T, \zeta, \varphi) = 1 \quad (2.6)$$

В этом уравнении $\rho(\lambda, T, \zeta, \varphi)$ — отражательная способность, т. е. отношение рассеянного обратного излучения $I(\lambda, T, \zeta, \varphi)$ к падающему излучению $I(\lambda)$; $\tau(\lambda, T, \zeta, \varphi)$ — пропускная способность, т. е. доля $I(\lambda)$, которая проходит через тело; $\varepsilon(\lambda, T, \zeta, \varphi)$ — доля $I(\lambda)$, которая поглощается телом, называется излучательной способностью в силу причин, которые будут объяснены ниже. Эти три коэффициента зависят от длины волны излучения λ , температуры тела T и геометрии наблюдения ζ, φ (зенитного и азимутального углов соответственно).

Тело, которое не отражает и является полностью непрозрачным для излучения на любой длине волны (где $\rho = \tau = 0$, и следовательно $\varepsilon = 1$), называется черным телом. Оно излучает при любой температуре T и во всем диапазоне λ или ν согласно закону Планка:

$$B(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{или} \quad B(\nu, T) = \frac{2\pi \nu^3}{c^2} \frac{h}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.7)$$

где:

$h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (постоянная Планка);

$c = 2,99793 \cdot 10^8$ м·с⁻¹ (скорость света в вакууме);

$k = 1,38044 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ (постоянная Больцмана).

$B(\lambda, T)$ (или $B(\nu, T)$) — энергия излучения с единичной поверхности по полусфере на единицу длины волны (или частота). Мощность излучения на единицу телесного угла составляет B/π . Функция Планка для температур 6 000 К и 273,16 К, которые являются характерными для поверхностей Солнца и Земли соответственно, представлена на рисунке 2.14.

Энергия, излучаемая в полном спектре, записывается как:

$$W(T) = \int_0^\infty B(\lambda, T) \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad \text{Закон Стефана-Больцмана} \quad (2.8)$$

где $\sigma = 5,6681 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴.

Две кривые на рисунке 2.14 показывают, что поверхности Солнца и Земли имеют очень разную энергию излучения. Однако после корректировки кривой Солнца на квадрат расстояния между Солнцем и Землей две интегральные площади становятся сопоставимыми, что отражает радиационный баланс Земли. Если масштабировать верхнюю кривую на рисунке, то можно легко увидеть, что солнечная радиация на Земле очень мала для $\lambda > 4$ мкм, в то время как излучение Земли на самом деле ничтожно для $\lambda < 3$ мкм. Излучение и Солнца, и Земли присутствует в существенных количествах в узком диапазоне между 3 и 4 мкм.

Основное различие между двумя кривыми, представленными на рисунке 2.14, после масштабирования заключается в длине волны $\lambda_{\max}$, где наблюдается максимум излучения. Ее можно представить в виде формулы:

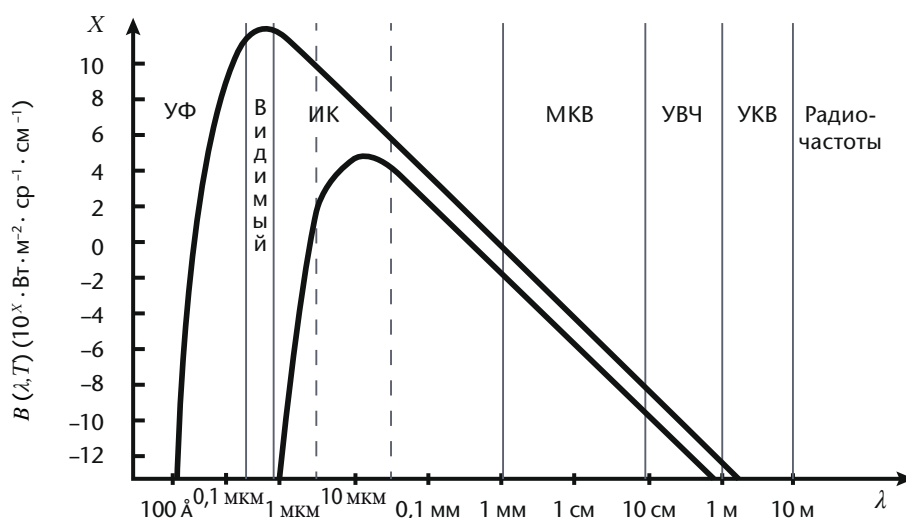


Рисунок 2.14. Функция Планка для $T = 6\,000$ К, которая является репрезентативной для Солнца (верхняя кривая), и $T = 273,16$ К, характерная для Земли (нижняя кривая); X — значения по оси ординат являются степенью 10.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad \text{при } b = 0,0028981 < \text{К} \quad \text{Закон Вина} \quad (2.9)$$

Из-за логарифмического масштаба по обеим осям из рисунка 2.14 трудно оценить, насколько крутой является функция Планка в окрестностях $\lambda_{\max}$. В случае солнечной радиации ($T = 6\,000\text{ К}$) максимум излучения находится в районе $\lambda_{\max} = 0,5\text{ мкм}$, и большая часть энергии лежит в диапазоне $0,2\text{--}3,0\text{ мкм}$. В случае земной радиации ($T = 273,16\text{ К}$, т.е. $T = 0^\circ\text{C}$) максимум находится в районе $\lambda_{\max} = 10\text{ мкм}$ и большая часть энергии лежит в диапазоне $3\text{--}50\text{ мкм}$.

Другой интересной особенностью функции Планка является то, что, перемещаясь от $\lambda_{\max}$ к более коротким длинам волн, энергия излучения резко уменьшается, в то время как в сторону более длинных волн уменьшение происходит более постепенно (примерно $2/3$ энергии приходится на длины волн больше $\lambda_{\max}$). Для очень длинных длин волн или коротких частот, например, в микроволновом диапазоне, где экспоненциальный аргумент в функции Планка $h\nu/kT \ll 1$, условием является $e^{h\nu/kT} \approx 1 + h\nu/kT$, и таким образом функция Планка сводится к виду:

$$B(\nu, T) = \frac{2\pi k \nu^2}{c^2} T \quad \text{Закон Рэлея-Джинса} \quad (2.10)$$

В силу этого соотношения измерения излучения в МКВ-диапазоне можно считать измерениями температуры и записывать через яркостную температуру (T_b) в единицах температуры. Если общая энергия излучения изменяется с температурой пропорционально T^4 по закону Стефана-Больцмана (уравнение 2.8), то в микроволновой части спектра она меняется линейно. Напротив, в сторону более коротких длин волн наблюдается растущая зависимость функции Планка от температуры. Приземная радиация изменяется приблизительно как T^5 в главном окне прозрачности ТИК-диапазона около 11 мкм и как T^{12} в окне около $3,7\text{ мкм}$. Это интересная особенность для дистанционного зондирования, поскольку она означает, что чувствительность к высоким температурам выше на $3,7\text{ мкм}$. С другой стороны, такие короткие длины волн менее чувствительны к низким температурам.

Например:

- для тела при 220 К (например, верхняя граница облаков в верхней тропосфере) излучение на 11 мкм в ~ 1200 раз больше, чем на $3,7\text{ мкм}$, однако при 300 К (на поверхности) оно больше примерно всего лишь в 130 раз;
- чувствительность к температуре изменяется, (т. е. $(\partial B/\partial T)/B$) в три раза выше на $3,7\text{ мкм}$, чем на 11 мкм .

Следовательно, длина волны $3,7\text{ мкм}$ хорошо подходит для наблюдений подстилающей поверхности, оптимальна для обнаружения пожара и менее пригодна для высоких облаков.

Зависимости, представленные уравнениями 2.7–2.10, справедливы только для черного тела ($\varepsilon = 1$). Для обычного тела зависимость можно установить на основе следующего концептуального эксперимента. Рассматривая ряд тел в изолированной системе и только обмен излучением между ними, можно допустить, что после переходного периода каждое из них достигнет термодинамического равновесия, при котором излучение, которое оно поглощает в соответствии с коэффициентом поглощения $\varepsilon(\lambda, T)$, равно энергии, которую оно излучает $P(\lambda, T)$. Отсюда $P(\lambda, T)/\varepsilon(\lambda, T) = \text{константа}$. В предположении, что одно из тел является абсолютно черным телом, получаем:

$$P(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot B(\lambda, T) \quad \text{Закон Кирхгофа} \quad (2.11)$$

Это уравнение говорит о том, что коэффициент поглощения, введенный в уравнение (2.5), также определяет свойства излучения, и поэтому называется излучательной способностью. Из уравнения 2.11 вытекают два важных следствия:

- на любой длине волны и при любой температуре, тело не может излучать энергии больше, чем черное тело на данной длине волны и при данной температуре;

- б) тело может излучать энергию только на тех длинах волн, на которых оно может поглощать.

Излучательная способность ε зависит от длины волны и в меньшей степени от температуры. Для некоторых тел ε может быть постоянной для многих частей спектра. Если она постоянна по всему спектру, то тело называют серым. Форма кривой энергии излучения $P(\lambda, T)$ тогда будет точно такой же как $B(\lambda, T)$, только ослабленной за счет коэффициента ε . В таком случае закон Вина (уравнение 2.9) остается неизменным. А закон Стефана-Больцмана принимает вид $W(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$.

Закон Кирхгофа применим и к газообразным средам. Поэтому спектральные линии атмосферных газов обычно (но не всегда) относятся как к поглощению, так и к излучению.

2.2.3 Наблюдения в окнах прозрачности атмосферы

2.2.3.1 Уходящее излучение

Атмосферные окна прозрачности — это спектральные области, в которых атмосфера практически прозрачна. Не существует такой области, в которой атмосфера полностью прозрачна. Во всех спектральных областях имеется некоторое остаточное возмущение, вызванное компонентами, имеющими континуум; чаще всего это водяной пар в ИК-, МКВ- и в некоторой степени в КВ-диапазонах. Другим фактором, в частности, в коротковолновом диапазоне, является рассеяние на молекулах сухого воздуха (в основном N_2 и O_2) и аэрозолях. Прежде всего, наиболее прозрачными окнами являются:

- а) в КВ-диапазоне (рисунок 2.11): 0,5–0,9 мкм, 1,6–1,7 мкм и 2,0–2,3 мкм;
- б) в ИК-диапазоне (рисунок 2.12): 3,5–4,0 мкм и 10–12 мкм;
- с) в МКВ-диапазоне (рисунок 2.13): 80–100 ГГц, 25–50 ГГц и ниже 20 ГГц.

Из уравнения 2.5 следует, что коэффициенты ρ (отражательная способность), τ (пропускная способность) и ε (излучательная способность) зависят не только от длины волны излучения λ и температуры тела T , но также и от условий геометрии (зенитный угол ζ и азимутальный угол φ) спутниковой платформы относительно рассматриваемого тела.

Для упрощения рассмотрения предполагаются следующие условия: вертикальный сектор обзора со спутника (рисунок 2.15), плоские поверхности и излучение в направлении зенита (свечение).

Один член $\tau(\lambda, T) \cdot I_r(\lambda)$ представляет собой излучение, прошедшее через тело. Оно может быть обнаружено в случаях, когда тело не является полностью непрозрачным и существует источник излучения ниже тела в противоположной полусфере по отношению к спутнику.

Член $\varepsilon(\lambda, T) \cdot B(\lambda, T)$ — испускаемое излучение, выраженное через закон Кирхгофа (уравнение 2.11). Оно всегда присутствует, если тело не находится при абсолютном тепловом нуле. Его не будет в спектральных областях, где тело не поглощает.

Член $\rho(\lambda, T) \cdot I_p(\lambda, \theta)$ является отраженным излучением. Оно обнаруживается в случаях, когда есть источник излучения в той же полусфере, что и спутник. На рисунке 2.15 показано Солнце, однако в микроволновом диапазоне, где солнечная радиация практически равна нулю, весь небесный свод полусферы испускает излучение как черное тело при температуре $T = 2,725$ К, где максимальная энергия наблюдается на $\lambda_{\max} = 1,9$ мм (160 ГГц). Обозначение $I_p(\lambda, \theta)$ указывает на то, что энергия приходящей радиации зависит от угла падения θ . Обычно для Солнца $I_p(\lambda, \theta) = S(\lambda) \cdot \cos \zeta$, где $S(\lambda)$ служит обозначением приходящей энергии, когда Солнце в зените.

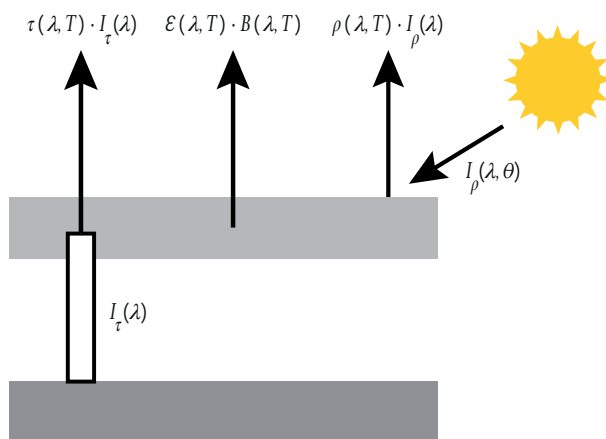


Рисунок 2.15. Три компонента излучения в космос

С учетом всех компонентов радиация, достигающая бортовой аппаратуры спутника, может быть выражена в виде:

$$I(\lambda, T) = \tau(\lambda, T) \cdot I_\tau(\lambda) + \varepsilon(\lambda, T) \cdot B(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) \cdot I_\rho(\lambda, \theta) \quad (2.12)$$

Эта величина сильно колеблется по спектру, так что значимость измерений является разумно устойчивой только в узких полосах пропускания в окрестностях определённых длин волн (каналов). Однако некоторая более общая информация заключена и в более широком диапазоне длин волн (ВИД + БИК + КВИК; СВИК + ТИК; МКВ).

2.2.3.2 Измерения в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах

В этом диапазоне не существует теплового излучения Земли ($B = 0$). Фокусируясь сначала на поверхности Земли (суше и океане), прошедшее излучение будет равно нулю, поскольку ниже уровня поверхности Земли источника не существует. Учитывая также, что отражательная способность почти не зависит от температуры тела, уравнение 2.12 может быть записано в виде:

$$I_{sw}(\lambda) = \rho(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \cos \zeta \quad (2.13)$$

Поскольку солнечный спектр и геометрия наблюдения известны, информация, полученная в результате измерения в КВ-канале, однозначно связана с отражательной способностью поверхности. Многие геофизические переменные (параметры растительного покрова, цветность океана, текстура суши и т. д.) могут быть оценены путем измерения отражательной способности на нескольких длинах волн. Однако, облака являются наиболее очевидными объектами, наблюдаемыми в КВ-диапазоне. Уравнение 2.13 в строгом смысле слова не является корректным для поверхности облачности, поскольку излучение с подстилающей поверхности может проходить сквозь облака. Однако этот эффект имеет ограниченное воздействие, если имеется:

- общая пропускная способность (нисходящая и восходящая) через атмосферу;
- низкая облачность;
- исходный источник излучения (Солнце) сильнее, чем любая поверхность ниже облачности;
- отражательная способность подстилающей поверхности является низкой (за исключением песчаной пустыни, снега и льда);

- е) отражательная способность облаков ρ обычно выше, чем у любой другой земной поверхности.

