

ГЛАВА 3. ПРИБОРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В настоящей главе представлен обзор основных принципов приборов. В нем приводятся общие технические характеристики моделей типовых приборов наблюдения за Землей.

3.1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ

Для наблюдения за Землей используются различные приборы и принципы зондирования. Главными рассматриваемыми характеристиками в данной главе являются:

- a) сканирование, полоса захвата и цикл наблюдения;
- b) спектральный диапазон и разрешение;
- c) пространственное разрешение (IFOV, пиксель, модуляционная передаточная функция (MTF));
- d) радиометрическое разрешение.

3.1.1 Сканирование, полоса захвата, цикл наблюдения

Наиболее важной характерной особенностью прибора является то, каким образом он сканирует местность для получения необходимых данных наблюдений. Это зависит от типа орбиты (низкая околоземная орбита или геостационарная орбита), контроля ориентации платформы (вращение, трехосная стабилизация), а также в некоторых случаях от конкретного вида производимых измерений. В настоящей главе будут описаны только наиболее распространенные методы сканирования.

Определяющим условием для сканирования является необходимость вести съемку участка непрерывно (получение изображений) или выборочно (зондирование). В обоих случаях может использоваться похожий режим сканирования. Однако, только получение изображения требует постоянного покрытия местности, а зондирование допускает выборку с пропусками.

В случае космического аппарата на НОО двухмерное сканирование земного участка может быть основано на использовании движения спутника вдоль трассы. Тогда сканирование поперек трассы может быть обеспечено вращающимся сканирующим зеркалом (рисунок 3.1). Скорость вращения синхронизируется с движением спутника таким образом, что линии изображения поперек трассы перекрываются.

В случае ГСО нет движения спутника по отношению к поверхности Земли. Два направления сканирования должны быть поэтому созданы прибором или вращением спутника. На рисунке 3.2 предполагается, что спутник стабилизирован по вращению: западно-восточное сканирование осуществляется посредством вращения спутника, в то время как северно-южное сканирование — шаговым двигателем. Для трехосно-стабилизированной платформы прибор должен производить сканирование как с запада на восток, так и с севера на юг.

С появлением матричных детекторов возникли новые возможности сканирования. На низкой околоземной орбите (НОО) линейная антенная решетка может быть расположена поперек трассы спутника и будет сканировать участок местности без какого бы то ни было механического движения (режим сканирования «pushbroom»). По другой схеме линейная антенная решетка может быть расположена параллельно трассе и тогда механическое сканирование поперек трассы будет сканировать несколько линий параллельно (режим сканирования «whiskbroom»). С геостационарной околоземной орбиты сканирование

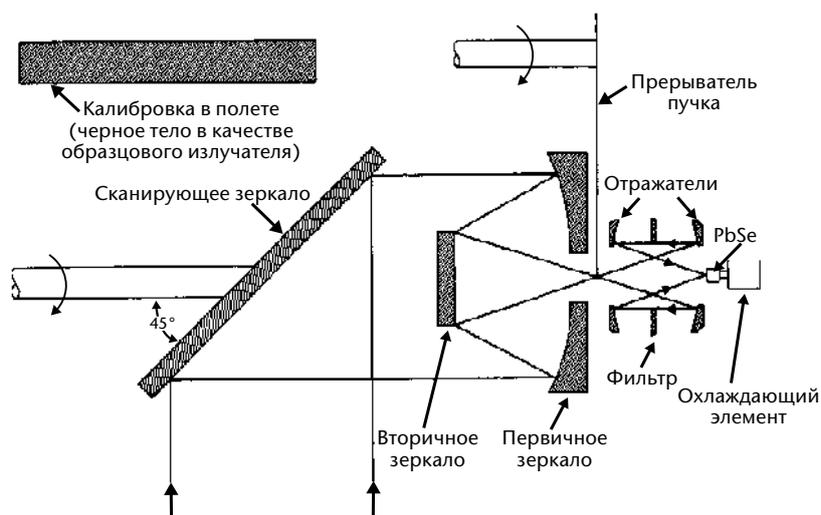


Рисунок 3.1. Типовая схема сканирующего радиометра на НОО

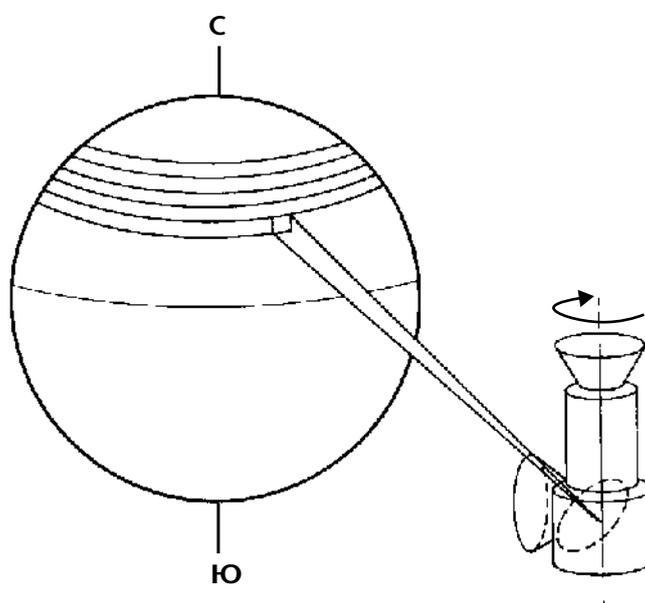


Рисунок 3.2. Схема сканирования с геостационарного спутника со стабилизацией по вращению

поперек трассы в настоящее время является стандартным методом (например, SEVIRI на спутнике Meteosat второго поколения сканирует три линии параллельно для ИК-каналов и девять линий для ВИД-канала высокого разрешения).

Механизмом, очень удобным для измерений, чувствительных к поляризации, является коническое сканирование (рисунок 3.3). В этой геометрии угол падения является постоянным. Поэтому эффект поляризации не меняется вдоль линии сканирования (т. е. дуги). В то время как при сканировании поперек трассы угол падения меняется вдоль линии сканирования при движении из надира к краю изображения. Такое постоянство эффекта поляризации по изображению очень важно для МКВ измерений в каналах окна, где излучение, отраженное от таких элементов как поверхность океана, сильно поляризовано. Измерение дифференциальной поляризации дает важную информацию, которую было бы очень трудно использовать, если угол падения изменялся бы по всему участку изображения. Другой интересной особенностью конического сканирования является то, что разрешение остается постоянным по всему изображению.

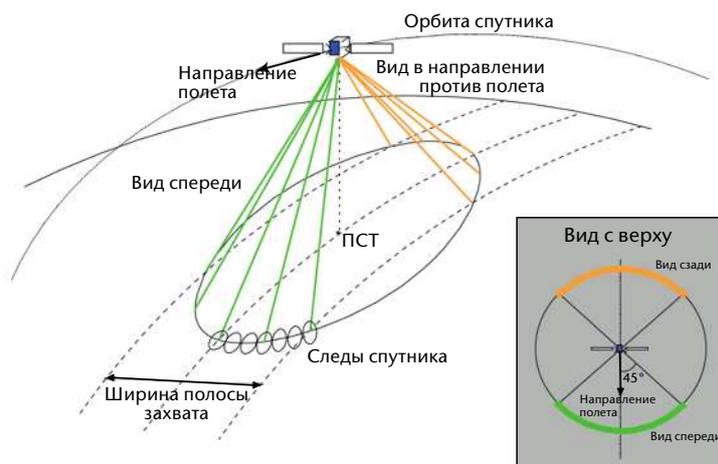


Рисунок 3.3. Геометрия конического сканирования

Недостаток конического сканирования заключается в том, что при выбранном угле падения поле обзора, как правило, не достигает горизонта. Например, полоса захвата с высоты орбиты 800 км составляет ~1 600 км для типичного зенитного угла 53° , который оптимален для улучшения информации о дифференциальной поляризации в МКВ-диапазоне. В отличие от этого полоса захвата прибора с поперечным сканированием приближается к 3 000 км в предположении диапазона зенитного угла $\pm 70^\circ$, как следует из настоящего тома, глава 2, таблица 2.1.

Полоса захвата является важной характеристикой прибора на НОО, поскольку она определяет цикл наблюдения. В главе 2, таблице 2.2 настоящего тома отмечалось, что для солнечно-синхронной орбиты на высоте 800 км один прибор с полосой захвата как минимум 2 800 км обеспечивает одно глобальное покрытие в день при измерениях, проводимых только в дневное время (например, КВ-датчики), или два глобальных покрытия в день при измерениях, осуществляемых днем и ночью (например, ИК- или МКВ-датчики). Приборы микроволнового конического сканирования обычно позволяют получать одно глобальное покрытие в день.

Оценка цикла наблюдений

Порядок величины цикла наблюдений (Δt , в днях) для данной полосы захвата может быть оценен путем простых расчетов. Учитывая протяженность экватора (~40 000 км), число орбит в день (~14,2) и при допущении, что не существует значительного перекрытия между соседними полосами захвата на экваторе, расчет состоит в следующем:

- для дневных и ночных датчиков (ИК- или МКВ-диапазоны), работающих как на восходящих, так и нисходящих витках: $\Delta t = 1\,400/\text{полоса захвата}$ (например, для микроволнового конического сканера с полосой захвата 1 400 км: $\Delta t = 1$ день);
- для чисто дневных датчиков (КВ), работающих только на одном витке за орбитальный период: $\Delta t = 2\,800/\text{полоса захвата}$ (например, наблюдение за состоянием суши в видимом диапазоне с полосой захвата 180 км: $\Delta t = 16$ дней).

Что касается приборов, не производящих сканирования поперек трассы, таких как альтиметры и радиолокаторы обнаружения осадков, для них понятие полосы захвата не применимо. В таких случаях интервал выборки поперек трассы Δx на экваторе используется вместо понятия «полосы захвата», входящей в представленные выше

отношения. Полезно также оценить глобальную среднюю величину данного интервала выборки. Этот интервал представлен несколько другим отношением вследствие более тесного расположения орбит на более высоких широтах:

- a) при среднем интервале выборки поперек трассы Δx характерное время, необходимое для глобального охвата, составляет:
 - i) $\Delta t = 900/\Delta x$ для датчиков, работающих в дневное и ночное время (например, радиолокационный альтиметр — 2 (РА-2) на спутнике для изучения окружающей среды (Envisat): $\Delta x = 26$ км, $\Delta t = 35$ дней);
 - ii) $\Delta t = 1\,800/\Delta x$ для чисто дневных датчиков (например, спектральный радиометр для исследования обратного рассеяния солнечного УФ-излучения (СБУФ) НУОА: $\Delta x = 170$ км, $\Delta t = 11$ дней);
- b) соответственно, за интервал времени Δt (например, период повторения орбиты или основной подцикл) средний интервал выборки поперек трассы записывается как:
 - i) $\Delta x = 900/\Delta t$ для датчиков, работающих в дневное и ночное время (например, альтиметр JASON: $\Delta t = 10$ дней, $\Delta x = 90$ км);
 - ii) $\Delta x = 1\,800/\Delta t$ для чисто дневных датчиков (например, СБУФ НУОА: $\Delta t = 5$ дней, $\Delta x = 360$ км).

Лимбовые зондировщики — это, как правило, устройства, не выполняющие сканирования в поперечном направлении. В предположении интервала выборки поперек трассы $\Delta x = 300$ км, что равно горизонтальному разрешению измерений, и рассматривая, например, интерферометр Михельсона для пассивного зондирования атмосферы (MIPAS), который был установлен на борту спутника Envisat, из приведенных выше соотношений получаем следующий цикл наблюдений:

$\Delta t \approx 3$ дня для датчиков, работающих в дневное и ночное время (например, MIPAS на Envisat).

Что касается приборов, обеспечивающих редкие, но равномерно распределённые наблюдения, цикл охвата или среднюю выборку можно оценить путем сравнения числа событий с их разрешением при покрытии поверхности Земли. Например, в случае радиозатмения с использованием ГСОМ + ГЛОНАСС каждый спутник способен обеспечить 1 000 наблюдений в день при характерном разрешении измерений 300 км для всей поверхности Земли 510 млн км², отсюда:

- a) время, необходимое для одного спутника, производящего 1 000 наблюдений/день: $\Delta t = 510\,000\,000/300/300/1\,000 = 5,7$ дней;
- b) число спутников, необходимых для цикла наблюдения Δt : $N = 5,7/\Delta t$ (например, для $\Delta t = 0,5$ дней, число спутников близко к 12).

Исключительный случай представляют собой приборы, использующие затменные методы (затмение Солнца, Луны, звезд). Затмение Солнца или Луны позволяет провести всего несколько измерений в день и только на больших высотах над уровнем моря дневного/ночного терминатора (Солнца) или на несколько более низких широтах (для Луны). Затмение звезд может позволить провести несколько десятков измерений в день (например, 40 измерений в целях глобального мониторинга содержания озона с помощью затменных наблюдений звезд прибором GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (мониторинг глобального содержания озона с помощью затменных наблюдений звезд)) на спутнике Envisat), равномерно распределенных по широте.

3.1.2 **Спектральный диапазон: радиометры и спектрометры**

Еще одной важной характеристикой прибора является спектральный диапазон, в котором работает прибор. Как обсуждалось в главе 2, 2.2, настоящего тома, спектральным диапазоном определяется, какие именно свойства тела можно наблюдать, включая отражательную способность, температуру и диэлектрические свойства. В спектральном диапазоне могут существовать области окон прозрачности и полосы поглощения, которые в основном соответствуют конденсированным и газообразным средам соответственно.

Спектральный диапазон может быть более широким или менее узким в зависимости от эффектов, которые необходимо усилить, или от мешающих факторов, которые необходимо устранить. Подразделы окон или полос, покрываемые прибором, называются каналами. Количество каналов зависит от того, сколько порций независимой информации необходимо извлечь из одной полосы. Если ограниченное число четко разделенных каналов достаточно для поставленной цели, то прибор может содержать только эти каналы и такой прибор называется радиометром. Если содержание информации быстро меняется с частотой по спектральному диапазону до такой степени, что каналы должны быть перекрывающимися, то такой прибор называют спектрометром.

Метод, принятый для разделения каналов или для разделения поддиапазонов спектрометра, является основной отличительной особенностью прибора. Фактически существует две возможности физически разделить два канала на отдельные детекторы (или детекторные матрицы) и связанные с ними системы фильтрации. Во-первых, луч можно сфокусировать на диафрагме, ограничивающей поле зрения, и разложить его на две полосы при помощи дихроичного зеркала. Преимущество в этом случае заключается в том, что два канала смотрят на одно и то же поле зрения (которое может быть матрицей IFOV), что позволяет обеспечить сорегистрацию. Однако, если две длины волны расположены слишком близко друг к другу (например, расщепленное окно), то дихроичное зеркало не может разделить их достаточно четко. Второе решение — дать возможность всему лучу создать изображение в фокальной плоскости и настроить детекторы (или детекторные матрицы) с различными фильтрами (тем самым идентифицировать различные каналы) в различных частях фокальной плоскости (разделение в поле). Это гораздо более простое решение, однако каждый канал смотрит с разным IFOV, и, следовательно, могут возникнуть проблемы с одновременной регистрацией. Возможны и комбинированные решения: на рисунке 3.4 показано решение, реализованное во вращающемся улучшенном формирователе изображения в видимом и инфракрасном диапазоне (SEVIRI) на спутнике Meteosat второго поколения для разделения восьми ИК-каналов. Каждый канал находится в поле зрения трех детекторов. Современные матрицы детекторов гораздо больше по размеру, чем они были в прошлом, и, следовательно, гораздо удобнее проводить разделение в месте эксплуатации.

Спектрометры обеспечивают непрерывную спектральную выборку в спектральном диапазоне или в нескольких спектральных поддиапазонах. (Эти поддиапазоны иногда называют каналами, но не следует путать их с каналами радиометра). Существует несколько видов радиометров, наиболее простым из которых является призма. К числу других относятся решетчатые интерферометры; наиболее распространенными являются интерферометры Михельсона и Фабри-Перо. На рисунке 3.5 показана схема интерферометра Михельсона.

Для спектрометра спектральное разрешение является важной характеристикой. Для интерферометра Михельсона разрешение определяется максимальной длиной разности оптических путей (OPD) между лучами, отраженными между неподвижно закрепленным и перемещающимся зеркалами. Что касается неаподизированного разрешения, определяется формулой:

$$\Delta\nu = 1/\text{OPD}_{\max} \quad (3.1)$$

Например, в IASI, приборе, установленном на спутнике Metop, смещение подвижного зеркала составляет ± 2 см. Следовательно $\text{OPD}_{\max} = 4$ см и $\Delta\nu = 0,25 \text{ см}^{-1}$. Если

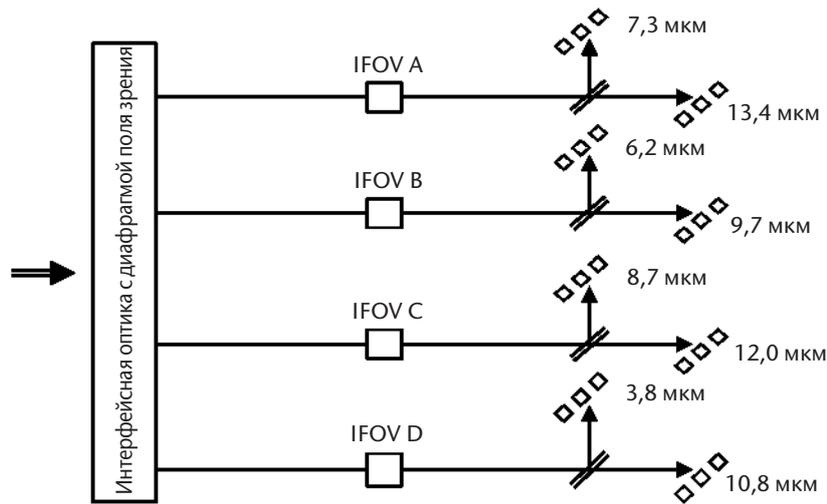


Рисунок 3.4. Схема разделения каналов в SEVIRI на борту Meteosat второго поколения

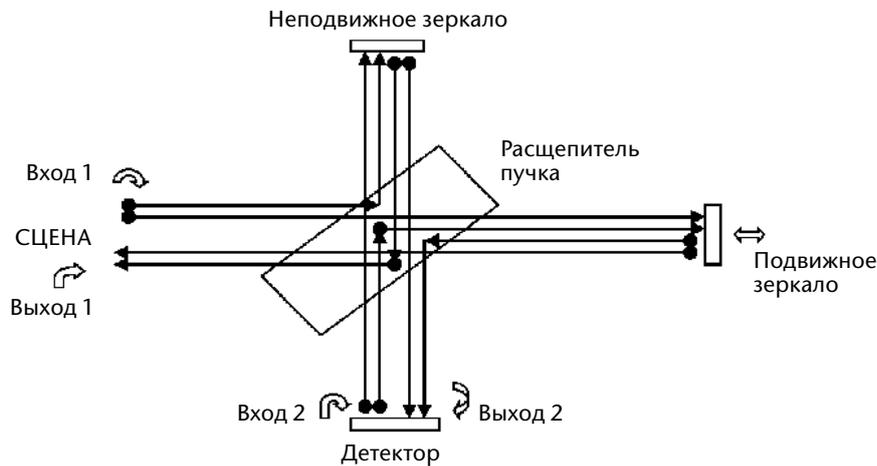


Рисунок 3.5. Схема интерферометра Мичельсона с двумя входами и двумя выходами

требуется тонкий анализ спектра (например, для обнаружения линий малых газовых составляющих), то необходима аподизация, подразумевающая фактор ~ 2 . В таком случае аподизированное разрешение $\Delta\nu = 0,5 \text{ см}^{-1}$.

Для решетчатого спектрометра разрешение определяется количеством штрихов N и применяемым порядком дифракции m . Разрешающая способность $\lambda/\Delta\lambda$ записывается как:

$$\lambda/\Delta\lambda = m \cdot N \tag{3.2}$$

Для интерферометра Мичельсона спектральное разрешение остается постоянным с изменением длины волны. Для решетчатого спектрометра, между тем, разрешающая способность постоянна, и спектральное разрешение меняется с длиной волны. В случае если решетчатый спектрометр должен охватывать широкий спектральный диапазон, этот диапазон необходимо разбить на поддиапазоны, использующие различные порядки дифракции m . Разрешающая способность может, как следствие, меняться в зависимости от поддиапазона.

Для радиометра количество каналов и их ширина полосы пропускания играют одинаково важную роль для спектрального разрешения спектрометра.

3.1.3 **Пространственное разрешение (мгновенное поле зрения, пиксель и функция рассеяния точки)**

В обиходе пространственное разрешение представляет собой совокупность различных характеристик.

IFOV — возможно самое близкое понятие к тому, что обычно подразумевают под разрешением. В оптических приборах (т. е. приборы для измерений в КВ- и ИК-диапазонах) оно определяется апертурой пучка и габаритами детектора. В МКВ-диапазоне оно определяется размером антенны.

В оптических системах размер IFOV проектируется, главным образом, из энергетических соображений (см. 3.1.4). IFOV может определяться формой детектора; и хотя она может быть квадратной, контур IFOV не является достаточно четким. Фактически изображение точки представляет собой дифракционную фигуру, которую называют функцией рассеяния точки (рисунок 3.6). IFOV является сверткой функции рассеяния точки и пространственным откликом детектора.

Энергия, поступающая на детектор, также определяется временем интегрирования последовательных показаний сигнала. Во время сканирования изображения положение линии видимости меняется на величину, которую называют расстоянием выборки. При формировании картинки в растровом двумерном виде прямоугольные элементы, соответствующие в x-направлении расстоянию дискретизации, а в y-направлении движению спутника на протяжении временного расстояния от одной линии до другой (или шагу смещения в направлении север-юг с ГСО), называются пикселем (элементом картинки). Несмотря на то, что пиксель часто путают с разрешением, поскольку пользователь непосредственно воспринимает размер элемента картинки, а IFOV — это технический параметр, не видимый для пользователя, неправильно думать, что разрешение может быть улучшено путем уменьшения времени интегрирования, поскольку время интегрирования должно быть подходящим для обеспечения радиометрической точности (см. 3.1.4).

Существует определенный баланс между размером IFOV и размером пикселя. Для «идеального» формирователя изображений дискретизация осуществляется таким образом, чтобы расстояние выборки было равно размеру IFOV. Это означает, что мгновенные поля зрения являются непрерывными и перекрывающимися по всему изображению. Или же изображение может характеризоваться сверхдискретизацией (пиксель < IFOV, т. е. существует перекрытие между последовательными IFOV) или

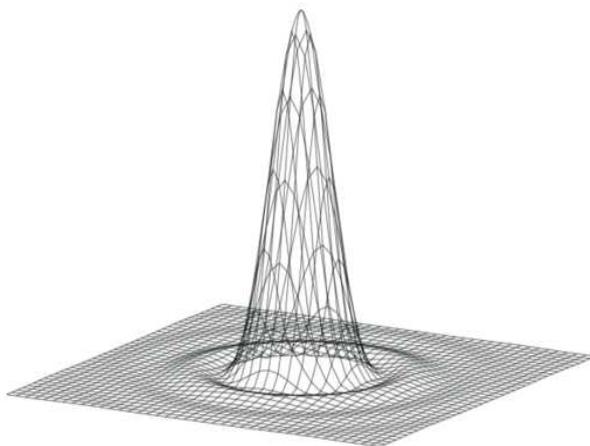


Рис. 3.6. Вид функции рассеяния точки

субдискретизацией (пиксель > IFOV, т. е. существуют пропуски между последовательными IFOV). Сверхдискретизация полезна для уменьшения эффектов наложения спектров (т. е. ненужного усиления высоких пространственных частот в результате отражения от границы). Субдискретизация может быть необходимой, когда требуется больше энергии для обеспечения необходимой радиометрической точности. Приведем примеры взаимосвязи между IFOV и пикселем:

- а) Усовершенствованный радиометр с очень высоким разрешением (AVHRR) — IFOV: 1,1 км; пиксель: 1,1 км вдоль трассы, 0,80 км вдоль скана (сверхдискретизация);
- б) SEVIRI — IFOV: 4,8 км; пиксель: 3,0 км поперек и вдоль скана (сверхдискретизация).

MTF тесно связана с понятиями IFOV и пикселя. Она даже более непосредственно связана с размером «L» первичной оптики прибора. MTF соответствует возможности прибора корректно реагировать на отклик на изменение амплитуды объекта. Она является отношением между наблюдаемой амплитудой и истинной амплитудой сигнала от объекта в синусоидальном представлении. Наблюдаемая амплитуда ослабляется вследствие влияния таких факторов как дифракция от оптической апертуры; «окно», обусловленное детектором, и нечеткость изображения электроники. Эффект интегрирования излучения по (квадратичному) детектору дает вклад в MTF:

$$MTF_{\text{window}}(f) = \text{sinc}(\pi \cdot \text{IFOV} \cdot f), \quad \text{при } f = 1/(2 \Delta x) (\text{km}^{-1}) \quad \text{и} \quad \text{sinc } y = \frac{\sin y}{y} \quad (3.3)$$

Это показывает, что, для $\Delta x = \text{IFOV}$, $MTF = \text{sinc}(\pi/2) = 2/\pi$. Поэтому даже у «идеального» формирователя изображений MTF меньше единицы. Значение $2/\pi \approx 0,64$ соответствует площади половины синусоиды, вписанной в квадрат. Понятие MTF следует рассматривать в тесной связи с понятием радиометрической точности: она определяет на какой пространственной длине волны два элемента фактически можно разрешить, если их излучение различается на обнаруживаемый минимум. Конечно, два элемента, излучение которых различается на значительно большую величину, чем обнаруживаемый минимум, могут быть распознаны, даже если они гораздо меньше. Однако, если они так малы, что $\text{IFOV}/2$, то $MTF = 0$, и их невозможно распознать никаким образом ($f = 1/\text{IFOV}$ называется частотой среза).

Интересно отметить, каким образом MTF_{window} меняется на различных длинах волн с точки зрения IFOV (в случае, если пространственная длина волны равна $2 \Delta x$). Таблица 3.1 может быть получена при помощи уравнения 3.3:

Таблица 3.1. Изменение функции MTF_{window} отношения $\Delta x / \text{IFOV}$

$\Delta x/\text{IFOV}$	1/2	2/3	1	2	3	4	5	6
MTF_{window}	0	0,30	0,64	0,90	0,95	0,97	0,98	0,99

Таблица показывает, что элементы, составляющие всего две трети IFOV, могут быть разрешены, но только в том случае, если их энергетическая яркость отличается больше, чем в три раза от минимально детектируемой. Она также показывает, что элементы, которые в два раза больше IFOV, могут быть разрешены, если разница в их энергетической яркости превышает минимальное значение на 10 %.

Другой крупный вклад в MTF вносит дифракция. Отношение записывается как:

$$MTF_{\text{diffraction}} = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{f}{f_d} \right) - \frac{f}{f_d} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_d} \right)^2} \right] \quad (3.4)$$

Где $f = 1/(2 \vartheta H)$ (при H = высота спутника); ϑ = угловое разрешение (т. е. IFOV/H); $f_d = L/(\lambda H)$; L = апертура первичной оптики и отсюда $f/f_d = \lambda/(2 \vartheta L)$.

Дифракция является доминирующей, когда длина волны λ достаточно большая (как и в случае микроволн), когда оптическая апертура относительно небольшая или когда высота спутника достаточно большая (как и в случае ГСО). Величина $MTF_{diffraction} = 0,5$ имеет место при $f/f_d = 0,404$, а именно:

$$\vartheta = 1,24 \frac{\lambda}{L} \quad (3.5)$$

что соответствует классическому закону дифракции.

Таким образом, то, что обычно обозначают термином «разрешение» включает в себя, по крайней мере, три параметра. Хотя их следует рассматривать в зависимости от контекста, но в то же время каждый из них более тесно ассоциируется с различным восприятием:

- a) IFOV: невидим для пользователя; определяет радиометрический баланс изображения;
- b) пиксель: дает прямое восприятие степени детализации изображения;
- c) MTF: контролируя восстановление амплитуды, обеспечивает восприятие контрастности.

3.1.4 Радиометрическое разрешение

Несмотря на то, что пользователь вряд ли может наблюдать радиометрическое разрешение, оно является фактором, определяющим конструкцию прибора. Механизмы сканирования, спектральное разрешение, пространственное разрешение, время интегрирования и оптическая апертура — все они проектируются таким образом, чтобы были выполнены требования по радиометрическому разрешению. Радиометрическое разрешение представляет собой минимальную разницу в энергетической яркости, необходимую для различения двух объектов в двух соседних IFOV. Наблюдаемая разница является сочетанием истинной разницы интенсивности излучения двух тел (сигнал) и разницы, наблюдаемой, даже когда содержание мгновенных полей зрения одинаково (шум). Отношение сигнал/шум (ОСШ, на англ. яз. SNR) является одним из способов выражения радиометрического разрешения.

Шум зависит от нескольких факторов, как следует из формулы, представляющей радиометрические характеристики прибора:

$$NESR = \frac{2 F}{D^* \cdot \Delta\nu \cdot \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot \Delta\Omega}} \quad (3.6)$$

где:

NESP= спектральная плотность энергетической яркости, эквивалентная шуму (единицы: Вт·м⁻²·ср⁻¹ [см⁻¹]⁻¹, т.е. на единицу волнового числа);

$F = f/L$, F -число (f = фокусное расстояние системы, L = апертура телескопа);

D^* = порог обнаружения (сильно зависит от ν);

$\Delta\nu$ = спектральное разрешение (выраженное через волновое число $\nu = 1/\lambda$);

τ = пропускная способность прибора;

t = время интегрирования;

$\Delta\Omega$ = пропускная способность системы, определяемая произведением ($\pi \cdot L^2/4$) на ($IFOV^2/H^2$), где $\pi \cdot L^2/4$ = площадная апертура телескопа;

H = высота спутника;

$IFOV^2/H^2$ = телесный угол, под которым находится IFOV.

В общем случае при определении $I(\nu)$ = спектральная плотность энергетической яркости на входе прибора (единицы измерения: Вт·м⁻²·ср⁻¹ [см⁻¹]⁻¹), получаем:

$$SNR = I(\nu)/NESR \quad (3.7)$$

Для коротких волн входная спектральная энергетическая яркость — это солнечная спектральная энергетическая яркость, скорректированная на угол падения и отраженная согласно отражательной способности тела (или альбедо, если тело можно аппроксимировать как ламбертовский рассеиватель). Из уравнений 3.6 и 3.7 следует:

$$\frac{\text{SNR}}{\text{IFOV}\sqrt{\Delta\nu \cdot t}} \propto L \quad \begin{array}{l} \text{(при конкретной входной энергетической яркости } I(\nu) \\ \text{или альбедо } \rho) \end{array} \quad (3.8)$$

Это отношение в явном виде связывает параметры «ориентированные на пользователя», такие как SNR, спектральное разрешение $\Delta\nu$, IFOV и время интегрирования t с размером первичной оптики L .

Для узкополосных ИК-каналов радиометрическое разрешение обычно записывается как:

$$\text{NE}\Delta T = \frac{\text{NESR}}{dB/dT} \quad (3.9)$$

где B = функция Планка и $\text{NE}\Delta T$ = эквивалентная шуму дифференциальная температура при конкретной температуре T .

При $\text{NE}\Delta T$, формула, представляющая радиометрические характеристики 3.6, может быть переписана в следующем виде:

$$\text{NE}\Delta T \cdot \Delta\nu \cdot \text{IFOV} \cdot \sqrt{t} = \frac{4H}{\pi \cdot dB/dT} \cdot \frac{F}{L \cdot D^* \cdot \tau} \quad (3.10)$$

С левой стороны формулы 3.10 — ориентированные на пользователя параметры (радиометрическое, спектральное, горизонтальное и временное разрешения), а с правой — размерные параметры прибора (F -число, оптическая апертура, порог обнаружения и пропускная способность). Данная формула применима не во всех условиях, но полезна во многих случаях для грубого анализа. Основные отклонения случаются, главным образом, тогда, когда сам детектор является источником доминирующих помех, либо когда время отклика детектора недостаточно короткое по сравнению с располагаемым временем интегрирования. Такое обычно случается в диапазоне ДИК, однако может наблюдаться и для коротких волн, когда, например, используются микроболометры или тепловые детекторы для работы при комнатной температуре. Другими словами, D^* , который очевидно зависит от ν , может очень сильно зависеть от располагаемого времени интегрирования.

В случае широкополосных каналов концепция NESR в том виде, как она записана в уравнении 3.6, должна быть переформулирована в терминах интегрированного шума по всему спектральному диапазону, покрываемому каждым каналом. В этом случае также можно получить отношение подобное формуле 3.10:

$$\text{NE}\Delta R \cdot \text{IFOV} \cdot \sqrt{t} \propto \frac{1}{L} \quad (3.11)$$

где $\text{NE}\Delta R$ — эквивалентная шуму дифференциальная энергетическая яркость (единица измерения: Вт·м⁻²·ср⁻¹).

Ситуация будет другой в микроволновом диапазоне по двум причинам. Во-первых, вследствие необходимости ограничения размера антенны согласно закону дифракции существует связь между IFOV и оптической апертурой L :

$$\text{IFOV} = \frac{1.24 \cdot H \cdot c}{L \cdot \nu^*} \quad (3.12)$$

где ν^* = частота = c/λ , а c = скорость света.

Следовательно, остается меньше места для альтернативных параметров. Во-вторых, механизм обнаружения основан на сравнении температуры объекта с «температурой системы», которая повышается с шириной полосы пропускания. Окончательное выражение, эквивалентное уравнениям 3.8, 3.10 и 3.11 в МКВ-диапазоне можно записать следующим образом:

$$NE\Delta T \cdot \sqrt{\Delta\nu^* \cdot t} = T_{sys} \quad (3.13)$$

где T_{sys} = температура системы.

Температура системы зависит от многих технологических факторов и резко растет с увеличением частоты. С одной стороны, из уравнения 3.13 видно, что в случае МКВ-диапазона радиометрическое разрешение может лишь немного быть улучшено путем увеличения ширины полосы и времени интегрирования, поскольку оно будет увеличиваться по квадратному корню ширины полосы, времени интегрирования или их произведения. С другой стороны, из-за режима ограничения дифракции обычный способ повышения ОСШ путем увеличения оптической апертуры не применим, поскольку если диаметр антенны увеличивается, то IFOV соразмерно уменьшается (см. уравнение 3.12).