Отсюда вытекает, что уравнение 2.13 является приближением, которое применимо к большинству облаков, за исключением тонких облаков, таких как перистые облака, особенно на ярком фоне песчаных пустынь, снега и льда.

Использование отраженного излучения КВ-диапазона для количественных оценок является непростой задачей, поскольку отражательная способность в общем является анизотропичной. Самый простой случай — когда тело, каким бы ни было направление приходящей радиации, перераспределяет отраженную радиацию согласно закону косинусов от зенита равномерно для любого азимута. Это называется ламбертовым отражением. К счастью, большая часть участков земных поверхностей, наблюдаемых из космоса в относительно больших масштабах, представляются достаточными плоскими и шероховатыми, так что ламбертова диффузия может быть достаточно хорошим приближением. Однако, во многих случаях, тело характеризуется двунаправленной функцией распределения отражения, которую необходимо измерять априори путем наблюдений при различных направлениях визирования и приходящей радиации. Окончательные вычисления излучения в направлении космоса требуют интегрирования по полусфере.

Использование КВ-диапазона для наблюдений за Землей в атмосферных окнах требует спектральной дискретизации на нескольких длинах волн (каналах), поскольку на любой одной длине волны сигнатуру могут иметь сразу несколько тел, а одно тело может иметь сигнатуру на нескольких длинах волн. Поэтому необходимы многоканальные устройства для распознавания и одновременного определения свойств различных тел. Например, облака и снег имеют одинаковую отражательную способность в видимом диапазоне на 0,65 мкм, но очень разную отражательную способность на 1,6 мкм. Кроме того, ширина полос пропускания канала должна соответствовать поставленной задаче. Наиболее строгой ширина полос пропускания будет для цветности океана ($\Delta\lambda \approx 10$ нм), затем для растительности ($\Delta\lambda \approx 20$ нм), в то время как для других элементов поверхности и для облаков ширина полос пропускания в несколько десятков нанометров будет достаточной.

Другим явлением, которое влияет на использование ВИД + БИК + КВИК-диапазонов для количественных оценок является поляризация: зеркальное отражение стремится к приоритету при ослаблении вертикального компонента электрического поля. Вектор Стокса, который в коротковолновом диапазоне состоит из трех членов (поляризация в трех направлениях со смещением по фазе на 120°), полностью описывает электрическое поле и предоставляет основную информацию о свойствах тела. Мультиполяризация имеет важное значение для наблюдения за теми телами, которые не имеют сильных многоспектральных сигнатур. Типичными примерами в этом отношении являются аэрозоли и перистые облака (продолговатые ледяные кристаллы).

2.2.3.3 **Измерения в средневолновом инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах**

В диапазоне 4–15 мкм солнечная радиация практически равна нулю. На поверхности Земли (суше и океане) прошедшая радиация также равна нулю. Более того, принимая во внимание, что излучательная способность почти не зависит от температуры тела, уравнение 2.12 сводится к следующему виду:

$$I_{\text{IR}}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \cdot B(\lambda, T) \quad (2.14)$$

Уравнение 2.14 также приблизительно справедливо и для облаков, поскольку пропускная способность облаков в ИК-диапазоне достаточно низкая (за исключением тонких перистых облаков).

Большинство поверхностей суши, и определенно океана, имеют коэффициент излучения, близкий к единице с небольшими вариациями. Поэтому информация, получаемая путем измерения в ИК-канале, тесно связана с функцией Планка (уравнение 2.7) или, для данной длины волны, с температурой тела.

При заданной длине волны λ или для узкого канала $\Delta\lambda$ около λ , функцию Планка, уравнение 2.7, можно легко преобразовать для нахождения температуры T :

$$T(\lambda) = \frac{hc}{\lambda k \ln \left[1 + \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 B(\lambda)} \right]} \quad (2.15)$$

Однако T не будет истинной температурой тела, за исключением тех случаев, когда $\varepsilon = 1$. Если излучательная способность тела известна и ширина полосы пропускания канала $\Delta\lambda$ является достаточно узкой, чтобы считать ε константой, то к измеренной величине может быть применена поправка на излучательную способность (путем преобразования $B(\lambda, T) = I_{\text{IR}}(\lambda, T)/\varepsilon(\lambda)$) и на измеренную температуру тела. Либо, преобразуя измеренную величину $B(\lambda, T) = I_{\text{IR}}(\lambda, T)$, получается температура $T_{\text{BB}'}$ (эквивалент температуре черного тела), которая ниже истинной температуры тела.

Для целого ряда различных тел, имеющих ε близкую к 1, наблюдение за излучением в ТИК-атмосферном окне позволяет проводить достаточно точное измерение температуры. Оно будет особенно точным для поверхности океана, которая имеет излучательную способность близкую к 0,98. Однако, излучательная способность является не единственным фактором, который необходимо корректировать. Как говорилось ранее, атмосферные окна не являются абсолютно прозрачными. Например, основное окно в ТИК-диапазоне 10–12 мкм, загрязняется континуумом водяного пара, особенно в длинноволновой области спектра. Для уменьшения такого возмущения окно разделяют на два канала, обычно 10,3–11,3 и 11,5–12,5 мкм. Дифференциальная абсорбция затем используется для оценки поправки (общее содержание водяного пара в столбе может быть также определено как побочный результат).

Как результат описанных эффектов, уравнение 2.15 указывает на зависимость температуры от длины волны (хотя, поскольку существует всего одна температура тела, такой зависимости не должно существовать). Разброс значений с длиной волны подразумевает, каким образом определённая информация может быть объяснена. Например, сравнивая $T_{\text{BB}'}$ измеренную на длине волны 3,7 мкм и 11 мкм, наблюдаемую разницу можно объяснить различной величиной излучательной способности или через призму отдельных искажений измерений от облаков.

Необходимо иметь в виду, что окно прозрачности 3,7 мкм ведет себя очень по-разному в дневное и ночное время суток. В дневное время оно подвержено сильным помехам со стороны отраженной солнечной радиации, которую необходимо вычитать до использования канала для количественных оценок теплового излучения. Как упоминалось ранее, окно 3,7 мкм является более чувствительным к высоким температурам, чем окно 11 мкм. В то же время окно 3,7 мкм мало пригодно для низких температур, таких как температуры верхней границы облаков в верхней тропосфере. Различная реакция на температуры в окнах 3,7 и 11 мкм может также использоваться для обнаружения тумана в ночных условиях.

Что касается облаков, то уравнение 2.14 до сих пор практически справедливо. Однако, за исключением очень мощных облаков (кучевые, слоисто-дождевые), излучательная способность существенно меньше единицы. Эквивалентная температура черного тела является существенно ниже истинной температуры, и необходимо применять поправку для учета низкой излучательной способности. Обычный метод заключается в объединении канала окна с каналом, который имеет высокую чувствительность к водяному пару. Разница между двумя значениями $T_{\text{BB}'}$ соответствует излучательной способности облака: чем больше разница, тем ниже излучательная способность.

Степень проникновения инфракрасного излучения в облака является очень низкой. Измеренная температура относится к поверхности верхней границы облаков, а

информация о внутреннем строении облаков недостаточна, особенно для плотных облаков. Тем не менее, температура верхней границы облаков, которая находится в равновесии с температурой воздуха на том же уровне, является важным параметром, поскольку она определяет высоту облака в тропосфере, а, следовательно, и тип облака.

Информация о верхней границе облака, полученная по температуре черного тела, часто бывает неточной. При тонкой облачности, такой как тонкие перистые облака, фоновая температура поверхности гораздо выше температуры воздуха на уровне облака. Как следствие, излучение поверхности, проходящее сквозь облака, повышает величину излучения облака, температура облака оказывается выше, и, таким образом, заданный уровень оказывается заниженным. И наоборот, мощные перистые облака с высокой излучательной способностью воспринимаются в наблюдениях как очень холодные и могут быть перепутаны с кучево-дождевыми облаками.

Во избежание неоднозначности желательно представить яркость в видимой области спектра и температуру в ИК-области в виде двумерных гистограмм (рисунок 2.16). При использовании только одной полосы пропускания (проекция двумерного изображения на одну ось) некоторые кластеры могут оказаться неразрешенными. В то же время данный пример показывает, что можно идентифицировать 10 различных объектов при многополосном анализе. Этот пример является простым примером использования ранее эксплуатируемого инструмента (радиометра с очень высоким разрешением (VHRR)) и всего лишь двух каналов в ВИД- и ИК-областях спектра. Применяемые сегодня методы многополосного анализа позволяют работать с гораздо большим числом каналов.

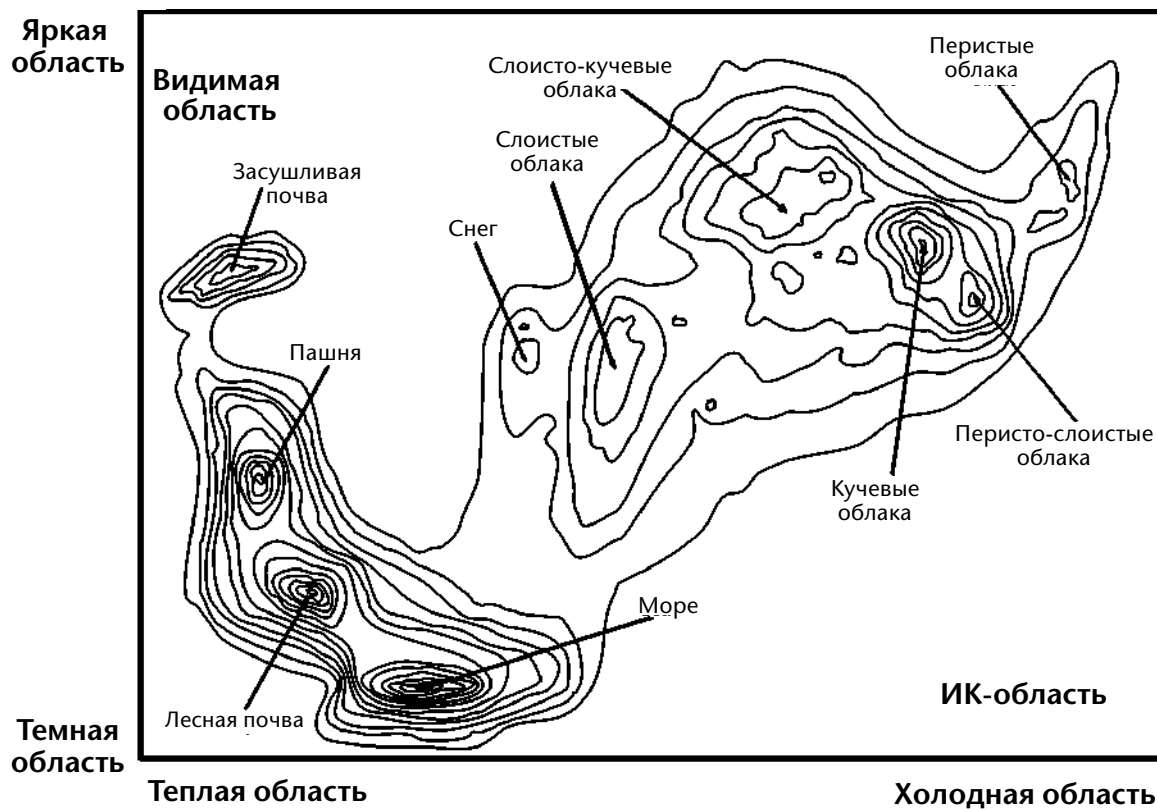


Рисунок 2.16. Диаграмма рассеяния в видимой области (0,65 мкм) по сравнению с ИК-областью (11,5 мкм), позволяющая классифицировать 10 тел. При проекции на одну из двух осей некоторые кластеры будут неразрешенными.

Источник: Bizzarri and Tomassini (1976).

2.2.3.4 Измерения в микроволновом диапазоне

В микроволновом диапазоне солнечная радиация практически равна нулю, однако существует источник приходящей рассеянной радиации: небесная сфера. Если говорить о поверхности Земли, включая сушу и море, то величина проходящего излучения равна нулю. Существует только два компонента: тепловое излучение и отраженное излучение. Они определяются коэффициентами излучательной и отражательной способностей, которые в силу $\tau = 0$ связаны условием $\varepsilon + \rho = 1$ (т. е. $\rho = 1 - \varepsilon$). Представляя энергию излучения через единицы температуры согласно уравнению Рэлея-Джинса (2.10), наблюдаемая яркостная температур T_B может быть получена:

$$T_B(\nu) = \varepsilon(\nu) \cdot T + [1 - \varepsilon(\nu)] \cdot T_{\text{sky}}(\nu) \quad (2.16)$$

$T_{\text{sky}}(\nu)$, яркостная температура неба, состоит из фонового компонента космического излучения и излучения от облаков, дающих осадки; эта величина меняется с частотой. В главном окне и при наличии облаков, не дающих осадки, где $\nu \sim 40$ ГГц, $T_{\text{sky}}(\nu)$ может быть равной ~ 140 К. В условиях интенсивных осадков T_{sky} может достигать таких высоких значений как ~ 250 К.

Влияние $T_{\text{sky}}(\nu)$ сильно зависит от значения излучательной способности ε . Для моря и суши значения величины ε существенно отличаются.

Излучательная способность моря в микроволновой области является очень низкой: $\varepsilon \approx 0,5$. Как следствие, два члена в уравнении 2.16 имеют одинаковый вес. В отсутствие облаков, дающих осадки, величина T_{sky} является низкой и известна: измерения поэтому можно связать с температурой поверхности моря. Оптимальная частота для температуры поверхности моря составляет около 5 ГГц (см. рисунок 2.17), когда T_{sky} гораздо ниже, чем при 40 ГГц. Такое измерение является достаточно точным и применимо во всех погодных условиях, поскольку длина волны ($\lambda = 6$ см) гораздо больше, чем у любой дождевой капли. Интенсивность излучения поверхности моря на частоте 5 ГГц является репрезентативной для температуры водного слоя толщиной несколько миллиметров (подповерхностного слоя) по сравнению с десятками микрометров в случае ИК-излучения (температура поверхностного слоя). При более высоких частотах T_{sky} существенно увеличивается, особенно при наличии сильных осадков. Высокая отражательная способность ($1 - \varepsilon$) такова, что наблюдениями можно получить, главным образом, представление об осадках.