Настоящее краткое рассмотрение хорошо иллюстрирует непосредственное влияние требований пользователей и программы полета на габариты прибора. Оно также позволяет понять, насколько важно формулировать требования таким образом, чтобы оставлять возможность для оптимизации, не обязательно ухудшая при этом общие требуемые характеристики. К примеру, на основании уравнения 3.10 можно составить ряд рекомендаций, а именно:

- a) для рассматриваемого набора параметров прибора (L , F , τ и D^*) некоторые параметры, представляющие интерес для пользователя ($NE\Delta T$, $\Delta\nu$, IFOV и t), могут быть улучшены за счет некоторых других. В некоторых случаях это можно осуществить на уровне программного обеспечения во время обработки данных на земле. Однако, если по всем требованиям пользователей все параметры будут только улучшаться и никакие из них не будут ухудшаться, то потребуются увеличение габаритов прибора;
- b) влияние $NE\Delta T$, $\Delta\nu$ и IFOV на размеры прибора линейным образом связано с диаметром оптики L . Влияние t на размеры прибора (время интегрирования, обусловленное требованием охвата данной зоны в данное время) уменьшается по квадратному корню времени интегрирования. Поэтому требования по увеличению охвата и/или более частых наблюдений имеют меньшее значение, чем требования по улучшению пространственного, спектрального и радиометрического разрешений;
- c) увеличение апертуры оптики L оказывает очень большое влияние на размер прибора. Поскольку очень трудно реализовать оптические системы с F -числом $= f/L < 1$, увеличение L означает увеличение фокусного расстояния и, следовательно, увеличение объемов оптики прибора в целом. Например, уменьшение IFOV с 3 до 2 км приводит к увеличению массы прибора в два раза.

3.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ

В настоящем разделе приборы наблюдения Земли классифицированы согласно их основным техническим характеристикам. Ниже рассматриваются следующие приборы:

- a) формирователи оптических изображений среднего разрешения;
- b) формирователи оптических изображений высокого разрешения;
- c) надирные сканирующие коротковолновые радиометры;
- d) надирные сканирующие инфракрасные радиометры;
- e) микроволновые радиометры или микроволновые радиометры зондирования;
- f) лимбовые зондировщики;
- g) радиозатменные зондировщики Глобальной навигационной спутниковой системы;

- h) широкополосные радиометры;
- i) приборы для мониторинга солнечного излучения;
- j) формирователи изображений молний;
- k) радиолокаторы обнаружения облаков и осадков;
- l) радиолокационные скаттерометры;
- m) радиолокационные альтиметры;
- n) радиолокаторы с получением изображений (радиолокаторы с синтезированной апертурой);
- o) лидарная аппаратура;
- p) градиометры/акселерометры;
- q) приборы для мониторинга солнечной активности, солнечного ветра или околоземного пространства;
- r) приборы для мониторинга параметров космической среды;
- s) магнетометры или датчики электрического поля.

Большинство классов приборов подразделяются на более мелкие категории. Приводятся примеры, иллюстрирующие использование параметров приборов для конкретных применений. Полный перечень приборов для наблюдения Земли со спутников и подробное описание их характеристик имеются в базе данных ВМО о ресурсах космического базирования, доступной в режиме реального времени, с которой можно ознакомиться на веб-странице Космической программы ВМО.

3.2.1 Формирователи оптических изображений среднего разрешения

Приборы этого типа имеют следующие характеристики:

- a) функционирование в ВИД, БИК, КВИК, СВИК и ТИК областях спектра (т. е. от 0,4 до 15 мкм);
- b) дискретные каналы, от нескольких каналов до нескольких десятков каналов, разделенные дихроичными фильтрами или спектрометрами с полосой пропускания от ~10 нм до ~1 мкм;
- c) средства формирования изображений: сплошная или перекрывающаяся выборка с пространственным разрешением порядка 1 км, обеспечивающая полосу захвата от нескольких сот до нескольких тысяч километров;
- d) сканирование: обычно поперек трассы, но иногда многоугловое и иногда с несколькими поляризациями;
- e) предназначены для использования на спутниках как на НОО, так и ГСО.

В зависимости от спектральных диапазонов, количества и ширины полосы пропускания каналов и радиометрического разрешения области применения могут включать:

- a) формирование многоцелевых изображений в ВИД/ИК-диапазонах для анализа облаков, общего содержания аэрозолей, температуры поверхности моря,

покрытия океана льдом, радиационных параметров поверхности суши, индексов растительности, пожаров и снежного покрова. Наиболее важной характеристикой прибора является размер спектрального диапазона;

- b) формирование изображений цветности океана, наблюдения за аэрозолем и классификация растительного покрова. Для этих целей наиболее важной характеристикой прибора является количество каналов с узкой полосой пропускания в видимой и ближней ИК-областях спектра;
- c) формирование изображений со специальной геометрией визирования для более совершенных наблюдений за аэрозолем и перистыми облаками, получения точной температуры поверхности моря, радиационных параметров поверхности суши, включая двунаправленную функцию распределения отражения. Наиболее важными характеристиками прибора являются количество углов визирования и, если таковые имеются, поляризации.

В таблицах 3.2—3.6 приводятся в качестве примеров характеристики для трех многоцелевых формирователей изображений в ВИД/ИК-диапазонах (AVHRR/3 на НОО, MODIS на НОО и SEVIRI на ГСО), одного формирователя изображений цветности океана (MERIS) и одного формирователя изображений со специальной геометрией визирования (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances [прибор для определения поляризации и направленности отражений от поверхности Земли] (POLDER)). Экспериментальный датчик MODIS играет особую роль как многоцелевой формирователь изображений в ВИД/ИК-областях спектра. Он используется, главным образом, для определения спецификаций усовершенствованных приборов оперативного типа. В таблице 3.3 выделены основные области использования различных групп каналов.

Таблица 3.2. Пример многоцелевого формирователя изображений ВИД/ИК-областей спектра, функционирующего на НОО: AVHRR /3 на борту спутников NOAA и Metop

<i>AVHRR /3</i>	<i>Усовершенствованный радиометр с очень высоким разрешением/3</i>	
Спутники	NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18, NOAA-19; Metop-A, Metop-B, Metop-C	
Программа исследований	Формирование многоцелевых изображений в ВИД/ИК-диапазонах для анализа облаков, определения общего содержания аэрозолей, температуры поверхности моря, покрытия океана льдом, радиационных параметров поверхности суши, нормированного разностного вегетационного индекса, пожаров, снежного покрова и т. д.	
Основные характеристики	6 каналов (канал 1,6 и 3,7 альтернативные), сбалансированные ВИД, БИК, КВИК, СВИК и ТИК-диапазоны	
Метод сканирования	Поперек трассы: 2 048 пикселей в подспутниковой точке (ПТ) размером 800 м с полосой захвата 2 900 км Вдоль трассы: шесть 1,1 км линий в секунду	
Охват/цикл	Глобальный охват дважды в день (ДВ-каналы) или один раз в день (КВ-каналы).	
Разрешение (ПТ)	IFOV 1,1 км	
Технические параметры	Масса: 33 кг Мощность: 27 Вт Скорость передачи данных: 621,3 кбит/с	
<i>Центральная длина волны</i>	<i>Спектральный интервал</i>	<i>NEΔT или ОСШ при заданной входной спектральной плотности энергетической яркости</i>
0,630 мкм	0,58–0,68 мкм	9 при 0,5 % альбедо
0,862 мкм	0,725–1,00 мкм	9 при 0,5 % альбедо
1,61 мкм	1,58–1,64 мкм	20 при 0,5 % альбедо
3,74 мкм	3,55–3,93 мкм	0,12 К при 300 К

Центральная длина волны	Спектральный интервал	NEΔT или ОСШ при заданной входной спектральной плотности энергетической яркости
10,80 мкм	10,3–11,3 мкм	0,12 К при 300 К
12,00 мкм	11,5–12,5 мкм	0,12 К при 300 К

Таблица 3.3. Пример многоцелевого формирователя изображений ВИД/ИК-диапазонов, функционирующего на НОО: MODIS на борту спутников системы наблюдений за Землей (Earth Observation System (EOS)) — EOS-Terra и EOS-Aqua

MODIS	Сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения
Спутники	EOS-Terra и EOS-Aqua
Программа исследований	Формирование многоцелевых изображений в ВИД/ИК-диапазонах для анализа облаков, определения свойств аэрозолей, температуры поверхности моря и суши, покрытия океана льдом, цветности океана, радиационных параметров поверхности суши, индексов растительности, пожаров, снежного покрова, общего содержания озона, ветра по движению облаков в полярных районах и т. д.
Основные характеристики	36-канальный ВИД, БИК, КВИК, СВИК и ТИК-спектрорадиометр
Метод сканирования	Сканирование в режиме «whiskbroom»: полоса шириной 19,7 км вдоль трассы сканируется поперек трассы каждые 2,956 секунды. Полоса состоит из 16 параллельных линий, которым соответствуют 2 048 пикселей в ПТ размером 1 000 м, или осуществляется выборка 32 параллельных линий посредством 4 096 пикселей в ПТ размером 500 м, или 64 параллельных линий посредством 8 192 пикселей в ПТ размером 250 м, полоса захвата 2 330 км
Охват/цикл	Глобальный охват примерно дважды в день (длинноволновые каналы) или один раз в день (коротковолновые каналы)
Разрешение (ПТ)	IFOV: 250 м (два канала), 500 м (5 каналов), 1 000 м (29 каналов)
Технические параметры	Масса: 229 кг Мощность: 225 Вт Скорость передачи данных: 11 Мбит/с (в дневное время); 6,2 Мбит/с (в среднем)

Центральная длина волны	Спектральный интервал	NEΔT или ОСШ при заданной входной спектральной плотности энергетической яркости	IFOV в ПТ	Основное использование
0,645 мкм 0,858 мкм	0,62–0,67 мкм 0,841–0,876 мкм	128 при 21,8 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 201 при 24,7 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	250 м 250 м	Границы суши/ облаков/ аэрозоля
0,469 мкм 0,555 мкм 1,240 мкм 1,640 мкм 2,130 мкм	0,459–0,479 мкм 0,545–0,565 мкм 1,230–1,250 мкм 1,628–1,652 мкм 2,105–2,155 мкм	243 при 35,3 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 228 при 29,0 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 74 при 5,4 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 275 при 7,3 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 110 при 1,0 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	500 м 500 м 500 м 500 м 500 м	Свойства суши/ облаков/ аэрозоля
0,418 мкм 0,443 мкм 0,488 мкм 0,531 мкм 0,551 мкм 0,667 мкм 0,678 мкм 0,748 мкм 0,870 мкм	0,405–0,420 мкм 0,438–0,448 мкм 0,483–0,493 мкм 0,526–0,536 мкм 0,546–0,556 мкм 0,662–0,672 мкм 0,673–0,683 мкм 0,743–0,753 мкм 0,862–0,877 мкм	880 при 44,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 838 при 41,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 802 при 32,1 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 754 при 27,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 750 при 21,0 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 910 при 9,5 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 1 087 при 8,7 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 586 при 10,2 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 516 при 6,2 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	1 000 м 1 000 м	Цветность океана, фитопланктон, биогеохимия
0,905 мкм 0,936 мкм 0,940 мкм	0,890–0,920 мкм 0,931–0,941 мкм 0,915–0,965 мкм	167 при 10,0 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 57 при 3,6 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 250 при 15,0 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	1 000 м 1 000 м 1 000 м	Водяной пар в атмосфере
3,75 мкм 3,96 мкм 3,96 мкм 4,06 мкм	3,660–3,840 мкм 3,929–3,989 мкм 3,929–3,989 мкм 4,020–4,080 мкм	0,05 К при 0,45 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 2,00 К при 2,38 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 0,07 К при 0,67 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 0,07 К при 0,79 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	1 000 м 1 000 м 1 000 м 1 000 м	Температура поверхности/ облака
4,47 мкм 4,55 мкм	4,433–4,498 мкм 4,482–4,549 мкм	0,25 К при 0,17 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 0,25 К при 0,59 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	1 000 м 1 000 м	Температура атмосферы
1,375 мкм 6,77 мкм 7,33 мкм	1,360–1,390 мкм 6,535–6,895 мкм 7,175–7,475 мкм	150 при 6,0 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 0,25 К при 1,16 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 0,25 К при 2,18 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	1 000 м 1 000 м 1 000 м	Перистые облака Водяной пар
8,55 мкм	8,400–8,700 мкм	0,25 К при 9,58 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	1 000 м	Свойства облаков
9,73 мкм	9,580–9,880 мкм	0,25 К при 3,69 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	1 000 м	Озон
11,01 мкм 12,03 мкм	10,780–11,280 мкм 11,770–12,270 мкм	0,05 К при 9,55 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 0,05 К при 8,94 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	1 000 м 1 000 м	Температура поверхности/ облака
13,34 мкм 13,64 мкм 13,94 мкм 14,24 мкм	13,185–13,485 мкм 13,485–13,785 мкм 13,785–14,085 мкм 14,085–14,385 мкм	0,25 К при 4,52 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 0,25 К при 3,76 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 0,25 К при 3,11 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ 0,35 К при 2,08 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	1 000 м 1 000 м 1 000 м 1 000 м	Температура верхней границы облака

Таблица 3.4. Пример многоцелевого формирователя изображений ВИД/ИК-диапазонов, функционирующего на ГСО: SEVIRI на борту спутника Meteosat второго поколения

<i>SEVIRI</i>	<i>Радиометр видимого и ИК-диапазонов с улучшенным разрешением изображений для развертки</i>	
Спутники	Meteosat-8, Meteosat-9, Meteosat-10, Meteosat-11	
Программа исследований	Формирование многоцелевых изображений в ВИД/ИК диапазонах для анализа облаков, общего содержания аэрозолей, температуры поверхности моря, радиационных параметров поверхности суши, нормированного разностного вегетационного индекса, пожаров, снежного покрова, слежения за ветром по движению облаков и т. д.	
Основные характеристики	12 каналов, сбалансированные ВИД, БИК, КВИК, СВИК и ТИК-диапазоны	
Метод сканирования	Механический Вращающийся спутник Запад-восток — непрерывный режим Юг-север — шаговый режим	
Охват/цикл	Полный диск каждые 15 мин Ограниченные зоны в соответствующие более короткие интервалы времени	
Разрешение (ПТ)	IFOV 4,8 км, 3 км выборка для 11 узких каналов IFOV 1,6 км, 1 км выборка для 1 широкого ВИД канала	
Технические параметры	Масса: 260 кг Мощность: 150 Вт Скорость передачи данных: 3,26 Мбит/с	
<i>Центральная длина волны</i>	<i>Спектральный интервал (99 % энергии в пятне рассеяния)</i>	<i>ОСШ или NEΔT при заданной входной спектральной плотности энергетической яркости</i>
Не применимо (канал с широким диапазоном частот)	0,6–0,9 мкм	4,3 при 1 % альбедо
0,635 мкм	0,56–0,71 мкм	10,1 при 1 % альбедо
0,81 мкм	0,74–0,88 мкм	7,28 при 1 % альбедо
1,64 мкм	1,50–1,78 мкм	3 при 1 % альбедо
3,92 мкм	3,48–4,36 мкм	0,35 К при 300 К
6,25 мкм	5,35–7,15 мкм	0,75 К при 250 К
7,35 мкм	6,85–7,85 мкм	0,75 К при 250 К
8,70 мкм	8,30–9,10 мкм	0,28 К при 300 К
9,66 мкм	9,38–9,94 мкм	1,50 К при 255 К
10,8 мкм	9,80–11,8 мкм	0,25 К при 300 К
12,0 мкм	11,0–13,0 мкм	0,37 К при 300 К
13,4 мкм	12,4–14,4 мкм	1,80 К при 270 К

**Таблица 3.5. Пример формирователя изображения цветности океана на НОО:
MERIS на борту спутника Envisat**

<i>MERIS</i>	<i>Спектрометр с формированием изображения со средним разрешением</i>	
Спутник	Envisat	
Программа исследований	Изображение цветности океана, определение свойств аэрозоля, индексов растительности и т. д.	
Основные характеристики	15 каналов ВИД- и ближнего ИК-диапазонов с очень узкой полосой пропускания	
Метод сканирования	В режиме «pushbroom» 3 700 пикселей на линию (расщепление в 5 параллельных оптических системах) Полная полоса захвата: 1 150 км	
Охват/цикл	Глобальный охват за 3 дня в дневное время	
Разрешение (ПТ)	Базовое IFOV 300 м Более низкое разрешение для регистрации глобальных данных: 1 200 м	
Технические параметры	Масса: 200 кг Мощность: 175 Вт Скорость передачи данных: 24 Мбит/с	
<i>Центральная длина волны</i>	<i>Ширина полосы пропускания</i>	<i>ОСШ при заданной входной спектральной плотности энергетической яркости</i>
412,5 нм	10 нм	1 871 при 47,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
442,5 нм	10 нм	1 650 при 41,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
490 нм	10 нм	1 418 при 31,2 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
510 нм	10 нм	1 222 при 23,7 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
560 нм	10 нм	1 156 при 18,5 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
620 нм	10 нм	863 при 12,0 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
665 нм	10 нм	708 при 9,2 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
681,25 нм	7,5 нм	589 при 8,3 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
708,75 нм	10 нм	631 при 6,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
753,75 нм	7,5 нм	486 при 5,6 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
760,625 нм	3,75 нм	205 при 3,4 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
778,75 нм	15 нм	628 при 4,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
865 нм	20 нм	457 при 3,2 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
885 нм	10 нм	271 при 3,1 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
900 нм	10 нм	211 при 2,4 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹

Таблица 3.6. Пример формирователя изображений со специальной геометрией обзора: POLDER на борту спутника PARASOL

<i>POLDER</i>	<i>Прибор для измерений поляризации и направленности отражающей способности Земли</i>		
Спутник	Поляризация и анизотропия отражения на верхней границе атмосферы в сочетании со спутниковыми наблюдениями с помощью лидара (PARASOL)		
Программа исследований	Формирование изображений со специальной геометрией обзора для наблюдений более высокого качества за аэрозолями и перистыми облаками, определения радиационных параметров поверхности суши, включая двумерную функцию распределения отражательной способности объектов и т. д.		
Основные характеристики	Двухнаправленный обзор Мультиполяризация 9 узкополосных каналов ВИД- и ближнего ИК-диапазонов		
Метод сканирования	Матрица полупроводниковой камеры на приборах с зарядовой связью (ПЗС) 242 x 274 Полоса захвата: 2 400 км Каждый участок Земли наблюдается по мере движения спутника из разных направлений		
Охват/цикл	Почти глобальный охват каждый день в дневное время		
Разрешение (ПТ)	IFOV 6,5 км		
Технические параметры	Масса: 32 кг Мощность: 50 Вт Скорость передачи данных: 883 Мбит/с		
<i>Центральная длина волны</i>	<i>Ширина полосы пропускания</i>	<i>Число поляризаций</i>	<i>ОСШ при заданной входной спектральной плотности энергетической яркости</i>
443,5 нм	13,4 нм	–	200 при 61,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
490,9 нм	16,3 нм	3	200 при 63,2 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
563,8 нм	15,4 нм	–	200 при 58,1 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
669,9 нм	15,1 нм	–	200 при 48,7 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
762,9 нм	10,9 нм	3	200 при 38,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
762,7 нм	38,1 нм	–	200 при 38,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
863,7 нм	33,7 нм	–	200 при 30,8 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
907,1 нм	21,1 нм	3	200 при 27,5 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
1 019,6 нм	17,1 нм	–	200 при 22,6 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹

3.2.2 **Формирователи оптических изображений высокого разрешения**

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- a) пространственное разрешение в диапазоне меньше, чем от одного метра, до нескольких десятков метров;
- b) длины волн в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, т.е. от 0,4 до 3 мкм с возможным расширением в СВИК- и ТИК-областях;
- c) изменяемое количество каналов и полос пропускания:
 - i) один канал (панхроматический) с полосой пропускания около 400 нм (например, 500—900 нм);
 - ii) от 3 до 10 многоспектральных каналов с полосой пропускания около 100 нм;
 - iii) непрерывный спектральный диапазон (гиперспектральный); как правило, имеет 100 каналов с полосой пропускания около 10 нм;
- d) функция получения изображения: сплошная и смежная выборка, покрывающая полосу захвата от нескольких десятков до приблизительно 100 км, которая часто соответствует полю зрения в несколько сотен километров;
- e) предназначены для использования на НОО. ГСО не исключается, однако пока еще не используется.

В зависимости от спектральных диапазонов, количества каналов и ширины полосы пропускания, а также возможностей управляемого нацеливания оптические формирователи изображения высокого разрешения могут выполнять различные исследовательские функции, а именно:

- a) панхроматические формирователи изображений: наблюдение, распознавание, стереоскопия для цифровой модели высоты рельефа и т. д. Наиболее значимыми характеристиками приборов являются разрешение и возможности нацеливания с автоматическим управлением;
- b) мультиспектральные формирователи изображений: наблюдение за сушей для мониторинга землепользования, наземного покрова, подземных вод, классификации растительности, мониторинга стихийных бедствий и т. д. Наиболее значимыми характеристиками прибора является количество каналов и спектральный охват;
- c) гиперспектральные формирователи изображений: наблюдение за сушей, особенно в целях изучения вегетационных процессов, углеродного цикла и т. д. Наиболее значимыми характеристиками прибора являются спектральное разрешение и спектральный охват.

В таблицах 3.7—3.9 представлены в качестве примера характеристики панхроматического формирователя изображений (WV60), мультиспектрального формирователя изображений (ETM+) и гиперспектрального формирователя изображений (Hyperion).

Таблица 3.7. Пример панхроматического формирователя изображений высокого разрешения: WV60 на борту спутника WorldView-1

<i>WV60</i>	<i>Камера World View 60</i>
Спутник	WorldView – 1
Программа исследований	Наблюдение, распознавание, стереоскопия для цифровой модели высоты рельефа и т. д.
Основные характеристики	Панхроматический канал Разрешение: 0,5 м Возможности управления 60 см апертура телескопа
Метод сканирования	Режим «pushbroom» 35 000 детекторная матрица Полоса захвата: 17,6 км с наклоном спутника в различных рабочих режимах Возможности стереовоспроизведения изображения как вдоль трассы, так и поперек орбит
Охват/цикл	Глобальный охват за 6 месяцев в дневное время Глобальный охват за несколько дней (до 3 дней) при стратегическом нацеливании
Разрешение (ПТ)	0,50 м
Технические параметры	Масса: 380 кг Мощность: 250 Вт Скорость передачи данных: 800 Мбит/с

Таблица 3.8. Пример мультиспектрального формирователя изображений: ETM+ на борту спутника Landsat-7

<i>ETM+</i>	<i>Усовершенствованный прибор для тематического картирования +</i>
Спутник	Landsat-7
Программа исследований	Наблюдения за сушей для мониторинга землепользования, наземного покрова, подземных вод, классификации растительного покрова, мониторинга стихийных бедствий и т. д.
Основные характеристики	8 каналов: 1 панхроматический, 6 ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонов, 1 ТИК-диапазон Разрешение 15 м, 30 м и 60 м
Метод сканирования	Режим «wiskbroom» 6 000 пикселей на линию (узкополосный) 12 000 пикселей на линию (панхроматический) 3 000 пикселей на линию (ТИК) Полоса захвата: 185 км
Охват/цикл	Глобальный охват за 16 дней в дневное время
Разрешение (ПТ)	30 м (6 узкополосных каналов), 15 м (панхроматический), 60 м (ТИК)

ETM+		Усовершенствованный прибор для тематического картирования +	
Технические параметры	Масса: 441 кг Мощность: 590 Вт Скорость передачи данных: 150 Мбит/с		
Центральная длина волны	Спектральный интервал	ОСШ при заданной входной спектральной плотности энергетической яркости или NEΔT	
		Низкий сигнал	Высокий сигнал
Панхроматический канал	0,50–0,90 мкм	14 при 22,9 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	80 при 156,3 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
0,48 мкм	0,45–0,52 мкм	36 при 40 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	130 при 190 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
0,56 мкм	0,53–0,61 мкм	37 при 30 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	167 при 193,7 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
0,66 мкм	0,63–0,69 мкм	24 при 21,7 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	127 при 149,6 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
0,83 мкм	0,78–0,90 мкм	33 при 13,6 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	226 при 149,6 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
1,65 мкм	1,55–1,75 мкм	34 при 4,0 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	176 при 31,5 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
2,20 мкм	2,09–2,35 мкм	27 при 1,7 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	130 при 11,1 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
11,45 мкм	10,4–12,5 мкм	0,2 К при 300 К	0,2 К при 320 К

Таблица 3.9. Пример гиперспектрального формирователя изображений высокого разрешения: Hyperion на борту спутника NMP EO-1

Hyperion	
Спутник	Программа нового тысячелетия – Наблюдения за Землей -1 (NMP EO-1)
Программа исследований	Наблюдение за сушей, в особенности изучение вегетационных процессов, углеродного цикла и т. д.
Основные характеристики	Решёточный спектрометр в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах с 220 каналами (гиперспектральных) в двух группах, покрывающих диапазоны 0,4–1,0 мкм и 0,9–2,5 мкм, соответственно Ширина полосы пропускания каналов: 10 нм Разрешение: 30 м
Метод сканирования	Режим «pushbroom» 250 пикселей на линию Полоса захвата: 7,5 км
Охват/цикл	Глобальный охват за 1 год в дневное время
Разрешение (ПТ)	30 м
Технические параметры	Масса: 49 кг Мощность: 51 Вт Скорость передачи данных: 105 Мбит/с

3.2.3 Надирные коротковолновые радиометры

Примером надирного коротковолнового радиометра является инструмент сканирования тропосферы (TROPOspheric Monitoring Instrument) TROPOMI, установленный на спутнике Sentinel-5 Precursor (S-5 P) и имеющий следующие основные характеристики:

- надирный коротковолновый спектрометр TROPOMI функционирует в ультрафиолетовой (УФ), ВИД-, БИК- и СВИК-областях спектра (см. таблицу 3.10). Поляризационная чувствительность TROPOMI снижена до менее 0,5 % за счет применения деполяризатора;

- b) обычно спектральное разрешение коротковолновых радиометров составляет доли нанометра (см. таблицу 3.10);
- c) пространственное разрешение порядка 10 км — для TROPOMI оно составляет 7 км × 7 км;
- d) горизонтальная дискретизация не обязательно сплошная и смежная. Однако для TROPOMI она является смежной, обеспечивая тем самым возможность получения изображений;
- e) возможности сканирования — от направления только в надир до полосы охвата в несколько тысяч километров. В случае TROPOMI полоса захвата составляет 2 600 км;
- f) предназначен для использования как на НОО, так и ГСО.

В целом, надирные коротковолновые радиометры могут решать задачи атмосферной химии в целях мониторинга ряда компонентов атмосферы. Возможность обнаружения тех или иных видов определяется областями спектра и обуславливает необходимость достаточного спектрального разрешения. Высокое пространственное разрешение благоприятно для зондирования поскольку при таком разрешении увеличивается количество снимков ясного неба. Смежная дискретизация априори имеет меньшую значимость, однако она обладает большим преимуществом, обеспечивая возможность получения изображений. В зависимости от спектрального покрытия могут быть получены следующие профили:

- a) только УФ-область спектра: профиль озона;
- b) УФ- и ВИД-области спектра: профиль и общее содержание озона, или общий профиль небольшого числа других компонентов атмосферы, таких как BrO, NO₂, OClO, SO₂ и аэрозоля;
- c) УФ-, ВИД- и БИК-области спектра: профиль и общее содержание озона, или общий профиль некоторых других компонентов атмосферы, таких как BrO, ClO, H₂O, HCHO, NO, NO₂, NO₃, O₂, O₄, OClO, SO₂ и аэрозоля;
- d) УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-области спектра: профиль и общее содержание озона, или общий профиль некоторых других компонентов атмосферы, таких как BrO, CH₄, ClO, CO, CO₂, H₂O, HCHO, N₂O, NO, NO₂, NO₃, O₂, O₄, OClO, SO₂ и аэрозоля;
- e) БИК- и КВИК-области спектра и, возможно, дополнительно СВИК- и ТИК-области: общее содержание или общий профиль отдельных компонентов атмосферы, таких как CH₄, CO, CO₂, H₂O и O₂.

В таблицах 3.10 и 3.11 представлен один пример спектрального покрытия прибора на НОО (TROPOMI) и один пример спектрального покрытия прибора на ГСО (УВБ на спутнике Meteosat третьего поколения).

Таблица 3.10. Пример надирного коротковолнового радиометра на НОО: TROPOMI на борту спутника S-5 P

TROPOMI	<i>Прибор TROPospheric Monitoring Instrument — это надирный спектрометр в УФ/ВИД/БИК/КВИК-областях спектра с полосой захвата около 2 600 км и высоким пространственным разрешением (7 км × 7 км в надире). TROPOMI движется за метеорологическим спутником SUOMI-NPP в режиме «loose formation»; время пересечения экватора — 13:30.</i>			
Спутник	S-5 P			
Программа исследований	Атмосферная химия Обязательная продукция: O ₃ , SO ₂ , HCHO, NO ₂ , CO, CH ₄ , доля облачности/давление/оптическая толщина, аэрозольный индекс и высота слоя необязательная продукция: приземное ультрафиолетовое излучение, оптическая толщина аэрозоля, H ₂ O, CHOCHO, BrO, OClO, соотношение HDO/H ₂ O			
Основные характеристики	Спектральный диапазон: УФ/ВИД/БИК/КВИК-области спектра Возможность получения изображений: 8 полос; дифракционный спектрометр с деполяризатором			
Метод сканирования	Режим «pushbroom» Полоса захвата: 2 600 км; одна линия сканирования за 1 секунду			
Охват/цикл	Режим поперек трассы, обеспечивающий глобальный охват каждый день в дневное время			
Разрешение	7 км × 7 км в ПТ			
Технические параметры	Масса: 200 кг Мощность: 170 Вт Скорость передачи данных: 140 Гбит на орбиту			
<i>Спектральный диапазон</i>	<i>Спектральное разрешение</i>	<i>Спектральная дискретизация</i>	<i>Требуемое отношение сигнал-шум</i>	<i>Радиометрическая точность (%)</i>
270—300 нм	0,48 нм	0,071 нм	100–800 ^{1,2}	1,9 ⁵
300—320 нм	0,49 нм	0,073 нм	90–700 ¹	1,6 ⁵
320—405 нм	0,54 нм	0,22 нм	800–1000 ¹	1,6 ⁵
405—495 нм	0,54 нм	0,22 нм	800–1000 ¹	1,6 ⁵
675—725 нм	0,38 нм	0,14 нм	100–500 ^{1,3}	1,6 ⁵
725—775 нм	0,38 нм	0,14 нм	100–500 ^{1,3}	1,6 ⁵
2305—2345 нм	0,25 нм	0,10 нм	100–120 ⁴	1,5 ⁵
2345—2385 нм	0,25 нм	0,10 нм	100–20 ⁴	1,5 ⁵

Примечания в отношении спектральных каналов TROPOMI:

¹ Минимальное значение ОСШ определяется для эталонного участка с 2 % альбедо поверхности и при положении солнца в зените.

² ОСШ для полосы 1 определяется для пикселя площадью 21 × 28 км² по поверхности.

³ ОСШ для полосы 6 определяется для пикселя площадью 7 × 7 км² по поверхности.

⁴ Минимальное значение ОСШ определяется для эталонного участка с 5 % альбедо поверхности и при значении зенитного угла 70°.

⁵ Величины относятся к абсолютной радиометрической точности измеряемых спектральных характеристик Земли.

Таблица 3.11. Пример надирного сканирующего коротковолнового радиометра на ГСО: UVN на борту спутника Meteosat третьего поколения (MTG)

<i>UVN</i>	<i>Спектрометр в УФ-, видимом и ближнем ИК-диапазонах, также известный как Sentinel-4</i>		
Спутники	MTG-S1 MTG-S2		
Программа исследований	Атмосферная химия Отслеживание компонентов атмосферы: BrO, ClO, H ₂ O, HCHO, NO, NO ₂ , NO ₃ , O ₂ , O ₃ , O ₄ , OCIO, SO ₂ и аэрозоля		
Основные характеристики	Спектральный диапазон: УФ/ВИД/БИК-области спектра Возможность получения изображений: дифракционный спектрометр, покрывающий 3 полосы, 1 470 каналов		
Метод сканирования	Механическое сканирование Трехосно-стабилизированный спутник Восток-запад — непрерывный режим Юг-север — шаговый режим		
Охват/цикл	Европейская зона (30° с. ш.—65° с. ш., 15° з. д.—50° в. д.) за 60 мин (также возможно за 30 мин)		
Разрешение	Определяется на 45° с. ш. 0°: < 8 км в обоих направлениях север–юг и восток–запад		
Технические параметры	Масса: 150 кг Мощность: 100 Вт Скорость передачи данных: 25 Мбит/с		
<i>Спектральный диапазон</i>	<i>Число каналов</i>	<i>Спектральное разрешение</i>	<i>ОСШ при заданной входной спектральной плотности энергетической яркости</i>
305–400 нм	570	0,5 нм	200—1 400 при 40—120 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
400–500 нм	600	0,5 нм	1 400 при 140 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
755–775 нм	300	0,2 нм	1 200 при 60 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹

3.2.4 Надирные сканирующие инфракрасные радиометры

Радиометры или спектрометры этого типа имеют следующие основные характеристики:

- a) функционирование в СВИК- и ТИК-областях спектра (3—15 мкм) с возможным расширением в дальнюю ИК-область (до 50 мкм) и вспомогательные каналы в ВИД/БИК-областях спектра;
- b) спектральное разрешение порядка $0,1 \text{ см}^{-1}$ (очень высокое разрешение), $0,5 \text{ см}^{-1}$ (гиперспектральное) или 10 см^{-1} (радиометр);
- c) пространственное разрешение порядка 10 км;
- d) горизонтальная дискретизация, не обязательно сплошная или смежная;
- e) возможности сканирования варьируются от направления только в надир до полосы охвата в несколько тысяч километров;
- f) предназначены для использования как на НОО, так и ГСО.

В зависимости от спектральных диапазонов и разрешения надирные сканирующие инфракрасные радиометры могут использоваться для решения задач профилирования температуры и влажности атмосферы и/или атмосферной химии в отношении ряда компонентов атмосферы:

- a) радиометры позволяют получить профили температуры и влажности грубого вертикального разрешения;
- b) спектрометры позволяют получить профили температуры и влажности высокого вертикального разрешения, а также приближенный профиль озона и общее содержание или общий профиль некоторых других компонентов атмосферы, таких как CH_4 , CO , CO_2 , HNO_3 , NO_2 , SO_2 и аэрозоля;
- c) спектрометры очень высокого разрешения, предназначенные для изучения химии атмосферы, позволяют получить профили или общее содержание C_2H_2 , C_2H_6 , CFC-11, CFC-12, CH_4 , ClONO_2 , CO , CO_2 , COS , H_2O , HNO_3 , N_2O , N_2O_5 , NO , NO_2 , O_3 , PAN, SF_6 , SO_2 и аэрозоля.