Над поверхностью суши излучательная способность близка к единице. Второй член в уравнении 2.16 в этой связи не имеет силы, и обнаружение осадков затруднительно. При более высоких частотах (~ 90 ГГц ($\lambda = 3$ мм)) уходящее излучение с поверхности рассеивается большими каплями и еще в большей степени ледяными кристаллами в облаках. Таким образом, излучение, достигающее спутника, уменьшается.

Поляризация тоже может быть использована для измерения осадков. Излучение, отраженное от поверхности моря, сильно поляризовано: при прохождении облаков, дающих осадки, оно подвергается деполяризации, которую можно измерить и таким образом определить осадки. Дифференцированная поляризация может использоваться и над поверхностью суши, поскольку исходящее излучение, рассеянное от капель и ледяных кристаллов, поляризуется.

Наблюдения при нескольких различных поляризациях могут быть полезными независимо от цели измерения осадков. Дифференцированная поляризация чувствительна к шероховатости поверхности — эффекту, который необходимо учитывать в измерениях температуры поверхности моря. Этот эффект можно также использовать для определения скорости ветра над океаном, как показано на рисунке 2.17.

На рисунке 2.17 также показано, что излучение в микроволновом диапазоне чувствительно к солености океана, но только на очень малых частотах, обычно около 1,4 ГГц (L-диапазон). Из рисунка также видно, что для измерения солености океана необходимо оценить температуру поверхности океана и скорость ветра (или шероховатость). Аналогично солености, существует полоса поглощения водяного пара, которая вносит погрешность в результаты наблюдений за температурой, ветром и жидкокапельными облаками

(осадками). Эта полоса может быть также использована для определения общего содержания водяного пара в столбе (водяного пара, который может выпасть в виде осадков) над океаном. Другими словами, в микроволновом диапазоне, как и в оптическом поле, различные переменные могут иметь различные сигнатуры в различных каналах и вследствие этого необходим многоканальный анализ.

Из-за совершенно различных значений излучательной способности поверхностей океана и суши, наиболее очевидным элементом на изображениях микроволнового диапазона является граница суши/моря. Поскольку излучательная способность льда близка к единице, морской лед также является очевидным объектом, поддающимся наблюдению во всех погодных условиях. Изображения микроволнового диапазона особенно полезны для географических районов с частой сплошной облачностью. Над сушей, в условиях с излучательной способностью близкой к единице, уменьшение излучательной способности указывает на присутствие воды на поверхности. Это связано с тем, что излучательная способность тела контролируется его диэлектрической постоянной: вода на суше является соляным раствором, что увеличивает проводимость и соответственно уменьшает излучательную способность. Этот эффект может быть использован для измерения влажности почвы и свойств снежного покрова.

Измерения влажности почвы могут быть достаточно точными на обнаженной почве, однако с увеличением растительного покрова степень их точности может понижаться. Для того, чтобы пройти через растительность и измерить влажность почвы на корневом уровне, необходимо использовать очень низкие частоты, в L-диапазоне или даже ниже — в P-диапазоне. На более высоких частотах (выше 10 ГГц) чувствительность к влажности почвы будет значительной только в том случае, если учитываются искажения, вносимые растительным покровом.

К двум характерным свойствам снега, которые поддаются обнаружению в микроволновом диапазоне, относятся условия поверхностного таяния, а при неглубоком снежном покрове — водяной эквивалент. В последнем случае предпочтительнее использовать относительно высокие частоты, поскольку снег обычно прозрачен на низких частотах, а на очень высоких частотах сигнал насыщается в верхних слоях снежного покрова. Поэтому необходимы несколько частот с разной глубиной проникновения.

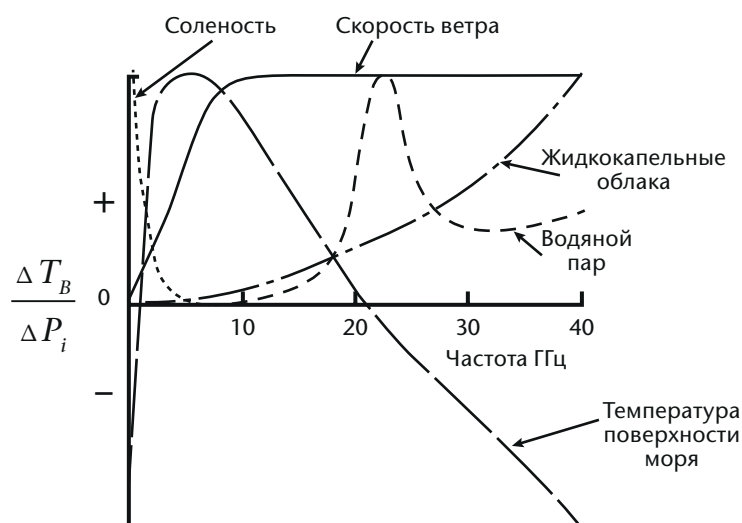


Рисунок 2.17. Чувствительность (определяемая как $\Delta T_B/\Delta P_i$) МКВ-частот к некоторым геофизическим переменным (P)

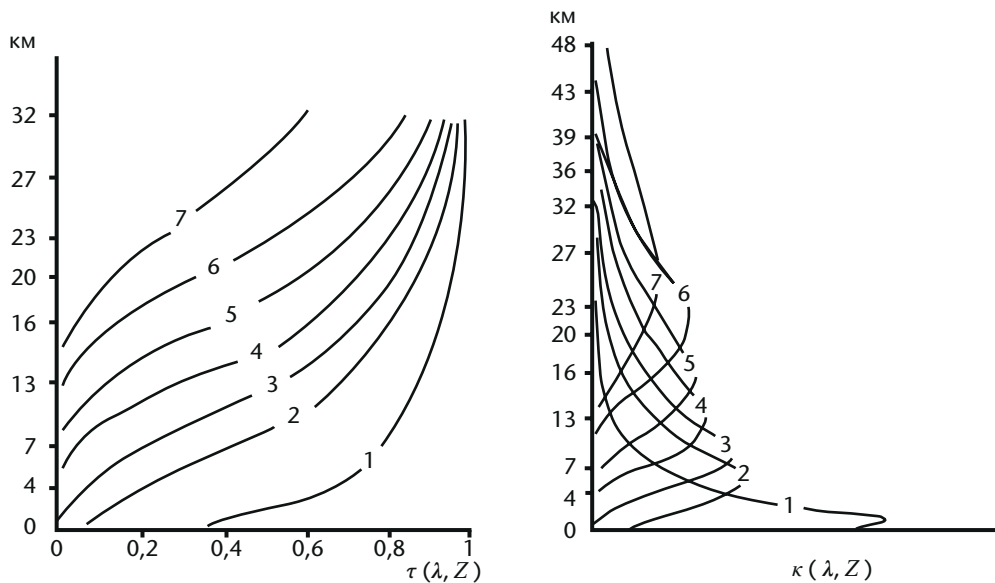


Рисунок 2.18. Коэффициент пропускания (слева) и соответствующие весовые функции (справа) для семи каналов в полосе CO_2 14 мкм

2.2.4 Наблюдения в полосах поглощения

2.2.4.1 Уравнение переноса излучения

В полосе атмосферного поглощения каждый слой толщиной dz поглощает излучение, поступающее снизу, и переизлучает его. В предположении нулевой отражающей способности атмосферы в ИК-диапазоне, атмосферное пропускание с высоты z до высоты спутника H можно записать в виде:

$$\tau(\lambda, z) = e^{-\int_z^H \varepsilon(\lambda, z) \cdot N(z) \cdot dz} \quad (2.17)$$

где $N(z)$ — концентрация поглощающего газа.

Вклад излучения атмосферного слоя толщиной dz на высоте z , связанный с изменением пропускания $d\tau(I, z)$, составляет $dI(\lambda, z) = B[\lambda, T(z)] \cdot d\tau(\lambda, z)$.

Излучение от всего атмосферного столба по направлению к спутнику можно представить в виде:

$$I(\lambda) = \int_{\tau(\lambda, z_s)}^1 B[\lambda, T(z)] \cdot d\tau(\lambda, z) \quad (2.18)$$

где z_s — высота поверхности Земли.

Необходимо добавить вклад излучения от земной поверхности, ослабляемого при общем прохождении излучения через атмосферу. Кроме того, может быть также определена весовая функция:

$$K(\lambda, z) = \frac{d\tau(\lambda, z)}{dz} \quad (2.19)$$

Комбинированное излучение, достигающее спутника, записывается уравнением переноса излучения:

$$I(\lambda) = B(\lambda, T_s) \cdot \tau(\lambda, z_s) + \int_{z_s}^H B[\lambda, T(z)] \cdot K(\lambda, z) \cdot dz \quad (2.20)$$

Из рисунка 2.18 видно, что пропускание (уравнение 2.17) стремится к единице с увеличением высоты z (т. е. с уменьшением толщины атмосферного слоя с высоты z до

высоты спутника H). Это сопровождается уменьшением излучательной способности ϵ и уменьшением концентрации N поглощающего газа. Весовые функции имеют максимальные пиковые значения, соответствующие точке перегиба функции коэффициента пропускания. Простой смысл уравнения 2.20 заключается в том, что каждый атмосферный слой толщиной dz вносит вклад в излучение, достигающее спутника, в соответствии с его температурой (по функции Планка) и также его способностью вносить такой вклад, что количественно оценивается весовой функцией. Весовая функция зависит от концентрации поглощающего газа и величины силы поглощения/излучения (ϵ). Она имеет такую форму, что нижние слои атмосферы находятся в невыгодном положении из-за поглощения верхними слоями, а верхние слои находятся в невыгодном положении из-за низкой концентрации поглощающего газа. Атмосферный слой, который демонстрирует самые большие изменения в пропускании, обычно является слоем, который вносит наибольший вклад.

2.2.4.2 **Восстановление профиля**

Инвертирование уравнения 2.20 является нетривиальной задачей. Это уравнение Фредгольма второго рода, для которого существование или единственность решения не гарантируются математически. В нашем случае существование решения гарантируется самой природой. Для обеспечения единственности решения необходимо добавить ограничения для решения, поскольку задача является плохо обусловленной. За всю историю зондирования профиля излучения из космоса были разработаны различные методы, некоторые из них статистические и линейные, другие физические и нелинейные, а третьи — сочетание тех и других подходов.

Основная задача — инвертировать уравнение 2.20 с целью получения температурного профиля атмосферы. Это возможно только, если функция пропускания известна заранее, что предполагает измерения в полосах поглощения газа с известным и устойчивым профилем концентрации. В ИК-диапазоне CO_2 имеет такой профиль в полосах около 4,3 и 15 мкм (см. рисунок 2.12). Как было отмечено ранее, полоса 4,3 мкм более чувствительна к высокой температуре, являясь репрезентативной для нижней тропосферы. Однако в этой полосе может происходить искажение излучением от других компонентов атмосферы, а в дневное время нельзя не учитывать хвост кривой солнечного черного тела (> 4 мкм). Полоса 15 мкм является спектрально более чистой, но в то же время в некоторой степени она загрязняется континуумом водяного пара. Коэффициенты пропускания по этой причине нуждаются в корректировке, или априори путем использования внешней информации, либо апостериори путем выполнения итераций после восстановления профиля водяного пара.

Восстановление профиля водяного пара является следующим шагом. После того, как получен профиль температуры в каналах полосы поглощения CO_2 , используются другие каналы в полосах поглощения H_2O . Основная полоса, центр которой располагается около длины волны 6,3 мкм, хорошо реагирует на высокую температуру, т. е. в нижней и средней тропосфере. Для мониторинга климата важно измерять водяной пар в верхней тропосфере. Однако это требует использования полосы 18 мкм, что технологически затруднительно из-за отсутствия эффективных детекторов в ДИК-диапазоне.

Получение профиля водяного пара, или в более общем случае концентрации поглощающего газа, является отнюдь не простой задачей. Весовые функции поглощающего газа имеют максимум на различных высотах в атмосфере в зависимости от концентрации и частоты дистанционного зондирования. Более того, это восстановление некорректно по своей природе, поскольку функция коэффициента пропускания, которую нужно инвертировать (уравнение 2.17), определяет содержание в тонком слое на высоте z как разницу между соответствующим содержанием двух очень толстых слоев: от H до z и от H до $(z - \Delta z)$. Точнее сказать, небольшая величина выводится путем вычисления разницы между двумя большими величинами.

Дополнительные трудности возникают в случаях, когда присутствует облачность. Если мгновенное поле зрения (IFOV) полностью закрыто облаком с одинаковыми параметрами,

профиль по-прежнему можно получить тем же самым методом, хотя он будет ограничен атмосферой над облаком. Если IFOV лишь частично закрыто частью η облака с излучающей способностью облака $\varepsilon_{\text{cloud}}$, то уравнение переноса примет вид:

$$I(\lambda) = (1 - \varepsilon_{\text{cloud}} \cdot \eta) I_{\text{clear}}(\lambda) + \varepsilon_{\text{cloud}} \cdot \eta \cdot I_{\text{cloud}}(\lambda) \quad (2.21)$$

где $\varepsilon_{\text{cloud}} \cdot \eta$ — эффективное покрытие.

Существует несколько способов для разрешения проблем, связанных с влиянием облаков. Один из методов основан на том, что в начале процедуры восстановления используют каналы с весовыми функциями, максимальные значения которых лежат выше верхней границы облаков, и таким образом получают профиль в начальном приближении. После чего выполняя итерации, меняют величины эффективного покрытия до тех пор, пока измерения во всех других каналах не будут давать наилучшего согласия. Другой метод предусматривает сравнение нескольких близкорасположенных IFOV при допущении, что сигналы различаются только из-за различных относительных величин покрытий η , а затем проводят экстраполяцию на нулевой η .

В любом случае считается, что когда облачность в IFOV превышает примерно 20 %, то не следует предпринимать попыток получать профили в ИК-диапазоне. К счастью, в наши дни IFOV зондирующей аппаратуры сократилось от нескольких десятков километров до порядка 10 км и, следовательно, вероятность обнаружения значительного числа мгновенных полей обзора без облаков в данной области стала гораздо выше.