В таблицах 3.12—3.14 представлены три примера: радиометр на ГСО (радиометр на геостационарном оперативном спутнике для исследования окружающей среды (GOES)); гиперспектральный интерферометр на НОО (IASI на Metop) и спектрометр очень высокого разрешения на НОО (TES-nadir на EOS-Aura).

Таблица 3.12. Пример надирного сканирующего радиометра инфракрасного диапазона на ГСО: радиометр на борту спутника GOES

<i>Радиометр GOES</i>	
Спутники	GOES -8, GOES -9, GOES -10, GOES -11, GOES -12, GOES -13, GOES -14, GOES -15
Программа исследований	Профили температуры и влажности грубого вертикального разрешения
Основные характеристики	Радиометр: 18 узкополосных каналов в СВИК/ТИК- + 1 ВИД-областях спектра
Метод сканирования	Механический Биаксиальный Трехосно-стабилизированный спутник Шаговый с задержкой
Охват/цикл	Полный диск за 8 час 3 000 x 3 000 км ² за 42 минуты 1 000 x 1 000 км ² за 5 минут
Разрешение (ПТ)	8,0 км
Технические параметры	Масса: 152 кг Мощность: 93 Вт Скорость передачи данных: 40 кбит/с

<i>Длина волны</i>	<i>Волновое число</i>	<i>Ширина полосы пропускания</i>	<i>ОСШ или NEΔT при заданной входной величине</i>
14,71 мкм	680 см ⁻¹	13 см ⁻¹	1,24 К при 290 К
14,37 мкм	696 см ⁻¹	13 см ⁻¹	0,79 К при 290 К
14,06 мкм	711 см ⁻¹	13 см ⁻¹	0,68 К при 290 К
13,64 мкм	733 см ⁻¹	16 см ⁻¹	0,55 К при 290 К
13,37 мкм	748 см ⁻¹	16 см ⁻¹	0,49 К при 290 К
12,66 мкм	790 см ⁻¹	30 см ⁻¹	0,23 К при 290 К
12,02 мкм	832 см ⁻¹	50 см ⁻¹	0,14 К при 290 К
11,03 мкм	907 см ⁻¹	50 см ⁻¹	0,10 К при 290 К
9,71 мкм	1 030 см ⁻¹	25 см ⁻¹	0,12 К при 290 К
7,43 мкм	1 345 см ⁻¹	55 см ⁻¹	0,06 К при 290 К
7,02 мкм	1 425 см ⁻¹	80 см ⁻¹	0,06 К при 290 К
6,51 мкм	1 535 см ⁻¹	60 см ⁻¹	0,15 К при 290 К
4,57 мкм	2 188 см ⁻¹	23 см ⁻¹	0,20 К при 290 К
4,52 мкм	2 210 см ⁻¹	23 см ⁻¹	0,17 К при 290 К
4,45 мкм	2 248 см ⁻¹	23 см ⁻¹	0,20 К при 290 К
4,13 мкм	2 420 см ⁻¹	40 см ⁻¹	0,14 К при 290 К
3,98 мкм	2 513 см ⁻¹	40 см ⁻¹	0,22 К при 290 К
3,74 мкм	2 671 см ⁻¹	100 см ⁻¹	0,14 К при 290 К
0,70 мкм	Не применимо	0,05 мкм	1 000 при 100 % альбедо

Таблица 3.13. Пример гиперспектрального надирного сканирующего интерферометра инфракрасного диапазона на НОО: IASI на борту спутника Metop

<i>IASI</i>	<i>Интерферометр зондирования атмосферы в инфракрасном диапазоне</i>		
Спутники	Metop-A, Metop-B, Metop-C		
Программа исследований	Профили температуры и влажности высокого вертикального разрешения Приближенный профиль озона Общее содержание или общий профиль ряда других компонентов атмосферы, таких как CH ₄ , CO, CO ₂ , HNO ₃ , NO ₂ , SO ₂ и аэрозоля		
Основные характеристики	Спектрометр: спектральное разрешение 0,25 см ⁻¹ (без аподизации) СВИК/ТИК-области спектра Интерферометр с 8 461 каналами и одним каналом, встроенным в ТИК-формирователь изображений		
Метод сканирования	Поперек трассы: 30 шагов в 48 км ПТ Полоса захвата: 2 130 км Вдоль трассы: одна 48 км линия каждые 8 секунд		
Охват/цикл	Почти глобальный охват дважды в день		
Разрешение (ПТ)	IFOV 4 x 12 км вблизи центра ячейки 48 x 48 км ² (среднее расстояние между выборками: 24 км)		
Технические параметры	Масса: 236 кг Мощность: 210 Вт Скорость передачи данных: 1,5 Мбит/с (после бортовой обработки)		
<i>Спектральный диапазон (мкм)</i>	<i>Спектральный диапазон (см⁻¹)</i>	<i>Спектральное разрешение (без аподизации)</i>	<i>NEΔT при заданной температуре участка</i>
8,26–15,50 мкм	645–1 210 см ⁻¹	0,25 см ⁻¹	0,2–0,3 К при 280 К
5,00–8,26 мкм	1 210–2 000 см ⁻¹	0,25 см ⁻¹	0,2–0,5 К при 280 К
3,62–5,00 мкм	2 000–2 760 см ⁻¹	0,25 см ⁻¹	0,5–2,0 К при 280 К
10,3–12,5 мкм	Не применимо	Не применимо	0,8 К при 280 К

Таблица 3.14. Пример надирного сканирующего спектрометра инфракрасного диапазона очень высокого разрешения на НОО: надир TES на борту спутника EOS-Aura

<i>Надир TES</i>	<i>Тропосферный эмиссионный спектрометр — устройство сканирования в надирном режиме</i>
Спутник	EOS-Aura
Программа исследований	Атмосферная химия: профили и общее содержание C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆ , CFC-11, CFC-12, CH ₄ , ClONO ₂ , CO, CO ₂ , COS, H ₂ O, HNO ₃ , N ₂ O, N ₂ O ₅ , NO, NO ₂ , O ₃ , PAN, SF ₆ , SO ₂ и аэрозоля
Основные характеристики	Спектрометр Спектральное разрешение 0,059 см ⁻¹ (без аподизации) СВИК/ТИК-спектральный диапазон Интерферометр с формированием изображений: четыре полосы, 40 540 каналов
Метод сканирования	Режим поперек трассы: матрица из 16 детекторов с зоной обслуживания в надире 0,53 x 0,53 км ² при движении за 10 шагов покрывает поле зрения 5,3 x 8,5 км ² , которое может иметь любое направление в пределах конуса 45 градусной апертуры или полосы захвата 885 км. Надирный режим может чередоваться с режимом лимбовых наблюдений.

<i>Надир TES</i>	<i>Тропосферный эмиссионный спектрометр — устройство сканирования в надирном режиме</i>		
Охват/цикл	Режим поперек трассы: при непрерывном использовании и при целенаведении с автоматическим управлением обеспечивает глобальный охват за 16 дней (периодичность повторения орбиты) для ячеек со стороной ~80 км		
Разрешение (ПТ)	Выборка 0,53 км		
Технические параметры	Масса: 385 кг Мощность: 334 Вт Скорость передачи данных: 4,5 Мбит/с		
<i>Спектральный диапазон (мкм)</i>	<i>Спектральный диапазон (см⁻¹)</i>	<i>Спектральное разрешение (без аподизации)</i>	<i>НЕДТ при заданной температуре участка</i>
11,11–15,38 мкм	650–900 см ⁻¹	0,059 см ⁻¹	< 1 К при 280 К
8,70–12,20 мкм	820–1 150 см ⁻¹	0,059 см ⁻¹	< 1 К при 280 К
5,13–9,09 мкм	1 100–1 950 см ⁻¹	0,059 см ⁻¹	< 1 К при 280 К
3,28–5,26 мкм	1 900–3 050 см ⁻¹	0,059 см ⁻¹	< 2 К при 280 К

3.2.5 Микроволновые радиометры

Радиометры этого типа имеют следующие основные характеристики:

- частота от 1 до 3 000 ГГц (длины волн от 0,1 мм до 30 см);
- ширина полосы пропускания канала от нескольких МГц до нескольких ГГц;
- пространственное разрешение от нескольких километров до примерно 100 километров, определяемое размером антенны и частотой излучения;
- горизонтальная дискретизация не обязательно сплошная или смежная;
- сканирование: поперек трассы (полоса захвата порядка 2 000 км), коническое (полоса захвата порядка 1 500 км, возможна одиночная или двойная поляризация) или только в надир;
- предназначены для использования на НОО.

В зависимости от частоты, пространственного разрешения и режима сканирования микроволновые радиометры могут выполнять различные научные задачи:

- формирование многоцелевых МКВ-изображений для определения осадков; содержания жидкой воды и ледяных кристаллов в облаке; количества водяного пара в атмосфере, который может выпасть в виде осадков; температуры поверхности океана; скорости ветра над поверхностью океана (и направления, если используется мультиполяризация); покрова морского льда; влажности поверхности почвы; состояния снега и водного эквивалента снега и т.п. Наиболее важными характеристиками прибора в этом плане являются следующие: расширение спектрального диапазона, по крайней мере, от 19 ГГц (возможно, 10 ГГц или лучше 6–7 ГГц) до самое меньшее 90 ГГц, а также коническое сканирование для использования конической поляризации в условиях постоянного угла падения;
- зондирование температуры и влажности, а также осадков, практически при любых условиях погоды. Наиболее важными характеристиками прибора являются каналы в полосах поглощения O₂ для температуры (основная частота: 57 ГГц) и H₂O для влажности (основная частота: 183 ГГц);

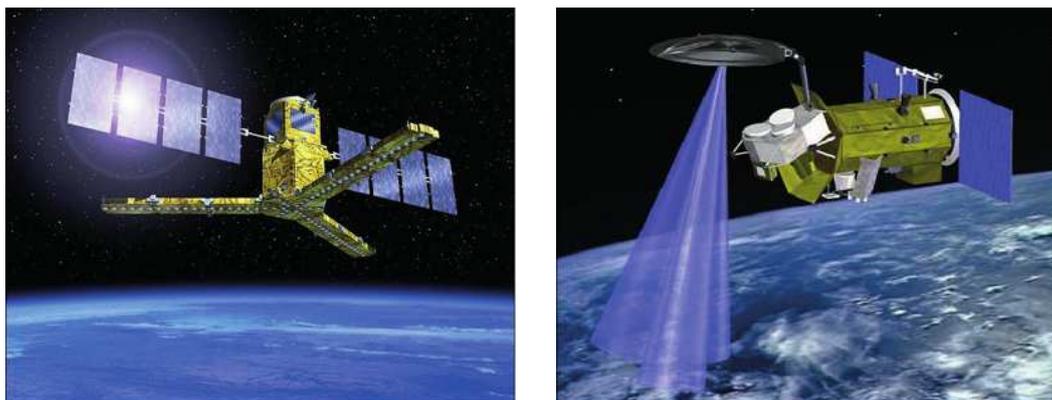


Рисунок 3.7. Схематическое изображение спутника для наблюдений за влажностью почвы и соленостью океана (SMOS) с прибором MIRAS на борту (слева) и спутника для научных применений (SAC-D) с прибором Aquarius (справа). Диаметр реальной апертуры антенны прибора Aquarius составляет 2,5 м. Антенна синтезированной апертуры MIRAS вписана в окружность диаметром 4 м.

- c) определение солености воды на поверхности океана и объемного содержания влаги в почве. Наиболее важной характеристикой прибора является низкая частота в L-полосе (основная частота: 1,4 ГГц); это предполагает использование очень больших антенн (см. рисунок 3.7);
- d) атмосферная коррекция для обеспечения выполнения задач альтиметрии. Наиболее важными характеристиками прибора являются использование частоты водяного пара 23 ГГц с прилегающими окнами, а также совмещение центра с альтиметром в надирных наблюдениях.

В таблицах 3.15—3.18 содержатся характеристики многоцелевого радиометра (усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр для системы наблюдения за Землей) (AMSR-E), зонда температуры и влажности (усовершенствованный микроволновый зонд (ATMS)), низкочастотного радиометра (микроволновый радиометр для получения изображений с синтезированной апертурой (MIRAS)) и радиометра для наблюдений в надир (усовершенствованный микроволновый радиометр (AMR)).

Таблица 3.15. Пример многоцелевого микроволнового формирователя изображений: AMSR-E на борту спутника EOS-Aqua

AMSR-E	Усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр для EOS
Спутник	EOS-Aqua
Программа исследований	Формирование многоцелевых изображений в МКВ-диапазоне для определения осадков, содержания жидкой воды и кристаллов льда в облаках, количества водяного пара в атмосфере, который может выпасть в виде осадков, температуры поверхности океана, скорости ветра над поверхностью океана, покрытия океана льдом, влажности поверхности почвы, состояния снега, водного эквивалента и т. д.
Основные характеристики	Спектральный диапазон: 6,9–89 ГГц 6 частот, 12 каналов, главным образом окна Коническое сканирование
Метод сканирования	Коническое сканирование: зенитный угол 55° Полоса захвата: 1 450 км Скорость сканирования: 40 скан/мин = 10 км/скан
Охват/цикл	Глобальный охват раз в день

<i>AMSR-E</i>		<i>Усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр для EOS</i>			
Разрешение (ПТ)	Меняется с частотой Соответствует диаметру антенны 1,6 м				
Технические параметры	Масса: 314 кг Мощность: 350 Вт Скорость передачи данных: 87,4 кбит/с				
<i>Центральная частота (ГГц)</i>	<i>Полоса пропускания (МГц)</i>	<i>Поляризации</i>	<i>NEΔT</i>	<i>IFOV</i>	<i>Пиксель</i>
6,925	350	Вертикальная (V), горизонтальная (H)	0,3 К	43 x 75 км	10 x 10 км
10,65	100	V, H	0,6 К	29 x 51 км	10 x 10 км
18,7	200	V, H	0,6 К	16 x 27 км	10 x 10 км
23,8	400	V, H	0,6 К	14 x 21 км	10 x 10 км
36,5	1 000	V, H	0,6 К	9 x 14 км	10 x 10 км
89,0	3 000	V, H	1,1 К	4 x 6 км	5 x 5 км

Таблица 3.16. Пример микроволнового зонда температуры/влажности: ATMS на борту спутников Суоми-Национальное полярно-орбитальное партнерство (Suomi-NPP) и Объединенная полярная спутниковая система (JPSS)

<i>ATMS</i>	<i>Усовершенствованный микроволновый зонд</i>		
Спутник	Suomi-NPP, JPSS -1 и JPSS -2		
Программа исследований	Зондирование температуры и влажности практически при любых условиях погоды; также применим для обнаружения осадков		
Основные характеристики	Спектральный диапазон: 23–183 ГГц 22 канала, охватывающих полосы 57 и 183 ГГц Сканирование поперек трассы		
Метод сканирования	Поперек трассы: 96 шагов в 16 км ПТ Полоса захвата: 2 200 км Вдоль трассы: одна 16-км линия каждые 8/3 секунд		
Охват/цикл	Почти глобальный охват дважды в день		
Разрешение (ПТ)	16 км для каналов 165–183 ГГц 32 км для каналов 50–90 ГГц 75 км для каналов 23–32 ГГц		
Технические параметры	Масса: 75,4 кг Мощность: 93 Вт Скорость передачи данных: 20 кбит/с		
<i>Центральная частота (ГГц)</i>	<i>Полоса пропускания (МГц)</i>	<i>Квазиполяризация</i>	<i>NEΔT</i>
23,800	270	Квазивертикальная (QV)	0,90 К
31,400	180	QV	0,90 К
50,300	180	Квазигоризонтальная (QH)	1,20 К
51,760	400	QH	0,75 К
52,800	400	QH	0,75 К
53,596 ± 0,115	170	QH	0,75 К
54,400	400	QH	0,75 К

<i>Центральная частота (ГГц)</i>	<i>Полоса пропускания (МГц)</i>	<i>Квазиполяризация</i>	<i>NEΔT</i>
54,940	400	QH	0,75 K
55,500	330	QH	0,75 K
$f_0 = 57,290344$	330	QH	0,75 K
$f_0 \pm 0,217$	78	QH	1,20 K
$f_0 \pm 0,3222 \pm 0,048$	36	QH	1,20 K
$f_0 \pm 0,3222 \pm 0,022$	16	QH	1,50 K
$f_0 \pm 0,3222 \pm 0,010$	8	QH	2,40 K
$f_0 \pm 0,3222 \pm 0,0045$	3	QH	3,60 K
89,5	5 000	QV	0,50 K
165,5	3 000	QH	0,60 K
$183,31 \pm 7,0$	2 000	QH	0,80 K
$183,31 \pm 4,5$	2 000	QH	0,80 K
$183,31 \pm 3,0$	1 000	QH	0,80 K
$183,31 \pm 1,8$	1 000	QH	0,80 K
$183,31 \pm 1,0$	500	QH	0,90 K

Таблица 3.17. Пример микроволнового радиометра L-диапазона: MIRAS на борту спутника SMOS

<i>MIRAS</i>	<i>Микроволновый радиометр для получения изображений с синтезированной апертурой</i>
Спутник	Спутник для изучения влагосодержания в почве и солености океана (SMOS)
Программа исследований	Соленость воды поверхности океана, объемное содержание влаги в почве
Основные характеристики	Очень большая антенна с синтезированной апертурой Одна частота L-полосы (1,413 ГГц) Несколько поляриметрических режимов
Метод сканирования	Режим «pushbroom»: корреляционная интерферометрия, реализованная за счет матриц приемника, размещенных на трех консолях Y-образной антенны Полоса захвата составляет 1 000 км
Охват/цикл	Глобальный охват за 3 дня (влажность почвы) В зависимости от желаемой точности измерения солености может потребоваться усреднение результатов измерений за несколько недель
Разрешение (ПТ)	Стандартное разрешение 50 км: разрешение может ухудшаться в зависимости от требуемой точности измерений солености
Технические параметры	Масса: 355 кг Мощность: 511 Вт Скорость передачи данных: 89 кбит/с

Таблица 3.18. Пример несканирующего микроволнового радиометра, спроектированного для обеспечения задач альтиметрии: AMR на борту спутника JASON

<i>AMR</i>	<i>Усовершенствованный микроволновый радиометр</i>
Спутники	JASON-2, JASON-3
Программа исследований	Атмосферная коррекция для альтиметров JASON-1 и JASON-2
Основные характеристики	3 частоты: 18,7 ГГц, 23,8 ГГц и 34 ГГц
Метод сканирования	Только наблюдения в надир, совместно с радиолокационными альтиметрами Poseidon-3 и Poseidon-3B
Охват/цикл	Глобальный охват за 1 месяц при среднем пространственном разрешении 30 км или за 10 дней при среднем пространственном разрешении 100 км
Разрешение (ПТ)	25 км
Технические параметры	Масса: 27 кг Мощность: 31 Вт Скорость передачи данных: 100 бит/с

3.2.6 Лимбовые зондировщики

Семейство приборов этого типа имеет следующие основные характеристики:

- a) сканирование лимба Земли: определяет вертикальное разрешение (в диапазоне 1–3 км), наблюдаемый атмосферный слой (в диапазоне 10–80 км) и пространственное разрешение (около 300 км вдоль линии визирования);
- b) спектрометры, использующие или УФ/ВИД/БИК/КВИК-области спектра (200–3 000 нм), или СВИК/ТИК-области спектра (3–16 мкм), либо высокочастотный микроволновый диапазон (100–3 000 ГГц);
- c) пространственное разрешение: от нескольких десятков километров до нескольких сотен километров в поперечном направлении;
- d) горизонтальная выборка ограничена одним или несколькими азимутальными направлениями;
- e) предназначены только для использования на НОО.

Лимбовые зондировщики могут обеспечивать наблюдения верхних слоев тропосферы, стратосферы и мезосферы с высоким вертикальным разрешением, главным образом, для задач атмосферной химии. В зависимости от спектральных диапазонов лимбовые зондировщики могут отслеживать следующие компоненты:

- a) коротковолновые спектрометры для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; для полного (УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонов) основными компонентами являются: BrO, CH₄, ClO, CO, CO₂, H₂O, HCHO, N₂O, NO, NO₂, NO₃, O₂, O₃, O₄, OClO, SO₂ и аэрозоль;
- b) ИК-спектрометры для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; для полных СВИК/ТИК-областей спектра основными компонентами являются: C₂H₂, C₂H₆, CFCs (CCl₄, CF₄, F11, F12, F22), CH₄, ClONO₂, CO, COF₂, H₂O, HNO₃, HNO₄, HOCl, N₂O, N₂O₅, NO, NO₂, O₃, OCS, SF₆ и аэрозоль;
- c) микроволновые спектрометры для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; в диапазоне 100–3 000 ГГц основными компонентами являются: BrO, ClO, CO, H₂O, HCl, HCN, HNO₃, HO₂, HOCl, N₂O, O₃, OH и SO₂;
- d) затменные датчики, следящие за Солнцем, Луной и звездами, для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; для полного спектра УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонов основными компонентами являются: H₂O, NO₂, NO₃, O₃, OClO и аэрозоль.

В таблице 3.19 показан пример лимбового зондировщика, использующего затменный метод в коротковолновом диапазоне (Эксперимент по стратосферному аэрозолю и газам (SAGE-III), на Международной космической станции (МКС)).

Таблица 3.19. Пример лимбового зондировщика, использующего затменный метод в коротковолновом диапазоне: SAGE-III на МКС

<i>SAGE-III МКС</i>	<i>Эксперимент по стратосферному аэрозолю и газам-III для МКС</i>
Спутник	Международная космическая станция
Программа исследований	Атмосферная химия в стратосфере Отслеживаемые компоненты: H ₂ O, NO ₂ , NO ₃ , O ₃ , OClO и аэрозоль
Основные характеристики	УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазоны (290–1 550 нм) 9-полосный дифракционный спектрометр солнечного и лунного затмения
Метод сканирования	Слежение за Солнцем и Луной во время фазы затмения, шаг 1 км с расстояния от ~10 до ~85 км
Охват/цикл	Несколько десятков событий в день только на широтах ниже ~52° (орбитальное наклонение МКС)
Разрешение	300 км (горизонтальное), 1–2 км (вертикальное)
Технические параметры	Масса: 76 кг Мощность: 80 Вт Скорость передачи данных: 115 кбит/с

3.2.7 Радиозатменные зондировщики Глобальной навигационной спутниковой системы

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- a) приемники ГНСС используют по крайней мере две частоты L-диапазона около 1 180 ГГц, 1 250 ГГц и 1 580 ГГц;
- b) наблюдения лимба Земли от земной поверхности до высоты спутника во время фазы затмения спутников, входящих в группировки ГНСС (таких как ГСОМ, ГЛОНАСС, Galileo и Compass/BeiDou);
- c) направленные антенны: смотрящие назад (для заходящих аппаратов ГНСС), вперед (для восходящих аппаратов ГНСС) и тороидальные (для навигации);
- d) эффективное пространственное разрешение составляет около 300 км вдоль направления «спутник на НОО – затмевающий спутник ГНСС»; несколько десятков километров в поперечном направлении;
- e) горизонтальная выборка ограничена числом событий затмений за день: от 250 до 1 500 событий для спутника в зависимости от числа систем ГНСС, сигнал от которых он получает, и технических возможностей отслеживания вперед/назад;
- f) поддерживаются комплексной системой наземных станций (см. рисунок 3.8);
- g) предназначены только для использования на НОО.

В зависимости от конкретных функциональных возможностей радиозатменные зондировщики могут обеспечивать получение различных видов информации:

- a) временной интервал дискретизации сигнала определяет вертикальное разрешение профилей температуры, влажности и плотности;
- b) чувствительность измерений в нижних слоях атмосферы определяется размером антенн затмения и методом временной выборки;

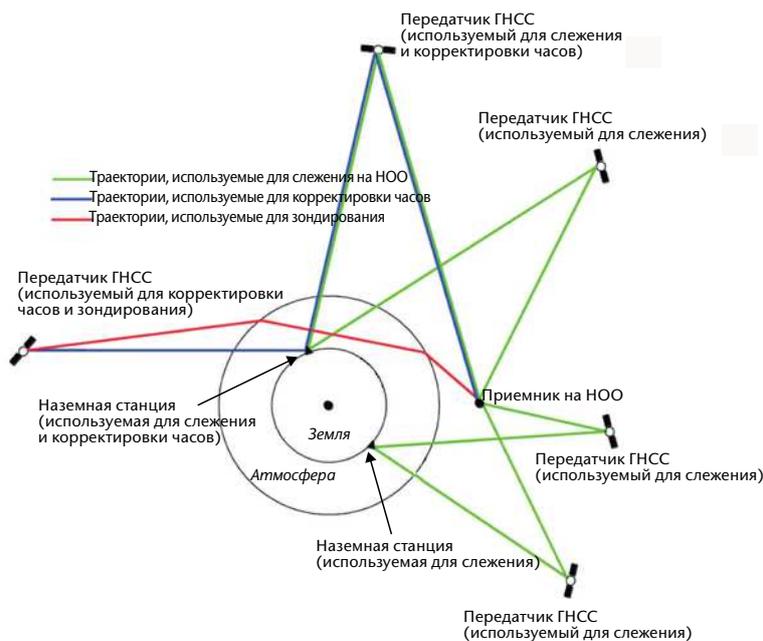


Рис. 3.8. Общий вид системы радиозатмения

- c) количество используемых частот влияет на точность двух измерений параметров ионосферы: общее содержание электронов и профиль плотности электронов;
- d) число событий затмений в день зависит от количества задействованных группировок ГНСС (ГCOM, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou), числа принимающих каналов для параллельного слежения дополнительных спутников ГНСС и возможностей размещения антенны: ее ориентации только назад, только вперед, или и то, и другое.

В таблице 3.20 в качестве примера представлены основные характеристики одного радиозатмения зондировщика (приемник ГНСС для атмосферного зондирования (GRAS)).

Таблица 3.20. Пример радиозатмения зондировщика: GRAS на борту спутника Metop

GRAS	Приемник ГНСС для атмосферного зондирования
Спутник	Metop-A, Metop-B, Metop-C
Программа исследований	Профили температуры, влажности и плотности высокого вертикального разрешения
Основные характеристики	Измерение фазовой задержки вследствие отражения во время затмения между навигационным спутником и спутником на НОО Группировка спутников ГНСС: ГCOM Частоты: L1 = 1 575,42 МГц и L2 = 1 227,6 МГц 8 принимающих каналов: 4 для затмения, 8 для навигации
Метод сканирования	Лимбовое зондирование с высоты 80 км до «близко к поверхности» с временной выборкой Азимут сектора: 90° вперед и назад
Охват/цикл	Слежение за 1 группировкой Около 650 зондирований в день Средний разнос 880 км Глобальный охват (300 км разнос) за 8,5 дней
Разрешение (ПТ)	Около 300 км горизонтальное разрешение, 0,5 км — вертикальное разрешение

GRAS	Приемник ГНСС для атмосферного зондирования
Технические параметры	Масса: 30 кг Мощность: 30 Вт Скорость передачи данных: 27 кбит/с

3.2.8 Широкополосные радиометры

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- a) длины волн в диапазонах общего излучения, исходящего от Земли и атмосферы (0,2–300 мкм), а также частично отраженной солнечной радиации (0,2–4,0 мкм);
- b) один широкополосный канал, интегрирующий по каждому из двух диапазонов, и добавочные узкополосные каналы в ВИД- и/или ТИК-диапазонах для сбора информации об облаках в пределах IFOV;
- c) сканирование поперек трассы со сплошной и смежной дискретизацией для охвата полосы захвата в несколько тысяч километров с пространственным разрешением порядка 10 км;
- d) предназначены для использования как на НОО, так и на ГСО; возможно также наблюдение из точки либрации (точки Лагранжа) L1.

Широкополосные радиометры предназначены для измерения радиационного баланса Земли — уходящего длинноволнового и коротковолнового излучения на верхней границе атмосферы (ВГА). Точность измерения зависит от конкретных характеристик:

- a) максимально возможное продление коротковолновой области спектра в ультрафиолетовую часть, а длинноволновой области спектра в ДИК-область спектра как можно дальше с предельно максимальными плоскими характеристиками в диапазонах;
- b) встроенные средства с несколькими режимами обзора для перехода от детектирования излучения к детектированию облученности;
- c) дополнительные узкополосные каналы для сбора информации об облаках в пределах IFOV.

В таблицах 3.21 и 3.22 приводятся характеристики одного широкополосного радиометра на НОО (система изучения облачности и излучения Земли (CERES)) и одного на ГСО (прибор для наблюдения с геостационарной орбиты за радиационным балансом Земли (GERB)).

Таблица 3.21. Пример широкополосного радиометра на НОО: CERES на борту спутников Проекта по измерению осадков в тропиках (TRMM), EOS-Terra/Aqua, Suomi-NPP и JPSS

CERES	Система изучения облачности и излучения Земли
Спутник	TRMM, EOS Terra, EOS-Aqua, Suomi-NPP, JPSS-1
Программа исследований	Радиационный баланс Земли: уходящее длинноволновое и коротковолновое излучение на верхней границе атмосферы
Основные характеристики	Два широкополосных и один узкополосный каналы Либо: два блока — один для сканирования поперек трассы и один для двухосного сканирования для расчетов потока излучения Или один блок, работающий в различных режимах попеременно

<i>CERES</i>		<i>Система изучения облачности и излучения Земли</i>		
Метод сканирования	Поперек трассы: 80 шагов 20 км ПТ Полоса захвата: 3 000 км; вдоль трассы: одна 20-км полоса каждые 3 секунды Биаксиальное зондирование с поворотом азимута при надирном сканировании			
Охват/цикл	Глобальный охват два раза в день (ИК и суммарное излучение) или один раз в день (коротковолновая зона)			
Разрешение (ПТ)	20 км			
Технические параметры	Конструкция из двух блоков: Масса: 114 кг Мощность: 100 Вт Скорость передачи данных: 21 кбит/с			
<i>Канал</i>	<i>Спектральный интервал</i>	<i>Эквивалентное шуму излучение</i>	<i>Абсолютная точность</i>	<i>ОСШ</i>
Коротковолновый	0,3–5,0 мкм	0,3 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	0,8 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	225
Канал полной радиации	0,3–100 мкм	0,3 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	0,6 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	750
Узкополосный	8–12 мкм	0,3 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	0,3 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	750

Таблица 3.22. Пример широкополосного радиометра на ГСО: GERB на борту спутника Meteosat второго поколения

<i>GERB</i>	<i>Прибор для наблюдения с геостационарной орбиты за радиационным балансом Земли</i>			
Спутник	Meteosat -8, Meteosat -9, Meteosat -10, Meteosat -11			
Программа исследований	Радиационный баланс Земли: уходящее длинноволновое и коротковолновое излучение на ВГА			
Основные характеристики	Два широкополосных канала			
Метод сканирования	Направление север-юг: режим «pushbroom» линейной матрицей из 256 детекторов Направление восток-запад обеспечивается вращающимся спутником Интегрирование за 5 минут для выполнения требований по отношению сигнал/шум и за 15 минут для синхронизации с прибором SEVIRI			
Охват/цикл	Полный диск каждые 15 минут			
Разрешение (ПТ)	42 км			
Технические параметры	Масса: 25 кг Мощность: 35 Вт Скорость передачи данных: 50,6 кбит/с			
<i>Канал</i>	<i>Спектральный интервал</i>	<i>Эквивалентное шуму излучение</i>	<i>Абсолютная точность</i>	<i>ОСШ</i>
Коротковолновый	0,32–4,0 мкм	0,8 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	2,4 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	1 250
Канал полной радиации	0,32–100 мкм	0,15 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	0,4 Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	400

3.2.9 Приборы для мониторинга солнечного излучения

Приборы имеют следующие основные характеристики:

- a) длины волн в диапазоне солнечной радиации (0,15–50 мкм);
- b) интегрирование по всему диапазону (общее солнечное излучение) и/или спектроскопия в диапазоне 0,15–3,00 мкм;
- c) общее солнечное излучение (ОСИ) измеряется абсолютными методами, такими как при помощи активных резонансных радиометров, ориентированных на Солнце;
- d) предназначены для использования как на НОО, так и на ГСО.

Устройства измерения интенсивности солнечного излучения дополняют широкополосные радиометры в измерениях радиационного баланса Земли. Они также используются для мониторинга солнечной активности в целях наблюдения за космической погодой. Конкретными параметрами, определяющими их рабочие характеристики, являются следующие:

- a) расширение чувствительности в солнечном диапазоне излучения;
- b) способность предоставлять в конкретных условиях спектральную информацию в УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонах.

В таблице 3.23 в качестве примера представлены основные характеристики устройства измерения интенсивности солнечного излучения на НОО (прибор для измерения общего солнечного излучения и его спектрального распределения (TSIS)).

Таблица 3.23. Пример устройства для измерения интенсивности солнечного излучения на НОО: TSIS на борту спутника JPSS – Free Flyer

<i>TSIS</i>	<i>Прибор для измерения общего солнечного излучения и его спектрального распределения</i>
Спутник	JPSS – Free Flyer (требует подтверждения)
Программа исследований	Мониторинг солнечного излучения (интегрального и в разных частях спектра)
Основные характеристики	Комплект: Четыре активных резонансных радиометра для измерения полного потока солнечного излучения (устройство для мониторинга полной интенсивности падающего излучения: диапазон 0,2–10 мкм) Призмный спектрометр для измерения спектральной плотности падающего излучения (устройство для мониторинга спектральной интенсивности падающего излучения: диапазон 0,2–2,0 мкм; спектральное разрешение: 0,25–33 нм)
Метод сканирования	Солнечная ориентация во время движения по орбите; выборка данных каждые две минуты
Охват/цикл	100 минут: одно измерение после интегрирования по всем данным, полученным при движении по дуге орбиты за день
Разрешение (ПТ)	Не применимо (Солнечная ориентация)
Технические параметры	Монитор полной интенсивности падающего излучения: Масса 7,9 кг; мощность 14 Вт; скорость передачи данных 0,53 кбит/с Монитор спектральной плотности потока излучения: Масса 22 кг; мощность 25,3 Вт; скорость передачи данных 4,84 кбит/с

3.2.10 Формирователи изображений молний

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- a) детекторная матрица (ПЗС): непрерывное наблюдение за Землей в очень узком O_2 -диапазоне на 777,4 нм;
- b) измерение частоты вспышек молний и их интенсивности в IFOV;
- c) пространственное разрешение 5–10 км;
- d) сплошная и смежная горизонтальная выборка: полоса захвата несколько сотен километров с НОО и полный диск с ГСО;
- e) предназначены для использования на НОО и ГСО.