Проблема облаков значительно облегчается в микроволновом диапазоне, где зондирование возможно при всех погодных условиях за исключением сильного дождя. Для получения профиля температуры используются компоненты атмосферы с хорошо известной и постоянной концентрацией, такие как O_2 с полосами поглощения в диапазоне 50–70 ГГц и около 118 ГГц (пока еще не использовали со спутника). Для водяного пара успешно используется полоса 183 ГГц. Полоса 22 ГГц позволяет получить слабый сигнал, который может дать общую интегрированную по столбу величину над морем. Существуют и другие полосы поглощения для температуры и водяного пара на более высоких частотах, однако радиационное воздействие континуума водяного пара не позволяет проводить наблюдения в тропосфере с использованием этих спектральных полос.

Уравнение переноса в микроволновом диапазоне по сути является более простым вариантом уравнения ИК-диапазона (2.20): вместо функции Планка (уравнение 2.7) можно использовать аппроксимацию Рэля-Джинса с линейной зависимостью по температуре (уравнение 2.10).

Можно задать вопрос, почему МКВ-диапазон не является исключительной полосой для зондирования температуры и влажности, коль скоро зондирование может проводится почти во всепогодных условиях. Причина состоит в том, что вертикальное разрешение требует высокой чувствительности к колебаниям температуры (с высотой). Вертикальное разрешение самое лучшее в полосе 4,3 мкм, где функция Планка изменяется примерно относительно T^{12} . В полосе 15 мкм чувствительность ниже потому, что функция Планка колеблется относительно T^5 . В микроволновом диапазоне, поскольку B есть линейная функция от T (см. уравнение 2.10), чувствительность $(\partial B / \partial T) / B$ колеблется относительно T^{-1} , (она уменьшается с увеличением температуры). Примечательной особенностью различных полос является то, что если полоса 4,3 мкм хорошо подходит для нижней тропосферы, а полоса 15 мкм хорошо подходит для средней и верхней тропосферы, то микроволновая полоса на частоте 57 ГГц хорошо подходит для стратосферы.

Вертикальное разрешение имеет принципиальное значение для зондирования температуры и влажности. На рисунке 2.18 показан пример, в котором весовые функции достаточно широкие. Это подразумевает, что степени свободы (количество независимых частей информации) характеризуются ограниченностью. Весовые функции становятся более узкими, когда спектральное разрешение прибора улучшается. Рисунок 2.18 относится к радиометру, имеющему всего семь каналов и низкую разрешающую способность ($\lambda / \Delta \lambda \approx 100$); его вертикальное разрешение составляет ~1,5–2 км в средней

тропосфере. Современные приборы зондирования (спектрометры) имеют тысячи каналов и более высокую разрешающую способность ($\lambda/\Delta\lambda \approx 1\,000$); их вертикальное разрешение составляет менее 1 км в средней тропосфере. Дальнейшее увеличение разрешающей способности до $\lambda/\Delta\lambda \approx 10\,000$ не улучшит вертикальное разрешение профилей температуры и влажности, но позволит наблюдать отдельные линии малых газовых составляющих для целей атмосферной химии.

Современные приборы для микроволнового диапазона уже достигли максимальных характеристик с точки зрения вертикального разрешения: оно не может быть лучше чем ~1,5 км в средней тропосфере и будет хуже в нижней тропосфере из-за сильного влияния излучения земной поверхности.

В коротковолновом диапазоне (УФ, ВИД, БИК, КВИК) измерения в полосах поглощения в основном используются для атмосферной химии с применением спектральных методов. Уравнение переноса излучения в данном случае будет более сложным, чем уравнение 2.20. Вместо теплового излучения, описываемого законом Планка, используется более сложный процесс рассеяния. Восстановление геофизических переменных опирается на моделирование, а не на уравнения в явном виде. Помимо атмосферной химии анализ полос поглощения используется для изучения других параметров (см. спектр на рисунке 2.11), таких как:

- a) Атмосферное давление на поверхности Земли: его величину получают из оценок общего содержания кислорода в полосе около 0,77 мкм в сравнении с соседними окнами. Это один из очень немногих подходов, существующих для измерения приземного давления из космоса. Точность ограничивается эффектом рассеяния аэрозолей, откуда следует, что это измерение также дает информацию об аэрозолях.
- b) Высота верхней границы облаков: ее получают из дефицита, который возникает при измерении общего содержания кислорода в атмосферном столбе; сам дефицит возникает в результате маскирования облаком нижней части столба. В принципе, это более точный метод, чем вычисление высоты верхней границы из эквивалентной температуры черного тела в ИК-диапазоне с коррекцией на излучательную способность облака и преобразование температуры в высоту с использованием профиля температуры.
- c) Молнии: используется канал очень узкой полосы пропускания на 0,774 мкм. Сильное поглощение от кислорода закрывает поверхность Земли и позволяет обнаруживать вспышки даже в дневное время. Интенсивность и количество вспышек в данный момент времени над определенной областью являются характерными для конвекции и, следовательно, служат косвенным свидетельством осадков. Кроме того, действие молнии приводит к образованию NO_x в атмосфере и отображает электрическое поле Земли.
- d) Общее содержание водяного пара: сигнал в одной или нескольких полосах водяного пара (около 0,94 или 1,37 мкм) сравнивается с сигналом в ближайших окнах. Это может быть более точным методом, чем использование ИК-диапазона или микроволновое профилирование.

2.2.4.3 Лимбовое зондирование

На рисунке 2.18 показывается, как весовые функции становятся шире по мере увеличения высоты. Это указывает на то, что вертикальное разрешение профилей температуры и влажности для пассивной ИК и МКВ радиометрии ухудшается с увеличением высоты. В настоящее время при использовании спектрометров разрешение считается адекватным (~1 км) в средней тропосфере; однако оно становится предельно допустимым (~2 км) на уровне тропопаузы, где требуется гораздо более высокое разрешение. В стратосфере вертикальное разрешение продолжает ухудшаться и быстро становится неприемлемым. Существует два метода, которые могут помочь в этом отношении: зондирование лимба (включая затмение Солнца, Луны или звезд) и радиозатменное зондирование.

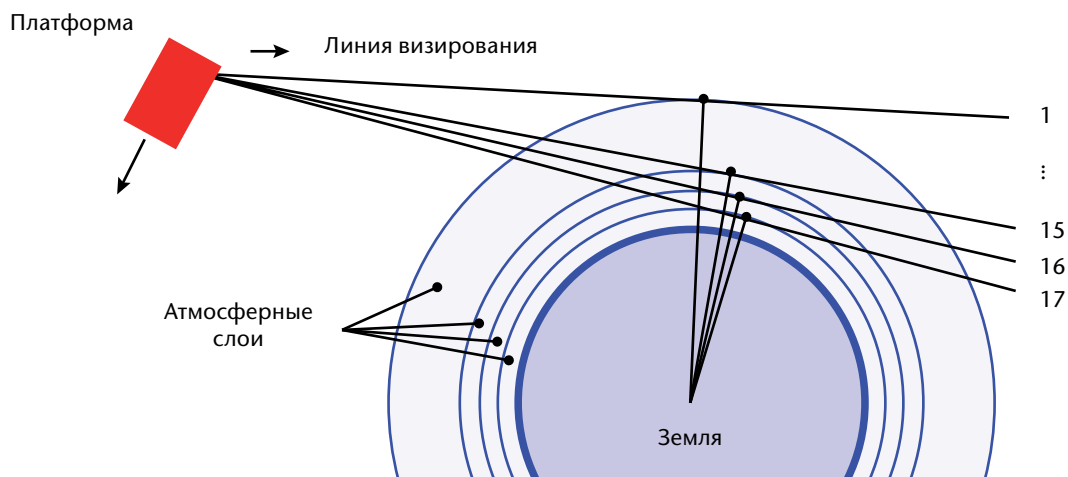


Рисунок 2.19. Геометрия лимбового сканирования

В режиме зондирования в надире вертикальное разрешение определяется резкостью весовых функций, которая контролируется, в свою очередь, спектральным разрешением. В лимбовом режиме вертикальное разрешение определяется механическим сканированием, т.е. IFOV прибора по всей атмосфере при визировании в поперечном направлении в области лимба Земли (рисунок 2.19). Вертикальное разрешение зависит от пошагового изменения величины, которое подбирается в соответствии с входной апертурой и интенсивностью имеющейся радиации. Обычно оно задается в диапазоне между 1–3 км. Горизонтальное разрешение будет грубым, поскольку измерение интегрируется по большой оптической длине пути, как показано на рисунке 2.19. Полная оптическая длина пути может составлять тысячи километров, однако эффективная оптическая длина пути, после взвешивания по атмосферной плотности, имеет протяженность примерно 300–500 км в окрестностях точки прохождения касательной линии.

Источниками излучения являются солнечное излучение, отраженное в атмосфере, или тепловое излучение атмосферы в ИК- или МКВ-диапазонах. Как правило, лимбовые наблюдения направлены не только на восстановление профилей температуры и влажности, но также и на изучение малых газовых составляющих для целей атмосферной химии.

В КВ-диапазоне (УФ, ВИД, БИК, КВИК) сканирование атмосферы можно осуществлять прямым нацеливанием на Солнце во время захода или восхода Солнца (затмение). Наблюдение выполняется путем измерения затухания спектральных линий в солнечном спектре. Метод солнечного затмения имеет огромное преимущество в том, что позволяет избежать какого-либо механического перемещения телескопа прибора и какой-либо калибровки, поскольку спектры, измеряемые во время затмения, используются в сравнении с солнечным спектром, измеряемым незадолго до (или после) затмения при тех же условиях. Один недостаток, по крайней мере, для полярно-орбитальных спутников, заключается в том, что покрытие ограничено высокими широтами, где спутник фиксирует восход (или закат), когда он заходит в ночную дугу орбиты (выходит из нее). Более широкое покрытие может быть достигнуто, если использовать затмение Луны. Дальнейшее расширение охвата на все широты возможно с использованием затмения звезд. Однако, в этих случаях излучение будет гораздо меньше.

2.2.5 Активное зондирование

Описанные выше методы зондирования основаны на том, что источниками для дистанционного зондирования являются отраженное солнечное излучение и тепловое излучение, испускаемое Землей (к которым прибавляются некоторые другие менее

значительные источники, такие как фоновое излучение неба в МКВ-диапазоне, Луна и звёзды в затменных наблюдениях). Эти природные источники делают возможным пассивное зондирование, для которого длины волн, используемые для наблюдений, определяются, главным образом, природными объектами. При активном зондировании источник будет искусственным и длина волны зондирования не полностью определяется физическими свойствами объекта, а может быть выбрана с учетом ограничений, существующих для формирования и распространения сигналов. Далее будут рассмотрены следующие принципы активного зондирования:

- а) радиозатменные измерения (для получения профилей температуры и влажности высокого вертикального разрешения);
- б) радиолокатор (для целей альтиметрии, скаттерометрии, оценки параметров облаков и осадков и получения изображений);
- в) лидар (для обнаружения облаков и аэрозолей, перемещения воздушных масс, альтиметрии и атмосферной химии).

2.2.5.1 Радиозатменные наблюдения

Радиозатменные наблюдения — это один из методов лимбового зондирования, который использует совершенно другой подход, отличный от пассивного радиометрического измерения. Искусственный источник (в данном случае сигнал от навигационного спутника (ГСОМ, ГЛОНАСС, Galileo или Compass)) отслеживается приемником на борту низкоорбитального спутника (рисунок 2.20).

Изменение направления распространения сигнала в результате атмосферной рефракции (угол преломления α) преобразуется в фазовый сдвиг. Этот сдвиг измеряется с хорошей точностью и затем преобразуется в профиль рефракции со временем в процессе затмения, которое продолжается около 90 с.

Рефракция связана с атмосферными переменными следующим образом:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 77,6 \cdot p/T + 3,75 \cdot 10^5 \cdot p_w/T^2 \quad (2.22)$$

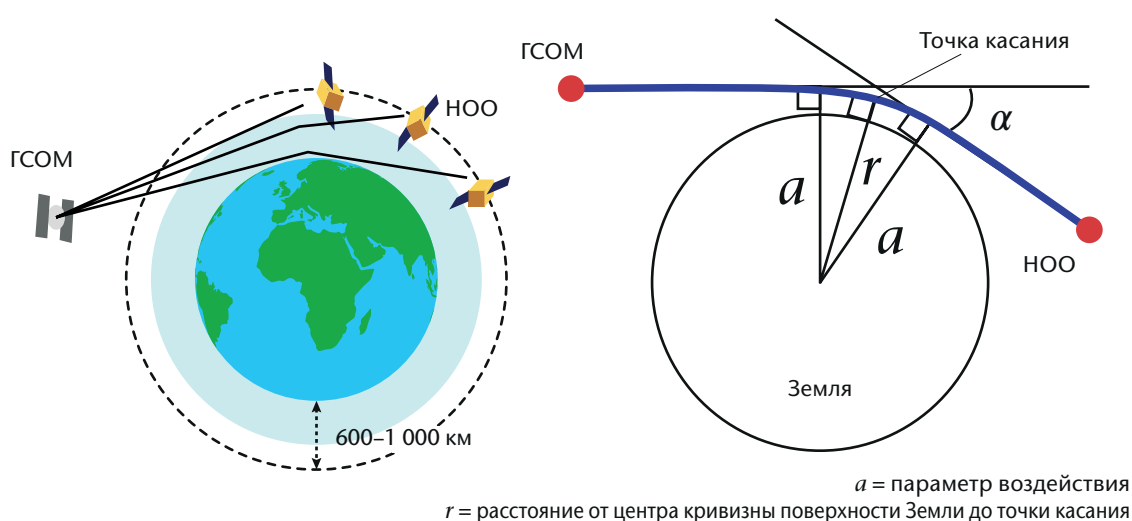


Рисунок 2.20. Принцип радиозатменного зондирования. Во время захода или восхода спутника ГСОМ над горизонтом спутника на НОО преломление, вызванное изменением свойств атмосферы вдоль луча, изменяет направление распространения волн под углом α .

где N — рефракция, n — коэффициент преломления, p — давление сухого воздуха, p_w — парциальное давление водяного пара, T — температура. Коэффициенты для p и p_w записываются в гПа, а T — в градусах Кельвина.

Фазовый сдвиг, по существу, является измерением времени, одним из самых точных измерений в физике. Другое измерение представляет собой расстояние между спутниками. Поскольку время и расстояние являются фундаментальными метрическими величинами, радиозатменные измерения представляют собой абсолютные измерения (не требующие калибровки): это весьма перспективная характерная особенность данного метода в плане мониторинга климата. Фактически, долгосрочные радиозатменные наблюдения считаются эталоном среди методов обнаружения изменения климата.