Изображения молний могут быть полезны как косвенное свидетельство конвективных осадков и турбулентности для мониторинга электрического поля Земли, а также как косвенное свидетельство образования NO_x . Выборка будет различной на НОО и ГСО:

- a) на НОО измерения могут проводиться в течение короткого интервала видимости одного участка Земли в поле зрения матрицы ПЗС во время движения спутника (около 90 секунд);
- b) на ГСО мониторинг ведется непрерывно.

В таблицах 3.24 и 3.25 представлен один пример формирователя изображений молний на НОО (датчик изображений молний (LIS)) и один на ГСО (геостационарный картограф молний (GLM)).

Таблица 3.24. Пример формирователя изображений молний на НОО: LIS на борту спутника TRMM

<i>LIS</i>	<i>Датчик изображений молний</i>
Спутник	Проект по измерению осадков в тропиках (TRMM)
Программа исследований	Косвенное свидетельство конвективных осадков и турбулентности Косвенное свидетельство образования NO_x Изучение электрического поля Земли
Основные характеристики	ПЗС камера, работающая на 777,4 нм (O_2) для подсчета вспышек и измерения их интенсивности
Метод сканирования	Сканирование в режиме «pushbroom»: матричная решетка 128 x 128 детекторов; полоса захвата 600 км Каждая точка на земле наблюдается непрерывно (каждые 2 мс) на протяжении около 90 секунд
Охват/цикл	Охват в тропическом поясе: несколько последовательных проходов спутника с интервалом ~100 мин; более длинные пропуски с увеличением широты; более регулярный охват на 15°с.ш. и 15°ю.ш.
Разрешение (ПТ)	4 км
Технические параметры	Масса: 21 кг Мощность: 33 Вт Скорость передачи данных: 6 кбит/с

Таблица 3.25. Пример формирователя изображений молний на ГСО: GLM на борту спутника GOES

<i>GLM</i>	<i>Геостационарный картограф молний</i>
Спутник	GOES-R, GOES-S, GOES-T, GOES-U
Программа исследований	Данные о конвективных осадках и турбулентности Данные об образовании NO _x Изучение электрического поля Земли
Основные характеристики	ПЗС-камера, работающая на 777,4 нм (O ₂) для подсчета вспышек и измерения их интенсивности
Метод сканирования	Сканирование в режиме «pushbroom»: матричная решетка 1 372 x 1 300 детекторов; временное разрешение 2 миллисекунды
Охват/цикл	Большая часть диска наблюдается постоянно
Разрешение (ПТ)	8 км
Технические параметры	Масса: 35 кг Мощность: 110 Вт Скорость передачи данных: 77 Мбит/с

3.2.11 Радиолокаторы обнаружения облаков и осадков

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- рабочие частоты в K_u (~14 ГГц), K_a (~35 ГГц) или W (~94 ГГц) диапазонах;
- частота повторения импульсов обеспечивает вертикальное разрешение в несколько сотен метров;
- пространственное разрешение от 2 до 5 км;
- сплошная и смежная горизонтальная выборка; полоса захвата — только из надира до нескольких сотен километров;
- предназначены только для использования на НОО.

Рабочая частота определяет возможные применения:

- K_u -диапазон подходит для интенсивных дождевых осадков (жидкие осадки с размером капель, превышающим 1 см). Не дающие осадков облака (капли размером менее < 0,1 мм) полностью прозрачны, а легкие осадки с трудом поддаются обнаружению. На относительно низких частотах электронное коммутирование, которое необходимо для того, чтобы не допустить механического движения больших антенн, осуществляется достаточно легко. Поэтому могут быть реализованы достаточно большие полосы захвата (несколько сотен километров);
- K_a -диапазон подходит для слабого дождя (из слоистых облаков) и осадков в виде снега. Электронное коммутирование еще возможно и можно реализовать полосы захвата в несколько сотен километров;
- W -диапазон подходит для облаков, не дающих осадки (капли размером менее < 0,1 мм). В ряде работ сообщалось также о его применении для наблюдений за системами облаков, дающих осадки, в особенности на границах зон с осадками/или в случаях без осадков, включая глаз тропического циклона.

В таблицах 3.26 и 3.27 приводится пример двухчастотного (K_u и K_a) радиолокатора для измерения осадков (DPR) и пример радиолокатора профилирования облачности в W-диапазоне (CPR на борту спутника CloudSat).

Таблица 3.26. Пример радиолокатора для измерения осадков: DPR на борту спутника Программы глобальных измерений осадков (ГПМ) Core Observatory

<i>DPR</i>	<i>Двухчастотный радиолокатор для измерения осадков</i>
Спутник	Спутник Программы глобальных измерений осадков (ГПМ) Core Observatory
Программа исследований	Вертикальный профиль интенсивных дождевых осадков (жидких), слабых дождевых осадков и осадков в виде снега
Основные характеристики	Двухчастотный радиолокатор с получением изображения Частоты: 13,6 ГГц и 35,55 ГГц Чувствительность: 0,5 мм/ч на частоте 13,6 ГГц; 0,2 мм/ч на частоте 35,55 ГГц
Метод сканирования	Электронное сканирование Плоская антенная решетка из 148 элементов Полоса захвата: 245 км на частоте 13,6 ГГц; 125 км на частоте 35,55 ГГц
Охват/цикл	Почти глобальный охват за 5 дней Не покрывает высокие широты ($> 65^\circ$)
Разрешение (ПТ)	Горизонтальное: 5 км Вертикальное: 250 м (слепая зона до ~150 м)
Технические параметры	Масса: 780 кг Мощность: 710 Вт Скорость передачи данных: 190 кбит/с

Таблица 3.27. Пример радиолокатора профилирования облачности: CPR на борту спутника CloudSat

<i>CPR</i>	<i>Радиолокатор для получения профилей облаков</i>
Спутник	CloudSat
Программа исследований	Вертикальный профиль воды в облаках, не дающих осадков (жидкая вода и лед)
Основные характеристики	Частота 94,05 ГГц Чувствительность: 30 дБZ
Метод сканирования	Не существует. Выборка вдоль трассы с интервалами 2 км
Охват/цикл	Глобальный охват за 1 месяц при среднем пространственном разрешении 30 км или за 10 дней при среднем пространственном разрешении 100 км
Разрешение (ПТ)	Горизонтальное: 1,4 км (поперек трассы) x 3,5 км (вдоль трассы) Вертикальное: 500 м
Технические параметры	Масса: 230 кг Мощность: 270 Вт Скорость передачи данных: 15 кбит/с

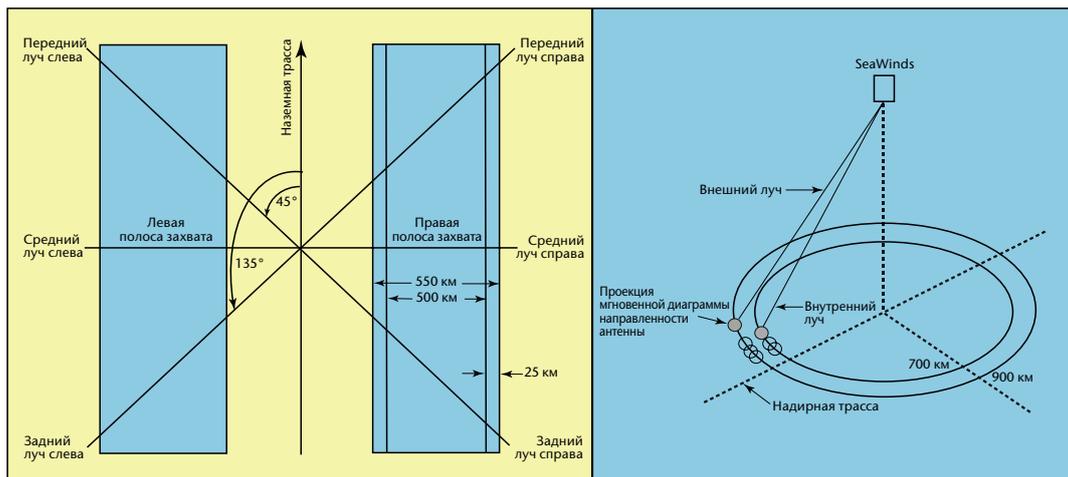


Рисунок 3.9. Две концепции скаттерметров с несколькими режимами обзора. Слева: шесть антенн для трех $\sigma = s$ при азимутальном угле 45° , 90° и 135° соответственно, как с левой, так и с правой стороны от подспутниковой трассы (усовершенствованный скаттерметр ASCAT на борту Metop). Справа: коническое сканирование антенны с двумя лучами и двумя поляризациями, для $\sigma = s$ при четырех азимутальных углах для зон внутри окружности (SeaWinds на борту спутника QuikSCAT). При концепции ASCAT остается непокрытой полоса ~ 700 км вблизи подспутниковой трассы. При концепции SeaWinds пробелов, очевидно, не существует, однако точность является невысокой во внутренней части полосы захвата вблизи подспутниковой трассы.

3.2.12 Радиолокационные скаттерметры

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- рабочие частоты в С- (~ 5 ГГц) или K_u - (~ 14 ГГц) диапазонах;
- очень точная калибровка для измерения коэффициентов обратного рассеяния (σ^0) от капиллярных волн в океане;
- пространственное разрешение: 10–50 км;
- сплошная и смежная горизонтальная выборка; полоса захвата около 1 000 км;
- предназначены только для использования на НОО.

Существует две концепции, которые отличаются, главным образом, принципом сканирования (см. рисунок 3.9):

- электронное сканирование: с боковым обзором, в основном с использованием С-диапазона и обеспечением трех азимутальных проекций дифференциального σ^0 . Это более точный метод для ветра низкой интенсивности над поверхностью океана и влажности почвы;
- коническое сканирование: как правило, используется K_u -диапазон, с двумя лучами и двумя поляризациями, что позволяет получить четыре азимутальных проекции дифференциальных σ^0 .

В таблицах 3.28 и 3.29 представлены радиолокационные скаттерметры, осуществляющие сканирование в режиме «pushbroom» (ASCAT) и коническое сканирование (SeaWinds).

Таблица 3.28. Пример радиолокационного скаттерометра, работающего в режиме «pushbroom»: ASCAT на борту спутника Metop

<i>ASCAT</i>	<i>Усовершенствованный скаттерометр</i>
Спутник	Metop -A, Metop -B, Metop -C
Программа исследований	Вектор ветра над поверхностью океана; влажность почвы в широком масштабе
Основные характеристики	S-диапазон (5,255 ГГц) Боковой обзор с левой и правой сторон 3 антенны с каждой стороны
Метод сканирования	Две 550-км полосы захвата, разделенные 700-км мертвой зоной вдоль трассы 3 обзора для каждого пикселя (азимут 45°, 90° и 135°)
Охват/цикл	Глобальный охват за 1,5 дней
Разрешение (ПТ)	Наилучшее качество: 50 км Стандартное качество: 25 км Базовая выборка: 12,5 км
Технические параметры	Масса: 260 кг Мощность: 215 Вт Скорость передачи данных: 42 кбит/с

Таблица 3.29. Пример радиолокационного скаттерометра с коническим сканированием: SeaWinds на борту спутника QuikSCAT

<i>SeaWinds</i>	
Спутник	Программа быстрых скаттерометров (QuikSCAT)
Программа исследований	Вектор ветра над поверхностью океана
Основные характеристики	K _u -диапазон (13,4 ГГц) Коническое сканирование Два луча Две поляризации
Метод сканирования	Коническое сканирование: два луча, обеспечивающие получение четырех изображений каждого участка с различных углов Полоса обзора: 1 800 км
Охват/цикл	Глобальный охват каждый день
Разрешение (ПТ)	Наилучшее качество: 50 км Стандартное качество: 25 км Базовая выборка: 12,5 км
Технические параметры	Масса: 200 кг Мощность: 220 Вт Скорость передачи данных: 40 кбит/с

3.2.13 Радиолокационные альтиметры

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- а) рабочие частоты в K_u -диапазоне (~14 ГГц), вместе с дополнительными частотами в С- (~5 ГГц) или K_a - (~35 ГГц) диапазонах;
- б) очень точное измерение расстояния между спутником и поверхностью Земли;
- в) пространственное разрешение в диапазоне 20 км;
- г) только надирная ориентация;
- д) предназначены только для использования на НОО.

Радиолокационные альтиметры обычно работают в K_u -диапазоне, используя С-диапазон для коррекции вращения сигнала, вызванного ионосферой. Они связаны с надирным микроволновым радиометром для коррекции, учитывающей водяной пар. Высокоточное определение ими дальности используется для топографии океана; разброс эхо-сигналов содержит информацию о значимой высоте волны, в то время как их интенсивность дает информацию о скорости ветра.

В зависимости от конкретных характеристик прибора и орбиты спутника альтиметры могут быть оптимизированы для различных применений, таких как:

- а) относительно высокой не-солнечно-синхронной орбиты (например, 1 336 км), когда наклонение обеспечивает высокую устойчивость орбиты (например, 66°); особенно подходит для твердой оболочки Земли (геоида) и циркуляции океана;
- б) обработка эхо-сигналов аналогично РСА для синтезирования более высокого пространственного разрешения вдоль подспутниковой трассы (см. рисунок 3.10);
- в) параллельные антенны для выполнения функций альтиметрии с более широкой полосой обзора при помощи интерферометрии, что особенно полезно для землепользования, включая внутренние воды (такие как озера);
- г) двойная частота (С- и K_u -диапазоны), которая позволяет получить информацию об общем содержании электронов между спутником и поверхностью Земли.

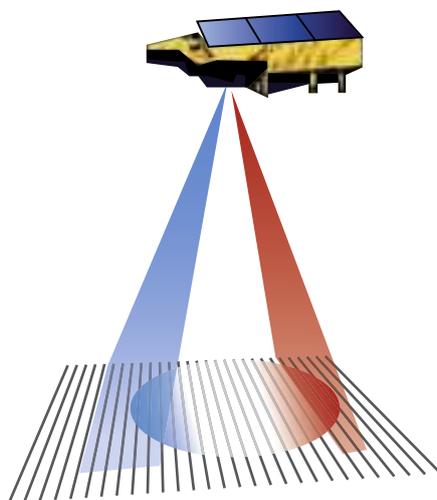


Рис. 3.10. Повышение разрешения альтиметра вдоль трассы спутника путем обработки сигнала аналогично РСА

В таблице 3.30 приводятся основные характеристики радиолокационного альтиметра для получения данных геодезического качества (Poseidon-3).

Таблица 3.30. Пример радиолокационного альтиметра: Poseidon-3 на борту спутника JASON-2

<i>Poseidon-3</i>	<i>Твердотельный радиолокационный альтиметр – 3</i>
Спутник	JASON-2
Программа исследований	Топография океана, геоид, значимая высота волны, скорость ветра, общее содержание электронов
Основные характеристики	2 частоты: 5,3 ГГц; 13,58 ГГц
Метод сканирования	Только в надир Выборка с интервалами 30 км вдоль трассы
Охват/цикл	Глобальный охват за 1 месяц для среднего пространственного разрешения 30 км или за 10 дней для среднего пространственного разрешения 100 км
Разрешение (ПТ)	I FOV -30 км
Технические параметры	Масса: 70 кг Мощность: 78 Вт Скорость передачи данных: 22,5 кбит/с

3.2.14 Радиолокатор с получением изображений (радиолокатор с синтезированной апертурой)

Целый ряд приборов этого типа имеет следующие характеристики:

- а) рабочие частоты в P- (~0,4 ГГц), L- (~1,3 ГГц), S- (~2,7 ГГц), C- (~5,3 ГГц), X- (~9,6 ГГц) или K_u- (~17,2 ГГц) диапазонах. Наиболее часто используются L-, C- и X-диапазоны;
- б) различные комбинации поляризацій для передачи и приема: HH, VV, VV/HH, HH/HV и VV/VH;
- в) обеспечивается оптимальное соотношение между пространственным разрешением и полосой захвата: разрешение 1–30 м соответствует полосе захвата 30–100 км; но разрешение 100–1 000 м соответствует полосе захвата 300–500 км;
- г) боковой обзор, обычно с одной стороны, обеспечивающий высокое разрешение в пределах зоны обзора, составляющей несколько сотен километров;
- д) предназначены только для использования на НОО.

Рисунок 3.11 иллюстрирует режимы функционирования PCA с одним C-диапазоном (усовершенствованный радар с синтетической апертурой (ASAR)).