Данные радиозатменных измерений достаточно трудно обрабатывать по двум обстоятельствам: во-первых, потому что положение точки касания (см. рисунок 2.20, справа) перемещается во время измерений профиля; и во-вторых, давление, температура и влажность не могут измеряться независимо. По этой причине требуется четырехмерное усвоение в модели численного прогноза погоды. В меньшей степени это представляет проблему для получения температуры в верхней тропосфере и стратосфере, поскольку в этих слоях содержание водяного пара очень низкое, а также в нижней тропосфере, где водяной пар отвечает за большую часть изменчивости.

С вертикальным разрешением радиозатменных профилей в верхней тропосфере и стратосфере (около 0,5–1,0 км) не могут соперничать надирные наблюдения в ИК-диапазоне или измерения в МКВ-диапазоне (1,5–2 км). Более того, используемые частоты (L-полоса: см. таблицу 2.9) не зависят от облаков, даже дающих осадки. В результате этого измерения, хотя и проводятся, главным образом, в лимбовом режиме, могут иметь более протяженный охват вплоть до поверхности Земли, например, при наблюдении атмосферных неоднородностей, таких как высота верхней границы планетарного пограничного слоя. Кроме того, радиозатменные измерения являются одним из немногих методов определения приземного давления: это выполняется путем корреляции между высотой тропопаузы и давлением воздуха на уровне земной поверхности.

Для того чтобы учесть поворот сигнала в ионосфере, при передачах с навигационных спутников используются, по крайней мере, две близкорасположенные частоты. В ходе процесса коррекции в качестве побочных продуктов получают информацию, относящуюся к космической погоде, такие как общее содержание электронов и профиль плотности электронов.

2.2.5.2 Радиолокатор

Радиолокатор (радиообнаружение и дальнометрия) передает импульсные сигналы наблюдаемому объекту и улавливает сигнал обратного рассеяния. По сути, он измеряет расстояние (или дальность) и мощность обратного рассеяния благодаря радиолокационной отражательной способности или радиолокационному сечению тела.

Уравнение радиолокации можно записать в различном виде. Самый простой для понимания вид следующий:

$$P_s = \frac{P_t \cdot G}{4\pi \cdot r^2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{4\pi \cdot r^2} \cdot A_{\text{eff}} \quad (2.23)$$

где P_s — энергия обратного рассеяния, поступающая на антенну; P_t — энергия, переданная антенной; G — усиление антенны; A_{eff} — эффективная площадь приемной антенны радиолокатора; r — расстояние и σ — радиолокационное сечение. Следовательно:

$P_t G / 4\pi r^2$ — энергия, достигающая цели на расстоянии r ;

$P_t G / 4\pi r^2 \cdot \sigma$ — энергия, отраженная от объекта;

$P_t G / 4\pi r^2 \cdot \sigma / 4\pi r^2$ — часть (изотропически) отраженной энергии, которая возвращается на антенну.

Усиление антенны можно представить в виде $G = 4\pi \cdot A_{\text{эфф}}/\lambda^2$ (отношение, непосредственно следующее из закона дифракции). Представляя эффективную зону принимающей антенны радиолокатора, $A_{\text{эфф}}$ из его альтернативного выражения и при подстановке в уравнение 2.23 принимает следующий вид:

$$P_s = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{64\pi^3 \cdot r^4} \cdot \sigma \quad (2.24)$$

Различные типы радиолокаторов ориентированы либо на точность измерения дальности (альтиметры), либо на отражаемость/сечение (скаттерометры). Радиолокаторы для обнаружения облаков и осадков основаны на измерении и дальности (для вертикального профилирования), и отражательной способности. Другим важным параметром является разрешение изображения, которое достигается радиолокатором с синтезированной апертурой.

Радиолокационная альтиметрия

Основная цель альтиметрии заключается в измерении уровня моря и его картировании с целью определения динамической топографии океана. Характеристики радиолокатора оптимизируются для измерения дальности, насколько это возможно. Уровень моря измеряется по времени, которое потребовалось импульсу радиолокатора для того, чтобы достичь поверхности моря и возвратиться на спутник. Поскольку уровень моря вычисляется как расстояние от спутника, его местоположение должно быть определено с максимальной точностью. Высокоточная оценка параметров орбиты осуществляется при помощи одной или нескольких систем:

- a) лазерного слежения за спутником с помощью наземной станции и лазерных отражающих зеркал на спутнике;
- b) радиоместоопределения на основе сетей наземных станций передачи и приема и приёмопередатчика на борту спутника;
- c) приемника ГСОМ на борту спутника.

Недостатком радиолокационной альтиметрии является необходимость ограничиваться визированием только в надире; иначе эхо-сигналы от окружающих областей будут помехами во временном анализе. По этой причине цикл наблюдения является очень продолжительным. Требуется выполнение коррекций сигнала для учета: ионосферного вращения (для этого используются две частоты ~13,6 ГГц (основная) и ~5,3 ГГц (вспомогательная)) и водяного пара (используется сонастроенный МКВ-радиометр на канале ~23 ГГц (основной) и на каналах ~35 и/или ~19 ГГц (вспомогательные)).

Помимо измерения дальности альтиметр также регистрирует и анализирует ее флуктуации и измеряет интенсивность эхо-сигнала. Такие наблюдения позволяют получить:

- a) значимую высоту волны: рассчитывается на основе анализа разброса во времени улавливаемых эхо-сигналов;
- b) уровень моря: рассчитывается после фильтрации флуктуаций, вызванных волнением, и с учетом мгновенной высоты спутника относительно геоида;
- c) скорость ветра: выводится из анализа флуктуаций интенсивности эхо-сигналов;
- d) более глубокие знания о геоиде: на основе многолетних статистических данных о наблюдаемых уровнях моря;
- e) общее содержание электронов: выводится как побочный продукт коррекции ионосферного вращения.

Радиолокационная скаттерометрия

В отличие от радиолокационной альтиметрии, которая, главным образом, преследует целью измерение дальности, радиолокационная скаттерометрия оптимизирует точность измеренного радиолокационного сечения σ (см. уравнение 2.24), которое часто бывает нормированным и называется σ^0 (сигма-ноль). Подсистема для определения дальности может даже отсутствовать в приборе, однако калибровка должна быть предельно точной.

Радиолокационное сечение есть функция диэлектрических свойств объекта, геометрии визирования и падающего излучения (длина волны, поляризация). У скаттерометров основное применение связано с определением ветра у поверхности моря. Мишенью являются капиллярные волны, тесно связанные с ветровым напряжением. Величина σ^0 изменяется со скоростью ветра, с относительным направлением ветра и линией визирования. Путем измерения σ^0 при некоторых азимутальных углах можно определить как скорость, так и направление.

Взаимосвязь между σ^0 и ветром носит сложный характер: практические решения могут быть эмпирическими или полуэмпирическими. Более того, не существует единственной взаимосвязи с точки зрения направления: при двух углах визирования сохраняется ряд неоднозначностей (при трех углах — их меньше). Когда значения σ^0 напрямую усваиваются в модели численного прогнозирования погоды, которая описывает взаимодействие между волнами и атмосферой, решение неоднозначностей заключается в модели.

Различия между измерениями ветра при помощи скаттерометров и пассивных МКВ-радиометров можно суммировать следующим образом: (i) пассивное зондирование в микроволновом диапазоне обычно дает информацию только о скорости ветра; информация о направлении может быть получена только в том случае, если несколько радиометрических каналов оборудованы возможностями полной поляризации; (ii) информация от скаттерометров является в общем более лучшего качества, особенно для низких скоростей ветра (менее ~3 м/с); однако для высоких скоростей (более ~20 м/с) лучше работает пассивное зондирование в микроволновом диапазоне.

Предназначенные, главным образом, для определения параметров ветра над поверхностью моря, скаттерометры позволяют проводить несколько видов наблюдений:

- a) ветер над поверхностью моря во всех погодных условиях (в С-диапазоне) или почти во всех погодных условиях (в K_u -диапазоне);
- b) давление воздуха над поверхностью моря (путем применения геострофических отношений к ветровым картам);
- c) влажность почвы в районах со скудной растительностью (в С-диапазоне, и лишь ограниченно в K_u -диапазоне);
- d) индекс листовой поверхности или общая биомасса для густой растительности (лес);
- e) тип льда (возраст, шероховатость) на полярных шапках;
- f) водный эквивалент снега (для которого K_u -диапазон предпочтителен).

Радиолокаторы для обнаружения облаков и осадков

Если радиолокационные альтиметры предназначены, в первую очередь, для определения дальности, а радиолокационные скаттерометры — радиолокационного сечения, то радиолокаторы обнаружения облаков и осадков выполняют и то, и другое. Определение дальности необходимо для того, чтобы измерить вертикальный профиль частиц облаков, в то время как σ требуется для получения концентрации и размера отражающих частиц. Однако при получении профиля осадков требование к точности определения дальности составляет порядка 100 м, а не 1 см как для альтиметрии.

Для дождевых капель, при условии, что их диаметр D меньше $\lambda/10$ (т. е. в условиях рэлеевского рассеяния), радиолокационное сечение можно представить в виде:

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot K^2 \cdot D^6, \text{ где } K \text{ — диэлектрическая постоянная} \quad (2.25)$$

Полное обратное рассеянное излучение, зарегистрированное радиолокатором, представляет собой сумму всех отражателей всех диаметров в IFOV. Предполагая распределение Маршалла-Пальмера ($N_0 \cdot e^{-\lambda D}$) для диаметров частиц, полная отражаемость может быть выражена:

$$Z = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot \int_0^{D_{\max}} K^2 \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda D} \cdot D^6 \cdot dD \quad (\text{справедливо для } D \ll \lambda) \quad (2.26)$$

Уравнения 2.25 и 2.26 в общем относятся к наземным метеорологическим радиолокаторам, которые используют S-полосу (~10 см) или C-полосу (~5 см). Эти полосы сравнивают с D-полосой ~ 0,5 см, которая является характерной для облаков, дающих осадки. Эти частоты не используются для наблюдений из космоса, поскольку соответствующее IFOV на земле с антенной разумного размера является слишком грубым. В соответствии с регламентными документами, регулирующими частоты, к частотам, которые могут использоваться радиолокаторами из космоса, относятся: ~14 ГГц (~2 см), ~35 ГГц (~0,9 см) и ~94 ГГц (~0,3 см). Поэтому уравнения 2.25 и 2.26 не могут быть применены целиком в данном случае и должны корректироваться достаточно сложным образом для учета условий рассеяния Ми.

Если отражаемость Z получена измерениями, то существует несколько способов для перевода Z в интенсивность осадков R . Во-первых, необходимо вычислить интенсивность осадков на поверхности. Она не может быть измерена из космоса напрямую, но вместо этого должна быть получена из измеренных свойств в вертикальном столбе, связанных с профилем осадков.

Радиолокатор обнаружения облаков и осадков — это единственный метод, который может обеспечить измерения нижней границы облачности, важного параметра для авиационной метеорологии и изучения климата. Точность и надежность измерений зависит от частоты радиолокатора; радиолокатор должен проникнуть через всю толщу облака. С оперативной точки зрения радиолокатор обнаружения облаков и осадков имеет несколько недостатков, в частности, ограниченную полосу обзора, что не позволяет иметь частые циклы наблюдения. Следовательно, хотя получение изображений пассивным зондированием в микроволновом диапазоне по-прежнему остается основным методом регулярных наблюдений за осадками, точность данных об осадках, полученных пассивной МКВ-радиометрией, до сих пор требует улучшения. Для «калибровки» системы пассивных МКВ-радиометров необходимо, чтобы в космическом пространстве постоянно находился, по крайней мере, один радиолокатор, в соответствии с основными требованиями программы измерения глобальных осадков.

Радиолокатор с синтезированной апертурой антенны

В МКВ-диапазоне пространственное разрешение ограничивается дифракцией. Для угла радиолокатора бокового обзора θ° не в надири на орбитальной высоте H , с диаметром антенны L , и в предположении плоской поверхности, IFOV записывается как:

$$\text{IFOV} = 1,24 \cdot \frac{H \cdot c}{\cos \theta \cdot L \cdot v} \quad (2.27)$$

В таблице 2.10 представлена зависимость IFOV и L для радиолокатора в нескольких диапазонах в предположении, что $\theta = 23^\circ$ и $H = 700$ км (параметры PCA на борту спутника SeaSat, рисунок 2.21). Из рисунка видно, что потребности в IFOV = 1 км будет очень трудно обеспечить, а потребности в IFOV = 100 м или ниже будет невозможно обеспечить в рамках концепции антенны с реальной апертурой.

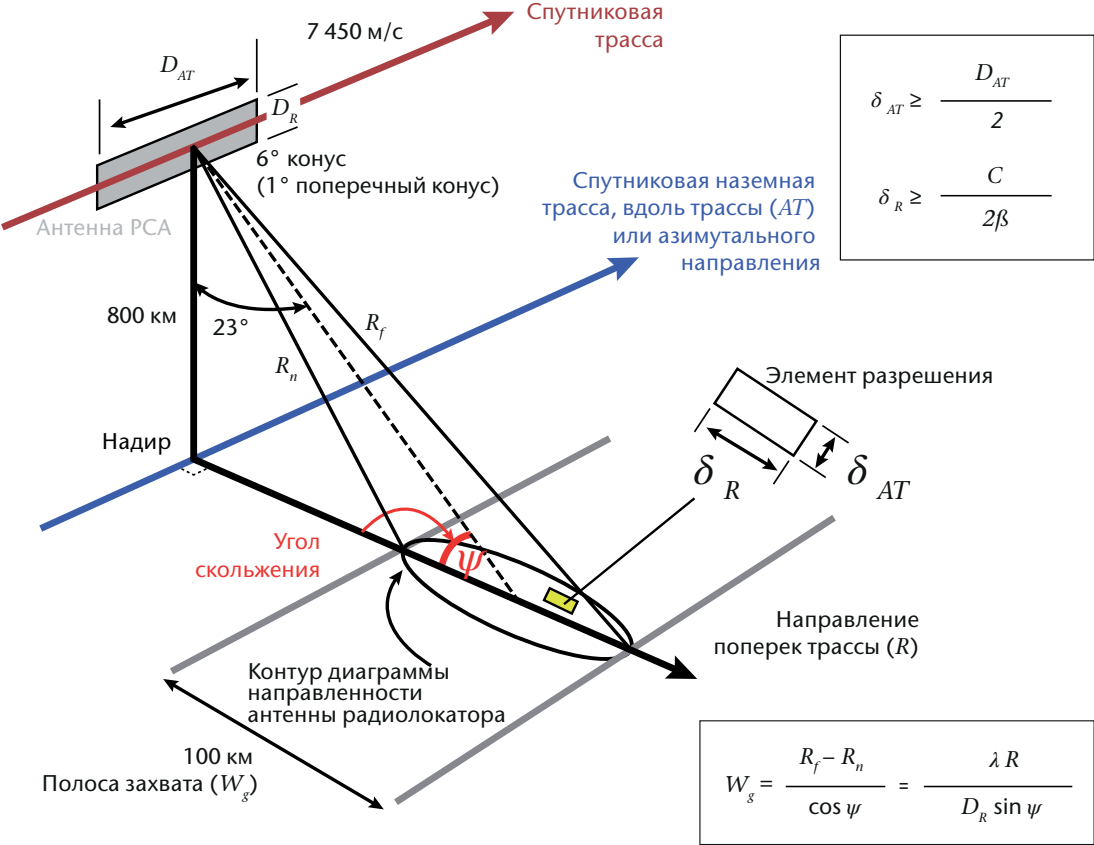


Рисунок 2.21. Принцип действия PCA

Таблица 2.10. Примеры соответствующих разрешений и размеров антенны для типичных частот, используемых в PCA

	L-диапазон (~1,3 ГГц)	C-диапазон (~5,4 ГГц)	X-диапазон (~9,6 ГГц)
IFOV для $L = 1$ м	220 км	60 км	30 км
Требуемый L для IFOV = 1 км	220 м	52 м	30 м
Требуемый L для IFOV = 100 м	2 200 м	520 м	300 м
Требуемый L для IFOV = 10 м	22 000 м	5 200 м	3 000 м

Согласно концепции PCA (рисунок 2.21), антенна вытянута вдоль направления движения спутника. Ее узкие размеры определяют полосу обзора, параллельную подспутниковой трассе. Более длинная сторона определяет область, где анализируются сигналы. Несмотря на то, что контур диаграммы направленности антенны радиолокатора соответствует контуру диаграммы направленности антенны с реальной апертурой, ситуация меняется для элементов разрешения в условиях эксплуатации (пиксели). Пиксели поперек полосы захвата находятся на разном расстоянии от спутника. Спутник может делать их привязку к местности благодаря своей способности различать небольшие изменения в расстоянии. Эхо-сигналы от пикселей, расположенных перед поперечной подспутниковой линией, испытывают воздействие положительного доплеровского сдвига (частота выше, чем переданная частота); эхо-сигналы от пикселей сзади этой линии испытывают

отрицательный доплеровский сдвиг. Путем фиксации момента инверсии сдвига обеспечивается возможность для привязки пикселей к местности вдоль направления движения спутника.

РСА может использоваться в различных рабочих режимах в зависимости от выбранного сочетания разрешения и полосы обзора, а также комбинации переданной и полученной поляризаций. Один рабочий режим предназначен для волновых спектров. Небольшая часть изображения (виньетка) выбирается через определенные интервалы (для спутника Envisat, к примеру, виньетка составляет 5 км x 5 км с наилучшим пространственным разрешением 30 м каждые 100 км вдоль трассы). Эхо-сигналы в виньетке анализируются с целью построения энергетических спектров, из которых можно определить преобладающее направление распространения волны, преобладающую длину волны/ период волны и энергию, связанную со значимой высотой волны.

Перечень применений РСА велик, хотя не все диапазоны подходят для всех применений:

- a) особенности циркуляции океана (вихри) и волны (преимущественно L-диапазон);
- b) загрязнение океана и разливы нефти (преимущественно C-диапазон);
- c) морской ледовый покров и тип льда (возраст) (любой диапазон);
- d) материковый ледовый покров (ледники) (любой диапазон);
- e) условия таяния снега и водный эквивалент снега (преимущественно X-диапазон);
- f) влажность в поверхностном слое почвы (преимущественно L-диапазон, особенно для зоны корней);
- g) тип растительности (преимущественно C-диапазон) и общая биомасса (преимущественно P-диапазон);
- h) землепользование и урбанизация (преимущественно C-диапазон);
- i) обнаружение геологических структур (преимущественно X-диапазон);
- j) мониторинг стихийных бедствий и инвентаризация ущерба (преимущественно X-диапазон);
- k) контроль за движением судов и военное наблюдение (преимущественно X-диапазон).

Другие важные применения могут быть реализованы при использовании интерферометрии благодаря тому, что контроль фазы сигнала РСА является очень точным. Сигналы с разных орбит одного и того же спутника или различных спутников могут быть зарегистрированы одновременно с высокой точностью, что позволяет реализовать интерферометрию. Этот метод дает возможность, например, получать топографию поверхности суши для усовершенствованных цифровых моделей рельефа и измерять высоту айсбергов.

Используя интерферометрию между проходами одного и того же спутника с периодичностью повторения орбиты, можно измерять такие изменения как дрейф айсбергов, колебания ледникового покрова и площади озер, изменения в вулканической поверхностной топографии и брадисейсмы, береговую эрозию и урбанизацию.

2.2.5.3 **Лидар**

Принцип действия лидара (световое обнаружение и определение дальности) является таким же как у радиолокатора, за исключением того, что электромагнитный диапазон другой: для радиолокатора используется МКВ-диапазон, для лидара — коротковолновый.

Большинство лидаров используют длины волн в УФ- (например, 355 нм), ВИД- (например, 532 нм), ДИК- (например, 1 064 нм) или КВИК- (например, 1 550 нм) диапазонах; но могут использовать и более длинные длины волн (например, 10,6 мкм). Источником является лазер (усиление света в результате вынужденного излучения). Он является сильно направленным, однако большое расстояние от спутника до Земли требует большой электрической энергии, а прием сигнала обратного рассеяния требует больших телескопов. Использование лидара в космосе предполагает поэтому значительные ресурсы. Хотя в принципе, лидар можно было бы применять для сканирования местности с целью получения изображений, до сих пор лидарные системы в космосе использовались только в надиальной ориентации, или, по крайней мере, были мононаправленными. Следующие применения в космосе основаны на использовании лидара:

- a) лидар обратного рассеяния для обнаружения аэрозолей и определения высоты верхней границы облаков;
- b) доплеровский лидар для получения профиля ветра в безоблачной атмосфере;
- c) лидарный альтиметр, предназначенный специально для морского льда;
- d) лидар дифференциального поглощения (ЛДП) для задач атмосферной химии.

Лидар обратного рассеяния

Лидар обратного рассеяния, главным образом, предназначен для наблюдения за аэрозолями. Это означает использование длин волн, сопоставимых с размером небольших аэрозолей (~1 мкм). Для того, чтобы определить больше свойств аэрозолей (размер, фаза, коэффициент поглощения/рассеяния и сам тип), были разработаны различные концепции. Некоторые из таких концепций основаны на использовании двух длин волн, в то время как другие — на применении лазера высокого спектрального разрешения для разделения компонентов рассеяния Ми и рэлеевского рассеяния. В любом случае лидар обратного рассеяния — это очень громоздкий прибор (телескоп может иметь апертуру ~1 м). Контур диаграммы направленности антенны может составлять всего несколько десятков метров, но при этом осреднение выполняется по большому количеству декоррелированных эхо-сигналов, что повышает отношение сигнал-шум. Такие эхо-сигналы будут помогать обеспечивать, чтобы окончательное разрешение находилось в диапазоне нескольких сотен метров. Вертикальное разрешение, которое определяется системой измерения дальности лидара, составляет несколько сотен метров.

Предназначенный главным образом для определения аэрозолей (что является очень трудной задачей), лидар обратного рассеяния позволяет выполнять наблюдения различных параметров, включая:

- a) профиль аэрозоля и свойства аэрозоля (размер, фаза, коэффициент поглощения/рассеяния, тип);
- b) высоту верхней границы облаков с гораздо большей точностью, чем пассивные методы зондирования в БИК- и ИК-диапазонах;
- c) оптическую толщину тонких облаков (перистых) и нижнюю границу облаков в полупрозрачных облаках;
- d) полярные стратосферные облака;
- e) атмосферные неоднородности, такие как тропопауза и верхняя граница планетарного пограничного слоя, которые определяются по изменению показателя преломления.

Доплеровский лидар

Доплеровский лидар предназначен, главным образом, для наблюдения профилей ветра — основной переменной для метеорологического прогноза.

Современные оперативные методы, доступные для наблюдений за профилем ветра, заключаются в отслеживании движения облака или неоднородностей водяного пара на частых изображениях с геостационарных спутников, или с полярно-орбитальных спутников в полярных районах, над которыми часто проходит спутник. Это ограничивает возможности проведения измерений только на тех высотах, на которых находятся трассеры (обычно один, иногда два слоя). Появление гиперспектрального ИК-зондирования на геостационарной орбите (ГСО) ожидается в скором времени: когда оно станет доступным, можно будет получать частые профили водяного пара и динамику водяного пара можно будет отслеживать на нескольких высотах. Однако при этом вертикальное разрешение и точность, как полагают, будут ограничены и охват не будет распространяться на высокие широты.

Слежение за движением облаков является единственным существующим методом для районов с облачностью, наряду с тем, что доплеровский лидар позволяет следить за компонентами и в безоблачной атмосфере. Слежение ведется за вихревыми потоками аэрозолей в турбулентной атмосфере и молекулярным рассеянием.

Использование доплеровского сдвига, связанного с ветром, предполагает боковой обзор. Частота повторения лазерного импульса такова, что соответствующее IFOV может быть меньше 100 м. Однако, как и в любом радиолокаторе или лидаре, количество деколлированных эхо-сигналов следует усреднять для улучшения отношения сигнал-шум: конечное разрешение для IFOV составляет несколько десятков километров. Из-за ограниченной доступности электроэнергии прибор имеет ограниченный цикл нагрузки, например, получение данных с интервалами 200 км вдоль линии, параллельной подспутниковой трассе. Вертикальное разрешение полученных данных о ветре зависит от частоты временной выборки обратного эхо-сигнала. Это может быть скорректировано для вертикального разрешения около 1 км в средней тропосфере, в меньшей степени в планетарном пограничном слое, и в большей степени в стратосфере. Ни один другой метод, основанный на отслеживании облаков и водяного пара с ГСО, не может конкурировать с такими характеристиками. Предполагаемая точность горизонтальной составляющей ветра составляет менее 2 м/с.

Доплеровский лидар — это очень большой прибор (телескоп может иметь апертуру 1,5 м) и требует специального спутника на орбите, ниже той, которая обычно используется для метеорологических спутников.

Основным недостатком лидаров, определяющих параметры ветра, является охват. Поскольку один прибор покрывает только линию, параллельную подспутниковой трассе, потребуется группировка спутников для обеспечения частого покрытия. До тех пор, пока не будет достигнуто устойчивое функционирование такой группировки, базовой системой для получения профиля ветра будет по-прежнему оставаться получение изображений и гиперспектральное зондирование с ГСО, а доплеровский лидар будет оказывать лишь поддержку для калибровки системы в целом.

Другой трудностью для лидара, определяющего параметры ветра, является то, что измерение может вестись только по линии визирования (одномерное). Это означает, что для восстановления требуемой двумерной горизонтальной составляющей требуется усвоение в модели численного прогноза погоды.

Доплеровский лидар предназначен, главным образом, для определения параметров ветра, что является очень трудной задачей. Он позволяет проводить несколько видов измерения, включая профиль ветра в безоблачной атмосфере или в присутствии тонких перистых облаков, профиль аэрозоля (по интенсивности эхо-сигнала) и высоту верхней границы облаков.

Лидарный альтиметр

Радиолокационные альтиметры могут обеспечивать измерения с точностью до нескольких сантиметров. Однако, на высотах выше 20 км, их горизонтальное разрешение является достаточно низким. Реализация технологии РСА с обработкой сигнала вдоль трассы позволяет довести разрешение до ~300 м, что все-таки еще недостаточно для точного определения границ. Другим недостатком лидарных альтиметров является их непригодность для наблюдения за поверхностями с высокой излучательной способностью (и, следовательно, низкой отражательной способностью) в МКВ-диапазоне, таких как наблюдения за сушей и льдом.

У лидаров таких проблем не существует. Горизонтальное разрешение может составлять несколько десятков метров, а вертикальное разрешение менее 10 см. Такое высокое разрешение дает возможность определять границу между морской водой и полярным льдом и (после последовательных проходов спутника) выполнять высотное профилирование вдоль трассы для составления карт толщины льда.

Для того, чтобы обеспечить функционирование над морем, даже несмотря на низкую отражательную способность в ВБИК-диапазоне, лидарный альтиметр должен иметь большой телескоп (апертура ~1 м). Для повышения рентабельности обычно добавляют датчик, использующий вторую длину волны для наблюдения за атмосферой (например, 1 064 нм для поверхности и 532 нм для атмосферы). В этом случае лидарный альтиметр функционирует как обычный лидар обратного рассеяния.

Как и любой другой альтиметр, лидарный альтиметр требует исключительно точного определения орбиты, поскольку базовое измерение дальности позволяет получить расстояние до объекта от спутника на орбите. Высокоточное определение орбиты достигается благодаря приемнику ГСОН и лазерному определению дальности от сети наземных станций с системой ретрорефлектометров до спутника.

Области применения лидарного альтиметра включают:

- a) толщину морского льда и топографию полярной шапки;
- b) уровень моря и динамическую топографию океана;
- c) вклад в углубление знаний о геоиде;
- d) топографию поверхности суши, включая ледники и озера;
- e) профиль аэрозоля и свойства аэрозоля;
- f) высоту верхней границы облаков, оптическую толщину тонких облаков и нижнюю границу полупрозрачных облаков;
- g) полярные стратосферные облака;
- h) атмосферные неоднородности, такие как тропопауза и верхняя граница планетарного пограничного слоя.

Лидар дифференциального поглощения

Принцип дифференциального поглощения заключается в проведении сравнительных наблюдений на пике поглощения изучаемых компонентов атмосферы в ближайшем атмосферном окне. Использование лидара дифференциального поглощения (ЛДП) для этих целей является единственным способом, позволяющим получить профили высокого вертикального разрешения в планетарном пограничном слое, где высокое вертикальное разрешение является крайне важным. Конечно, профиль можно получать и в более высоких слоях, включая стратосферу.

Условия применения ЛДП требуют, чтобы компонентов атмосферы было достаточно много; чтобы линия поглощения была сильно выраженной и лежала в спектроскопически «чистой» области, а также имелось близко расположенное «чистое» атмосферное окно. В качестве примеров можно привести следующие области применения:

- a) CO_2 с использованием линий на 1,57 мкм в окне 1,6–1,7 мкм или на 2,05 мкм в окне 2,0–2,3 мкм;
- b) H_2O с использованием линий на 935 нм с окнами по обеим сторонам;
- c) O_3 с использованием линий и окон в области 305–320 нм.

Программы запусков спутников с использованием ЛДП сейчас находятся только на стадии предложений или оценки целесообразности. Поскольку спектральная ширина полосы пропускания (и, следовательно, диапазон энергии, в котором ведутся наблюдения) является очень узкой, а отражатель (газ) является очень слабым, прибор получается громоздким, а измерения в целом технологически затруднительны.

2.3 КОСМИЧЕСКИЙ И НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТЫ

Наблюдение из космоса предполагает использование сложной системы, состоящей из (i) космического сегмента для выполнения наблюдений, и (ii) наземного сегмента для управления космическим сегментом и обработки данных наблюдений.

2.3.1 Космический сегмент

Космический сегмент спутниковой системы включает в себя:

- a) платформу (также называемую платформой спутника);
- b) бортовые приборы;
- c) средства связи для получения команд и передачи выходных данных приборов на землю.

Спутники для наблюдения за Землей могут иметь размер/массу в пределах двух порядков величины:

- a) наноспутники: < 10 кг (фактически их использование для оперативных наблюдений за Землей маловероятно);
- b) микроспутники: 10–100 кг;
- c) миниспутники: 100–500 кг;
- d) малые спутники: 500–1 000 кг;
- e) спутники среднего размера: 1–2 тонны;
- f) крупные изделия: > 2 тонн.

2.3.1.1 Обслуживающие платформы

Спутниковая платформа обеспечивает возможности размещения приборов и предоставляет несколько видов обслуживания:

- a) энергоснабжение для приборов, средств телесвязи и всех прочих спутниковых подсистем;
- b) навигационные возможности для географической привязки наблюдений;
- c) управление положением в пространстве для корректной ориентации приборов и стабилизации;
- d) обеспечение теплового режима для обеспечения заданных условий для функционирования приборов;
- e) устройства проверки функционирования для мониторинга и контроля состояния спутниковых подсистем;
- f) двигатели для сохранения орбиты, и, если необходимо, изменения орбиты;
- g) технические возможности для осуществления контроля за различными подсистемами платформы;
- h) возможности обработки для работы с передаваемыми приборными данными и потоками данных в определенных форматах;
- i) устройства хранения бортовых записей глобальных данных;
- j) средства связи для получения команд с земли;
- k) средства связи для передачи данных наблюдений и данных о состоянии станции на землю;
- l) другие услуги связи, когда платформа выполняет только функцию ретрансляции данных.

2.3.1.2 **Системы навигации и местоопределения**

Системы навигации и местоопределения необходимы для геопривязки наблюдаемых данных, как в процессе съемки, так и впоследствии для обработки данных на земле. При этом используются следующие системы:

- a) лазерные ретрорефлектометры;
- b) приемники ГНСС;
- c) системы радиоместоопределения;
- d) оборудование слежения за звездами.

Лазерные ретрорефлектометры

Эти устройства представляют собой зеркала, которыми обычно являются уголковые отражатели. Они отражают лазерные лучи, посылаемые во время сеансов местоопределения на спутник из наземных пунктов, имеющих лазерное оборудование. Лазерные ретрорефлектометры используются на многих спутниках для точного определения орбиты по факту. Оно достигается путем пост-процессинга ряда измерений исключительно в ночное время и при безоблачном небе. Проводимый анализ предусматривает целую сеть скоординированных наземных станций. Получаемые результаты достаточно немногочисленны и поступают с задержкой. Однако они являются настолько точными, что могут использоваться для целей космической геодезии.

Системы радиоместоопределения

Данные системы специально спроектированы в поддержку задач альтиметрии. Они охватывают радиосвязь между спутником, с одной стороны, и наземными станциями передачи и/или получения сигнала, с другой. Определение местоположения выполняется в масштабе времени, близком к реальному, и отличается повышенной точностью после пост-процессинга. Двумя примерами таких систем являются:

- a) Интегрированная спутниковая система доплеровской орбитографии и радиолокационного местоопределения (DORIS), измеряющая доплеровский сдвиг сигналов с наземных станций;
- b) оборудование для точного определения дальности и скорости изменения дальности (PRARE), измеряющее дифференциальные сигналы от сети наземных станций.

Приемники ГНСС

Данные системы используют сдвиг фазы сигналов от нескольких спутников Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). ГНСС включает в себя навигационные группировки спутников США (ГСОМ), Российской Федерации (ГЛОНАСС), Европейского союза (Galileo) и Китая (Compass, называемая в Китае Beidou). Большое количество спутников в настоящее время использует приемники ГНСС для поддержки своей навигации. Определение местоположения осуществляется в реальном масштабе времени.

Оборудование слежения за звездами

К таким приборам относятся формирователи изображений приборов с зарядовой связью, которые следят за яркими звездами, распознают их рисунок и посылают информацию в систему управления ориентацией спутника. Приборы слежения за звездами обеспечивают непрерывный мониторинг положения спутника, причем с гораздо большей точностью, чем системы на основе зондирования горизонта. Это требуется для приборов, которым нужна точная информация об ориентации (например лимбовым зондировщикам), как для активного управления ориентацией во время полета, так и для последующей обработки данных прибора. Все большее количество спутников сегодня оборудованы приборами слежения за звездами.

2.3.1.3 *Ориентация и стабилизация*

Системы ориентации и стабилизации являются важнейшими элементами платформы, которые определяют возможности наведения приборов.

Ориентация стороны платформы, на которой размещены датчики, в идеале должна сохраняться в сторону поверхности Земли, если только программа спутника не предусматривает другие цели (такие как мониторинг Солнца). Поскольку платформа во время своего движения по орбите сохраняет постоянную ориентацию в отношении звезд, необходим механизм стабилизации.

Самым простым (пассивным, инерционным) механизмом стабилизации является вращение. Ось вращения имеет постоянную ориентацию относительно звезд, поэтому она не выполняет требования ориентации относительно Земли. Для спутников на ГСО ось вращения может быть задана параллельно оси вращения Земли, и таким образом поверхность Земли будет сканироваться лишь небольшую часть времени (около 5 % времени обращения спутника) при каждом вращении спутника. Для орбитальных станций на низкой орбите ориентация оси вращения может быть задана специально таким образом, чтобы дать возможность прибору быть ориентированным в сторону поверхности Земли какую-то часть времени. В любом случае стабилизация вращением приемлема, только если радиометрический баланс прибора достаточен для выполнения измерений,

для которых инструмент был спроектирован, несмотря на небольшую долю полезного времени наблюдения. Кроме того, стабилизация вращением может быть выполнена только для одного или весьма небольшого количества приборов на одной платформе.

Трехосная стабилизация гораздо больше подходит для поддержания постоянной ориентации по направлению к Земле и обеспечивает функционирование большего количества приборов на одной платформе. Это создает возможности для активного управления ориентацией спутника в отношении вращений вокруг оси, перпендикулярной орбитальной плоскости (тангаж); оси, касательной к мгновенному движению по орбите (крен), и направления в нади́р (рыскание).

Активное управление имеет принципиально важное значение, поскольку оно означает высокоточное определение положения (на основе, к примеру, визирования линии горизонта, с помощью приборов слежения за звездами или приемников ГНСС) и эффективные исполнительные механизмы (такие как микро-двигательные установки, гироскопы, точные детекторы изменения угла и эффективная управляющая электроника). Утрата активного управления является одной из основных причин неудачных полетов. Активное управление может повлиять на качество данных вследствие ограниченной точности, в частности в случае приборов с высоким разрешением и высоких орбит (ГСО), и механических возмущений в ориентации прибора, связанных с включением приводных механизмов.

Помимо основных систем ориентации и стабилизации (вращение и трехосный контроль) используются также интеллектуальные системы управления ориентацией, особенно на малых спутниках. Например, в гравитационно-градиентной системе используется длинная штанга, которая имеет направление в нади́р, что позволяет постоянно ориентировать одну сторону платформы в направлении поверхности Земли.

2.3.1.4 ***Система проверки функционирования спутника***

Важнейшая задача при проектировании спутников заключается в том, чтобы взаимно увязать функциональные возможности, которые устанавливаются на борту спутника, с функциями, которые можно обеспечить на земле при условии, что имеется достаточное количество информации о бортовых характеристиках. Размещение аппаратуры на борту спутника может дорого стоить, она может давать отказы, не подлежать восстановлению и иметь ограниченную работоспособность. Поэтому целесообразнее резервировать установку аппаратного обеспечения только на те случаи, когда это абсолютно необходимо и в разумной степени надежно. Более того, система, отслеживающая состояние спутника, дает всю дополнительную информацию, необходимую для правильной обработки данных на земле.

Система проверки функционирования спутника обеспечивает контроль как за состоянием платформы (деформации, температура излучающей поверхности, высота, состояние электрогенерирующих установок и всех других подсистем), так и за состоянием приборов (состояние и температура различных деталей, контрольные сигналы электроники и т. д.). Как правило, проверка состояния прибора, по крайней мере частично, заложена в самом приборе.

Объем и полнота проверки функционирования систем являются тем признаком, по которому спутники относят к различным классам. Спутники оперативного типа оборудованы большим количеством устройств проверки функционирования для мониторинга подсистем и возможной инициации восстановительных маневров (таких как переключение на резервные устройства). Информация, полученная в ходе проверки функционирования, является основным элементом для точной калибровки прибора и географической привязки данных.

Несмотря на важность наличия хорошей системы проверки функционирования, существуют ограничения по точности, которой можно добиться путем использования программной обработки. Ошибки, не устранённые после корректировок с помощью

программного обеспечения или реконструкций, могут быть больше допустимых для конкретного применения. Поэтому некоторые корректировки могут проводиться только на основе бортовой аппаратуры.

2.3.1.5 **Передача данных**

Платформа должна передавать на землю результаты наблюдений различных приборов. Какой бы ни была высота спутника над поверхностью Земли, радиосигналам, передаваемым на Землю, необходимо пройти через ионосферу и плазмосферу, которые блокируют распространение электромагнитных волн с частотой ниже, чем критическая частота плазмы (~25 МГц). Требуется прямая видимость между передатчиком и приемником на спутнике и на наземной станции.

Самый простой принцип получения наблюдаемых данных со спутника — это прямая трансляция в режиме реального времени. Для спутников, находящихся на низких околоземных орбитах (НОО), наземная станция будет получать все данные, которые спутник передает при прохождении зоны радиовидимости. Размер зоны радиовидимости будет один и тот же для FOV спутника с зенитным углом $\zeta = 90^\circ$ (в принципе) или с углом $\zeta = 85^\circ$ (с уменьшенной степенью риска помех от наземных источников или орографической окклюзии). Из таблицы 2.1 видно, что для высоты спутника 800 км, к примеру, зона радиовидимости представляет собой окружность диаметром 5 000 км (для $\zeta = 85^\circ$ или высоты = 5°).

В случаях, когда скорость спутника находится в пределах 400 км/мин и маршрут спутника проходит по центру над станцией приема данных, сеанс передачи сигнала длится самое большее 15 минут и уменьшается до нескольких минут при периферийных проходах.

Такой приём сигнала наиболее удобен, поскольку пользователю передаются наблюдаемые данные в реальном времени для незамедлительной обработки. Однако локальной приемной станцией могут быть получены только данные, наблюдаемые и переданные во время прохождения спутника внутри зоны приема сигналов. Для ГСО прямая трансляция может непрерывно осуществляться на станцию, расположенную в рамках FOV.

Альтернативным способом получения данных со спутников, находящихся на НОО, является хранение данных наблюдений на борту спутника и их передача по команде, когда спутник пролетает над центральной приемной станцией. Центральная станция, которая также используется для отправки команд на спутник, имеет такой же диапазон радиовидимости, что и любая локальная станция; а если она расположена на высоких широтах, то она может получать данные со многих орбит. Как показано в таблице 2.4, большинство солнечно-синхронных орбит проходят менее чем в 10° от полюса, так что центральная станция, расположенная на широте, к примеру около 80° , будет пересекать все орбиты и обеспечит прием глобальных данных. Сбор данных по принципу «хранение и сброс» данных имеет преимущество в том, что позволяет восстанавливать данные для всего земного шара, однако он имеет также ряд недостатков:

- а) доступ к данным обеспечивается медленнее, поскольку задержка складывается из времени, которое необходимо для прохождения всей орбиты (до 100 мин); для получения данных на центральной станции (около 10 мин); их ретрансляции на центральный пункт обработки данных (около 10 мин), а также для перераспределения и доведения данных до абонентов (около 10 мин). Как следствие, общая задержка в доступности данных составляет 2–3 часа;
- б) спутник должен передавать данные, накопленные за одну орбиту (около 100 мин) в течение времени, проведенного в пределах зоны радиовидимости центральной станции (примерно 10 мин). Поэтому скорость передачи данных и ширина полосы должны быть на один порядок величины больше, чем при прямом считывании данных, что сильно влияет на стоимость, размеры и сложность станции. Такой режим передачи данных соответствует требованиям спутникового оператора, но обычно не удобен для отдельного пользователя;

- с) существуют приборы с такой высокой скоростью передачи данных, что они не могут в полном объеме храниться на борту спутника: может потребоваться отбор данных, подлежащих хранению, либо за счет понижения разрешения, либо путем предварительного отбора кадров (например, локальный охват района (ЛОР) — режим на полярно-орбитальных спутниках НУОА для наблюдения за окружающей средой (POES)).

Если не налажено получение данных на локальном уровне в реальном масштабе времени, то данные, которые собирает центральный пункт обработки данных, должны быть ретранслированы пользователям, как правило, после предварительной обработки. В случае геостационарных спутников ретранслятор на том же спутнике может быть использован для ретрансляции данных на локальные станции пользователей.

Для спутников, находящихся на НОО, в промежутке между двумя крайними ситуациями (прямое считывание, позволяющее иметь данные над ограниченным районом в реальном масштабе времени, или хранение до момента сброса глобальных данных с задержкой 2–3 часа) существуют альтернативные или взаимодополняющие схемы восстановления данных, которые могут использовать:

- а) несколько станций с передачей данных «вниз», разбросанных по земному шару, например, по одной станции вблизи каждого полярного региона; это позволяет сократить время хранения данных на борту космического аппарата;
- б) сеть станций прямого считывания, разбросанных по земному шару, каждая из которых принимает данные по ограниченному району и ретранслирует их в центры данных, уменьшая тем самым задержку в доступности данных до нескольких десятков минут, правда при этом не обязательно обеспечивается глобальный охват;
- с) спутник ретрансляции данных, который получает данные в реальном режиме времени от платформ наблюдения и ретранслирует их в центральный пункт обработки данных, что уменьшает задержку в наличии данных до нескольких минут.

Своевременность восстановления данных являются важнейшим вопросом для оперативных спутников; это особенно актуально для метеорологии, в силу одновременно существующих требований к оперативности и глобальному охвату. Для научно-исследовательских и опытно-конструкторских применений требование к оперативности не такое строгое, поэтому режим хранения данных до момента сброса является стандартной практикой, которая также предусматривает наличие эффективных средств архивирования и поиска, что предполагает высокий уровень сопровождения данных.

2.3.1.6 Услуги по ретрансляции данных

Помимо предоставления данных наблюдений Земли с платформы на орбите, спутники могут поддерживать другие виды обслуживания, действуя как ретрансляторы телесвязи. Наиболее часто предоставляются следующие виды услуг:

- а) сбор данных *in situ* от платформ, размещенных на поверхности земли, воздушном судне, шаре-зонде, буях, судах или даже мигрирующих животных. Платформа сбора данных (ПСД) может передавать данные непрерывно или через установленные интервалы, или при получении запроса со спутника. Мобильные платформы могут быть обнаружены со спутника, если он находится на НОО. Спутники на ГСО могут обслуживать ПСД в пределах их прямой видимости (региональные) или ПСД, переносимые мобильными платформами (корабли, воздушные суда и т. д.), которые перемещаются в зоне обзора различных спутников на ГСО (международных);
- б) поисково-спасательные операции, в ходе которых спутники обнаруживают сигналы бедствия от малогабаритных передающих устройств, имеющихся у нуждающихся в помощи, и затем ретранслируют просьбы о помощи в один из центров всемирной поисково-спасательной сети. Поисково-спасательные функции выполняются

рядом действующих метеорологических спутников, находящихся на НОО и ГСО. Обслуживание, предоставляемое НОС, называется Спутниковая поисково-спасательная система слежения (СПАСАТ), в то время как обслуживание на основе ГСО называется Геостационарный ретранслятор поисково-спасательной службы (ГЕОСАР);

- c) ретрансляция метеорологической информации от метеорологических центров конечным пользователям в режиме радиовещания или выбранным центрам в зоне обзора спутника на ГСО. Функция связи «наверх» может выполняться центральным узлом системы или быть передана вспомогательным станциям, находящимся недалеко от центра производства информации, имеющего оборудование для передачи сигналов с земли на спутник.

2.3.2 Наземный сегмент

В наземный сегмент спутниковой системы входят:

- a) центральная станция спутникового управления и сбора глобальных данных;
- b) периферийные станции для приема данных;
- c) центры управления полетами и операциями;
- d) центры обработки и архивирования данных;
- e) системы распространения данных и продукции.

2.3.2.1 Центральная станция управления и сбора глобальных данных

Этот компонент наземного сегмента может быть в широком смысле обозначен как станция управления и сбора данных (СУСД). Типичными задачами СУСД являются:

- a) получение последовательности команд от центра управления полетами и передача команд на спутник (в отношении конфигурации полезной нагрузки, конфигурации спутников, контроля орбиты и т.д.);
- b) прием телеметрических данных со спутника (для ориентации и определения орбиты, состояния спутника и полезной нагрузки и т. д.) и их незамедлительная передача в центр(ы) управления полетом;
- c) прием геофизических и вспомогательных данных (связанных с проверкой функционирования, калибровкой и т.д.) и их передача в центры обработки и архивации данных;
- d) дополнение полученных потоков данных информацией о точном времени и элементах орбиты.

Геостационарные спутники могут иметь только одну СУСД. Для спутниковых систем на околополярной орбите можно избежать слепых орбит путем размещения СУСД на очень высокой широте (например, Свальбард на 78° с.ш.). Для того, чтобы улучшить оперативность доступа к данным наблюдений, можно задействовать вспомогательные станции (например станция в Антарктике). Для орбит с низким наклоном необходима целая сеть СУСД, одна из которых будет главной СУСД.

СУСД использует для управления спутниками частоты в S-диапазоне (около 2 100 МГц). S-диапазон почти не чувствителен к погоде и не настолько критичен для точности наведения. Для приема геофизических данных используется L-диапазон (около 1 700 МГц),

если скорость передачи данных менее 10 Мбит/с, или же X-диапазон (около 8 ГГц) при скорости передачи данных до 100 Мбит/с, или K_a-диапазон (около 26 ГГц) при скорости передачи данных в сотни Мбит/с.

2.3.2.2 **Центры управления полетами и операциями**

Эти компоненты в общем плане могут называться центрами управления полётами (ЦУП). В их задачи входит:

- a) прием информации о спутнике, полезной нагрузке и текущем положении орбиты из СУСД и (в отношении орбиты только) с других станций, измеряющих дальность;
- b) сбор требований к конфигурации полезной нагрузки, планированию последовательности измерений, поступающих из центров обработки и архивации данных и от других пользователей, уполномоченных на внесение заданий в план полета спутника;
- c) анализ информации о спутнике, полезной нагрузке и состоянии орбиты, а также требований к конфигурации полезной нагрузки/программы полета; подготовка отчетов мониторинга работоспособности приборов; разработка плана операций и передача команд в СУСД для их дальнейшей передачи на спутник;
- d) предоставление в центры обработки и архивации данных дополнительной информации, которая касается обработки данных и была получена в ходе деятельности по управлению операциями, полезной нагрузкой или программой полета (включая точное определение орбиты, изменения в ориентации спутника и состоянии полезной нагрузки).

Центры управления полетами тесно связаны с пользователями, центрами практического применения и научными коллективами. ЦУП тесно связаны с СУСД и подразделениями, отвечающими за разработку спутника. В их распоряжении также имеется вся необходимая информация об особенностях проекта спутника. Эти два центра часто совмещены, хотя и не обязательно, и по возможности имеют поддержку со стороны резервного центра.

2.3.2.3 **Центры обработки и архивации данных**

Эти компоненты отвечают за:

- a) прием геофизических, калибровочных и выборочных дополнительных данных от СУСД;
- b) прием дополнительных данных об орбите, спутнике и полезной нагрузке от ЦУП;
- c) мониторинг калибровки приборов и выполнение взаимной калибровки, по мере необходимости;
- d) создание и контроль качества различной продукции;
- e) архивирование всей продукции;
- f) распространение выборочной продукции;
- g) анализ программы полета и состояния полезной нагрузки, и требований к планированию программы полета;
- h) передача в ЦУП требований, относящихся к полезной нагрузке и управлению программой полета.

Созданием основных видов продукции обычно занимается спутниковый оператор в центральном учреждении. Внешние специализированные центры могут дополнять эти виды продукции путем обработки прочих видов конкретной продукции.

Архивация спутниковых данных требует поддержания высоких уровней доступности аппаратного обеспечения для внесения, обработки и хранения данных, а также услуг обнаружения и извлечения, при этом должна быть предусмотрена возможность долговременного сохранения данных на протяжении десятилетий. Данные должны быть связаны с соответствующими метаданными, содержащими всю информацию, необходимую для использования и оценки данных. Полные, стандартизированные метаданные, а также стандартизированные и функционально совместимые в мировом масштабе системы каталогов позволяют расширить возможности поиска данных до всемирного масштаба в рамках Информационной системы ВМО.

2.3.2.4 ***Распространение данных и продукции***

В зависимости от объемов данных и требований оперативности информации существуют несколько методов получения доступа к данным и продукции:

- a) Прямое получение данных со спутника (когда есть такая возможность, особенно в случае с низкоорбитальными спутниками). Это обеспечивает наилучшую оперативность, но предполагает способность технических средств получать необработанные данные на соответствующей станции приема и обеспечивать их предварительную обработку при помощи соответствующего пакета программного обеспечения.
- b) Повторная передача данных со спутника в режиме времени, близком к реальному, после предварительной или полной обработки на земле. Для спутников, находящихся на ГСО, ретрансляция может осуществляться тем же самым спутником. Сегодня ретрансляция успешнее всего осуществляется по каналам коммерческих спутников телесвязи, таких как система GEONETCast, которая состоит из трех скоординированных обслуживающих сервисных центров: EUMETCast (Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников), CMACast (Китайского метеорологического управления) и GEONETCast-Americas (НУОА). При использовании такого подхода услуги по рассылке могут быть оптимизированы в рамках наземного сегмента с учетом различных существующих программ и источников продукции, независимо от проектных ограничений любого конкретного спутника.
- c) Повторная передача данных со спутника в режиме времени, близком к реальному, через специализированные сети, такие как Глобальная система телесвязи ВМО.
- d) Активный поиск информации в автономном режиме с использованием функции поиска данных FTP из центров данных, особенно из архивов.

Распространение данных и продукции может регламентироваться определёнными условиями, в зависимости от статуса и политики в области данных космического агентства, отвечающего за программу (оперативную, НИОКР и коммерческую), а также от характера их использования. Доступ к услугам повторной передачи данных обычно зашифрован и требуется регистрация, даже если оплата за это не взимается.

2.3.2.5 ***Принимающие станции пользователей***

Для того, чтобы более успешно использовать передачу данных со спутников в режиме реального времени или близком к реальному времени, создаются станции пользователей. В зависимости от доступности спутника и потребностей пользователей это могут быть:

- a) станции высокоскоростного приема данных для получения всей информации, которая может быть предоставлена в открытом доступе или по соглашению с владельцем спутника;
- b) станции низкоскоростного приема данных для отбора данных, имеющих меньший объем или более низкое качество;
- c) принимающие терминалы коммерческих спутников телесвязи, используемые для распространения данных после предварительной обработки или обработки в центре обработки и архивации данных.

Частоты, которые используются станциями высокоскоростного приема данных, лежат в L-диапазоне (примерно 1 700 МГц), если скорость передачи данных ниже около 5 Мбит/с или в X-диапазоне (около 8 ГГц) для скоростей передачи данных до 100 Мбит/с. Станции низкоскоростного приема данных используют относительно низкие частоты (L-диапазон: около 1 700 МГц для ГСО- и СВЧ-диапазонов: около 137 МГц для НОО), которые могут использоваться на мобильных станциях (таких как суда). Терминалы коммерческих спутников телесвязи используют K_u -диапазон (около 11 ГГц) или C-диапазон (около 3,8 ГГц).

2.3.2.6 Уровни обработки продукции

Результаты спутниковых наблюдений извлекают из необработанных данных, полученных при помощи приборов, на основе использования цепочки обработки данных. Обычно для обозначения используют различные уровни обработки данных, конкретные формулировки которых зависят от рассматриваемого прибора. В таблице 2.11 представлено общее описание этих уровней обработки данных.

Таблица 2.11. Общая характеристика уровней обработки данных (требуется адаптация к конкретному прибору)

Уровень	Описание	
0	Данные прибора или дополнительные данные, восстановленные из необработанных спутниковых данных после удаления артефактов связи.	
1	Данные прибора извлечены, с полным исходным разрешением и информацией о калибровке.	1a (для НОО) или 1,0 (для ГСО): материалы калибровки и определение местоположения прикладываются, но не применяются.
		1b (для НОО) или 1,5 (для ГСО): калибровка и определение местоположения применяются.
		1c, 1d, и т.д.: по выбору для конкретных приборов.
2	Геофизическая продукция, полученная от одного прибора в исходной проекции.	
3	Геофизическая продукция от одного прибора, отображаемая в равномерном пространстве и масштабах временных отсчетов и, по возможности, полученная на нескольких орбитах (для НОО) или для различных временных периодов (для ГСО). Необратимый процесс вследствие процедур повторной выборки.	
4	Смешанная продукция нескольких датчиков и/или нескольких спутников, или результат модельного анализа.	

Уровень 0. Обработка данных осуществляется из потока необработанных данных путем удаления артефактов связи (таких как кадры синхронизации и заголовки сообщений) и добавления всех необходимых вспомогательных данных, включая информацию о проверке состояния систем и приборов и информацию, добавленную станцией о времени и слежении. Данные уровня 0 подлежат долговременной архивации для того, чтобы была возможность повторной обработки с использованием более совершенной модели прибора (к примеру, улучшение калибровки или географической привязки).

Уровни 1a или 1.0. Данные представляют собой приборные файлы (значения счета) в исходном виде, полученном прибором, с приложенной (но без применения) деформационной матрицей или алгоритмом для географической привязки, а также

с калибровочными коэффициентами. Процесс с уровня 0 до уровня 1a/1.0 полностью обратимый. Данные уровня 1a/1.0 обычно подлежат долговременной архивации, хотя в принципе они могут быть воспроизведены, если данные уровня 0 были заархивированы.

Уровни 1b или 1.5. Данные состоят из откалиброванных, совместно зарегистрированных данных с определением географического местоположения в физических единицах (обычно интенсивность излучения), по-прежнему в исходном виде, полученном прибором. Процесс от уровня 1a/1.0 до уровня 1b/1.5 не является обратимым из-за усечения, дискретизации и повторной выборки. Хотя уровень 1b/1.5 может в любом случае быть получен обработкой из уровня 1a/1.0 или уровня 0, работа по обработке столь значительна, что в основном данные уровня 1b/1.5 подлежат долговременной архивации.

Уровень 1с. Данные обрабатываются из данных уровня 1b определённых приборов для того, чтобы позволить их использование конечными пользователями. Процесс может быть полностью обратимым (например спектры интерферограмм Фурье-преобразования) или в то же время нет (например аподизированные спектры). Как правило, осуществляется долговременная архивация. Для некоторых приборов могут быть определены дополнительные шаги уровня 1 (1d, 1e и т. д.) (например добавление метки облака).

Обработка данных уровня 0 и уровня 1 осуществляется спутниковым оператором. В случае прямого считывания спутниковый оператор обычно обеспечивает доступность пред-процессингового программного обеспечения уровня 0 и уровня 1 для локальных пользователей данных.

Продукция уровня 2 генерируется из данных уровня 1 путем применения алгоритмов с ограниченным использованием внешней информации. Информация о качестве данных предоставляется дополнительно. Эта продукция генерируется в исходной проекции, полученной прибором, и обычно подлежит долговременной архивации.

Продукция уровня 3 генерируется путем составления последовательности из продукции уровня 2 с последовательных орбит (при НОО) или для последовательных моментов времени (при ГСО). Возможные пробелы в последовательности могут быть заполнены интерполяцией. Вследствие процедур повторной выборки, вытекающей из картирования в однородном пространстве и временных сетках, уровень 3 является необратимым процессом. Продукция генерируется не в реальном времени спутниковыми операторами или конечными пользователями; она обычно подлежит долговременной архивации.

Продукция уровня 4 создается путем объединения данных от различных приборов одного или различных спутников, либо от других источников данных, или путем усвоения в модели. В продукции уровня 4 вклад отдельно взятого спутникового прибора может быть трудно распознаваем.