Рабочая частота является наиболее важной характеристикой, которая оптимизируется для тех задач, для которых предназначен PCA:

- а) P-диапазон больше всего подходит для мониторинга биомассы и гидрологического картирования;
- б) L-диапазон больше всего подходит для наблюдений за волнением и определения объемного содержания почвенной влаги;

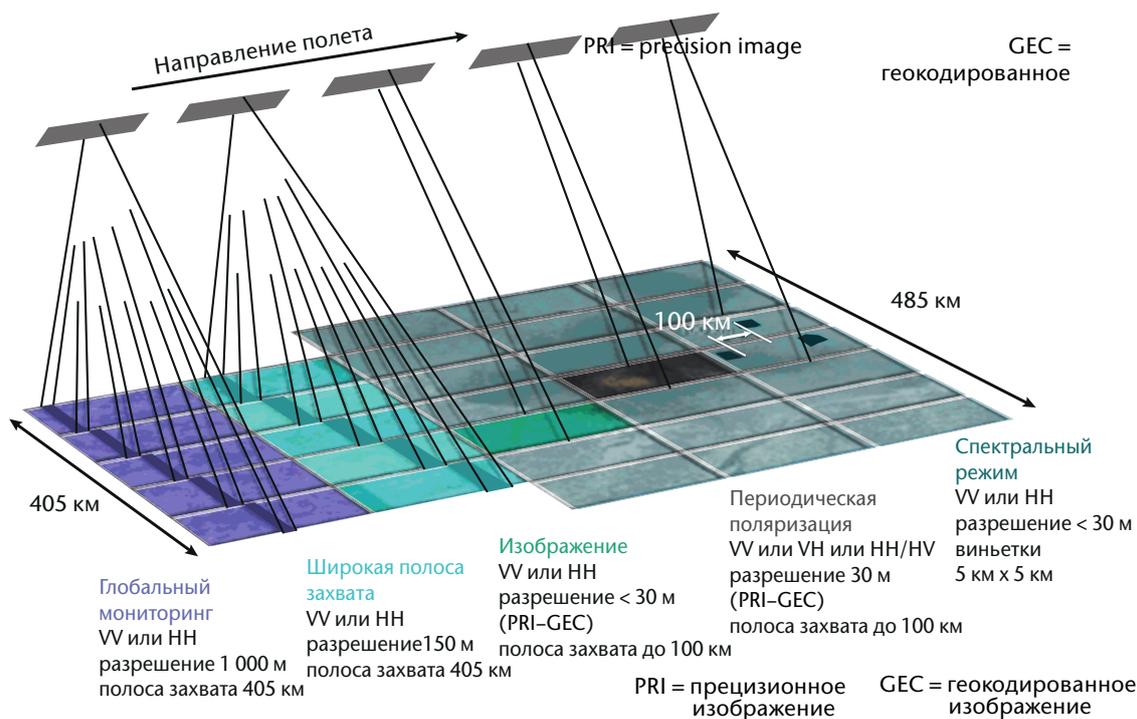


Рис. 3.11. Режимы функционирования ASAR на борту Envisat. В режимах глобального мониторинга и широкой полосы захвата полоса захвата составляет 405 км для 1 000 м или 150 м разрешения. В режимах «изображение» и «периодическая поляризация» 100-километровая полоса захвата с 30-метровым разрешением может быть направлена на одно из семи положений внутри зоны обзора 485 км. В волновом режиме выборка осуществляется на основе виньетки 5 км x 5 км с разрешением 30 м через каждые 100 км вдоль трассы.

- c) S-диапазон больше всего подходит для определения объемного содержания почвенной влаги;
- d) C-диапазон охватывает широкий спектр применений: морской лед, волновые параметры по спектральному анализу фрагментов изображений, влажность поверхностного слоя почвы, характеристики снежного покрова, ледники, подземные воды и т.д. Однако оптимальные наблюдения за каждым отдельным параметром могут проводиться на других частотах;
- e) X-диапазон обеспечивает наилучшее пространственное разрешение и следовательно лучше всего подходит для наблюдений;
- f) K_a-диапазон особенно подходит для снега, который является прозрачным на более низких частотах;
- g) интерферометрия сигналов от одного РСА в различные моменты времени или двух РСА, работающих во время полета в последовательном режиме, позволяет получать цифровую модель рельефа и обнаруживать изменения очертаний (таких как береговой линии и водоемов) и высоты (например, верхнего уровня вулкана).

В таблице 3.31 приводятся основные характеристики РСА C-диапазона (ASAR).

Таблица 3.31. Пример PCA C-диапазона: ASAR на борту спутника Envisat

ASAR	Усовершенствованный радиолокатор с синтезированной апертурой			
Спутник	Envisat			
Программа исследований	Морской лед, волновые параметры по спектральному анализу фрагментов изображений, влажность поверхностного слоя почвы, характеристики снежного покрова, ледники, подземные воды и т. д.			
Основные характеристики	PCA C-диапазона Частота: 5,331 ГГц Мультиполяризационный режим и варьлируемое нацеливание/разрешение			
Метод сканирования	Боковой обзор: 15°–45° от надира Полоса захвата: 100–405 км в зависимости от режима функционирования (см. таблицу ниже)			
Охват/цикл	Глобальный охват за 5 дней в «режиме глобального мониторинга» (при использовании 70 % времени) Более длительные периоды времени (вплоть до 3 месяцев) для других режимов работы			
Разрешение (ПТ)	от 30 м до 1 км в зависимости от режима работы (см. таблицу ниже)			
Технические параметры	Масса: 832 кг Мощность: 1 400 Вт Скорость передачи данных: 100 Мбит/с			
Режим функционирования	Разрешение	Полоса захвата	Зона обзора	Поляризация
Полосовой	30 м	100 км	485 км	HH или VV
Scan-PCA-поляризационный	30 м	100 км	485 км	VV/HH, HH/HV, VV/VH
Scan-PCA-широкополосный	150 м	405 км	405 км	HH или VV
Scan-PCA-широкополосный	150 м	405 км	405 км	HH или VV
Scan-PCA-глобального мониторинга	1 км	405 км	405 км	HH или VV
Волнение-спектральный	30 м	5 x 5 км ² изображений, выборка через интервалы 100 км		HH или VV

3.2.15 Лидарная аппаратура

Ряд приборов этого типа имеет следующие основные характеристики:

- рабочие длины волн в УФ- (например, 355 нм), ВИД- (например, 532 нм), БИК- (например, 1 064 нм) или КВИК- (например, 1 600 нм) диапазонах;
- возможно использование двух длин волн, двух приемников (для рассеяния Ми и Рэлея); поляриметрия;
- горизонтальное разрешение в 100-метровом диапазоне, которое часто может снижаться до 50 км для получения достаточного количества декоррелированных выборок;
- вертикальное разрешение в 100-метровом диапазоне (примерно 10 см для лидарных альтиметров);

- e) сканирование не проводится: наблюдения в надир или под углом.

Космический лидар представляет собой массивное устройство, которое требует оптимизации в зависимости от конкретных видов применения:

- a) доплеровские лидары в основном функционируют в УФ-диапазоне, используя как рассеяние Ми, так и рассеяние Рэлея, и предназначены для слежения за аэрозолем и молекулами воздуха; позволяют получить косую проекцию радиальной составляющей для скорости ветра в безоблачной атмосфере и аэрозоля;
- b) лидары обратного рассеяния функционируют на одной (в УФ-диапазоне) или двух (ВИД- и БИК-диапазоны) длинах волн, часто имеют более одной поляризаций; наблюдения в надир, позволяющие определить профиль аэрозоля, высоту верхней границы облака и атмосферные неоднородности, такие как высота верхней границы планетарного пограничного слоя и тропопауза;
- c) лидарные альтиметры обычно функционируют на двух длинах волн (ВИД- и БИК-диапазоны); наблюдения в надир используются как очень высокое вертикальное разрешение (для возвышений морского льда) и горизонтальное разрешение (ледовые границы);
- d) лидары дифференциального поглощения функционируют на одной длине волны с центром на максимуме поглощения одной из малых газовых составляющих в УФ-, ВИД-, БИК- или КВИК-диапазонах, а также в близкорасположенных окнах прозрачности; наблюдения ведутся в надир, с высоким вертикальным разрешением за такими компонентами, как O₃, H₂O и CO₂.

В таблицах 3.32–3.35 приводятся характеристики доплеровского лидара (доплеровский лазерный прибор для зондирования атмосферы (ALADIN)), лидара обратного рассеяния (лидар с ортогональной поляризацией для исследования облаков и аэрозолей (CALIOP)), лидарного альтиметра (лазерная альтиметрическая система для обслуживания наук о Земле (GLAS)) и лидара дифференциального поглощения (CO₂ лидар).

Таблица 3.32. Пример доплеровского лидара: ALADIN на борту спутника ADM-Aeolus

<i>ALADIN</i>	<i>Лазерный доплеровский измеритель параметров атмосферы</i>
Спутник	Программа по изучению динамики атмосферы (ADM)-Aeolus
Программа исследований	Профиль ветра в безоблачной атмосфере, профиль аэрозоля, высота верхней границы облаков
Основные характеристики	Одна длина волны (355 нм), боковой обзор: 35° от надира Лазер с высоким спектральным разрешением (ЛВСП) для распознавания типов аэрозолей
Метод сканирования	Сканирование не проводится Эхо-сигналы усредняются по полю зрения 50 км Выборка в поле зрения проводится с интервалами 200 км
Охват/цикл	Глобальный охват за один месяц для среднего пространственного разрешения 30 км, или 10 дней для пространственного разрешения 100 км
Разрешение (ПТ)	Горизонтальное: 50 км поля зрения при выборке с интервалами 200 км Вертикальное: от 250 м в планетарном пограничном слое до 2 км на высотах ~20 км
Технические параметры	Масса: 500 кг Мощность: 840 Вт Скорость передачи данных: 11 кбит/с

Таблица 3.33. Пример лидара обратного рассеяния: CALIOP на борту спутника CALIPSO

<i>CALIOP</i>	<i>Лидар с ортогональной поляризацией для наблюдения за облаками и аэрозолями</i>
Спутник	Лидар и инфракрасный радиолокатор для спутниковых наблюдений облаков и аэрозолей (CALIPSO)
Программа исследований	Профиль аэрозоля, высота верхней границы облаков и атмосферные неоднородности (высота верхней границы планетарного пограничного слоя и тропопаузы)
Основные характеристики	Две длины волны (532 и 1 064 нм) Измерения с двумя ортогональными поляризациями
Метод сканирования	Только наблюдения в надир Выборка с интервалами 330 м вдоль трассы Почти непрерывное профилирование
Охват/цикл	Глобальный охват за один месяц для среднего пространственного разрешения 30 км или 10 дней для среднего пространственного разрешения 100 км
Разрешение (ПТ)	Горизонтальное: IFOV 70 м, выборка с интервалами 333 м вдоль трассы Вертикальное: 30 м
Технические параметры	Масса: 156 кг Мощность: 124 Вт Скорость передачи данных: 332 кбит/с

Таблица 3.34. Пример лидарного альтиметра: GLAS на борту спутника ICESat

<i>GLAS</i>	<i>Геофизическая лазерная альтиметрическая система</i>
Спутник	Спутник для изучения льда, облачности и возвышения суши (ICESat)
Программа исследований	Толщина и топография полярного ледового щита, высота верхней границы облаков, аэрозоли
Основные характеристики	Две длины волны (532 и 1 064 нм)
Метод сканирования	Только наблюдения в надир Выборка с интервалами 170 м вдоль трассы Почти непрерывное профилирование
Охват/цикл	Глобальный охват за 183 дня (периодичность повторения орбиты) Пропуски поперек трассы 2,5 км на широте 80° (15 км на экваторе)
Разрешение (ПТ)	Горизонтальное: IFOV 66 м, выборка с интервалами 170 м вдоль трассы Вертикальное: 10 см для поверхности, 200 м для верхней границы облака
Технические параметры	Масса: 298 кг Мощность: 300 Вт Скорость передачи данных: 450 бит/с

Таблица 3.35. Пример лидара дифференциального поглощения: лидар CO₂ на борту спутника ASCENDS

<i>Лидар CO₂</i>	
Спутник	Активное зондирование эмиссии CO ₂ в ночное, дневное время и по временам года (ASCENDS)
Программа исследований	Мониторинг CO ₂ с беспрецедентной точностью при помощи лазерного локатора
Основные характеристики	Длина волны 1,572 мкм для CO ₂ Также рассматривается возможность мониторинга O ₂ на 1 260 нм или на 765 нм
Метод сканирования	Только наблюдения в надир
Охват/цикл	Глобальный охват за один месяц для среднего пространственного разрешения 30 км или за 10 дней для среднего пространственного разрешения 100 км
Разрешение (ПТ)	Горизонтальное: 125 м Вертикальное: весь столб атмосферы
Технические параметры	Масса: 420 кг Мощность: 920 Вт Скорость передачи данных: 1,9 Мбит/с

3.2.16 Градиометры/акселерометры

Знание гравитационного поля является исключительно важным для моделирования Земли как твердого тела. Существуют несколько спутниковых методов для решения этой проблемы:

- a) длинноволновые составляющие гравитационного поля измеряются при помощи радиолокационной или лидарной альтиметрии, либо при помощи высокоточной орбитографии (например, лазерной дальнометрии, радиопозиционирования, ГНСС, слежения за звездами);
- b) коротковолновые составляющие (аномалии и возмущения гравитационного поля) наблюдаются на высоте спутника при помощи акселерометров и градиометров, совмещенных с системами определения расстояния между спутниками. Акселерометр измеряет колебания гравитационного поля вдоль траектории спутника. Градиометр охватывает целый ряд акселерометров, которые измеряют тензор градиента гравитационного поля. Спутниковые дальномерные системы представляют собой приемопередающие системы, работающие, как правило, в K-диапазоне (24 ГГц) и K_a-диапазоне (32 ГГц). Они предназначены для точного измерения расстояния и изменений в расстоянии между спутниками на скоординированных орбитах. Такие же измерения могут производиться путем приема сигналов с десятков спутников ГНСС: это позволяет определять изменения в местоположении с особой точностью.

В таблицах 3.36 и 3.37 приводятся характеристики градиометра/акселерометра (трехосный электростатический гравитационный градиометр (EGG)) и высокоточной системы измерения расстояния между спутниками (HAIRS).

Таблица 3.36. Пример акселерометра/градиометра: EGG на борту спутника GOCE

<i>EGG</i>	<i>Трехосный электростатический гравитационный градиометр</i>
Спутник	Исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений (GOCE)
Программа исследований	Твердая оболочка Земли Наблюдение за гравитационным полем Земли вдоль орбиты
Основные характеристики	Три пары трехосных акселерометров, специально скомпонованных для измерения тензора градиента гравитационного поля Точность: $10^{-12} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ Разрешение: $2 \cdot 10^{-12} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$

Таблица 3.37. Пример системы измерения расстояния между спутниками: HAIRS на борту спутника по изучению климата и гравитационных возмущений (GRACE)

<i>HAIRS</i>	<i>Высокоточная система измерения расстояния между спутниками</i>
Спутник	GRACE (2 спутника, одновременно находящиеся в полете на расстоянии 220 км друг от друга)
Программа исследований	«Твердая оболочка Земли» Наблюдения за гравитационным полем Земли вдоль орбиты
Основные характеристики	Двухчастотная дальнометрия в К-диапазоне (24 ГГц) и K_a -диапазоне (32 ГГц) Точность: 10 мкм

3.2.17 Приборы для мониторинга солнечной активности

Мониторинг солнечной активности осуществляется путем дистанционного зондирования или посредством измерений *in situ* солнечного ветра в глубоком космическом пространстве или с орбиты Земли. Могут быть использованы различные подходы к проведению измерений:

- электромагнитное излучение: измеряется радиометрами, спектрометрами и поляриметрами γ -лучей (менее 0,001 нм), X-лучей (0,001–10 нм), самых коротких длин волн УФ-излучения (10–120 нм), УФ-излучения (120–380 нм), ВИД (380–780 нм) и более длинных длин волн, включая радиоволны (более 1 м);
- энергетические частицы (электроны, протоны, α -частицы, ионы, космические лучи, нейтроны): диапазон энергий обычно разбивается на высокоэнергетический, средне-энергетический и низкоэнергетический; при этом границы диапазонов зависят от типа заряженных частиц; измерения могут интегрироваться по всему энергетическому диапазону или части диапазона; внутри диапазона может быть использована спектроскопия;
- магнитные и электрические поля, измеряемые непосредственно в солнечном ветре и определяемые по фотосфере; эти поля определяются на основе либо измерений солнечного ветра, либо спектроскопии солнечных изображений в видимом диапазоне на основе эффекта Зеемана, или путем выполнения доплеровского анализа или использования множественной поляризации;

- d) измерения могут проводиться путем интегрирования по всему солнечному диску; получение изображения солнечного диска или получение изображения только одной солнечной короны в результате затенения диска (коронография);
- e) одним из конкретных видов наблюдений является наблюдение за интенсивностью солнечного излучения, либо его интегральной величины или спектрально разрешаемого (см. 3.2.9).

Пример характеристик аппаратного комплекса для мониторинга солнечной активности из точки L1 Лагранжа (точки либрации), обсерватории для солнечных и гелиосферических исследований (SOHO), приводится в таблице 3.38.

Таблица 3.38. Пример аппаратного комплекса измерения солнечной активности: аппаратура SOHO

<i>Аппаратура SOHO</i>	
Спутник	Обсерватория для солнечных и гелиосферических исследований (SOHO)
Программа исследований	Наблюдение за Солнцем из точки Лагранжа L1
Основные характеристики	Приборный комплекс для дистанционного зондирования солнечной атмосферы: Устройство измерения потоков ультрафиолетового излучения (SUMER) Спектрометр для коронарной диагностики (CDS) Телескоп для получения изображений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне (EIT) Ультрафиолетовый коронограф и спектрометр (UVCS) Спектрометрический коронограф с большим углом (LASCO) Измеритель анизотропии солнечного ветра (SWAN) Приборный комплекс для изучения <i>in situ</i> частиц солнечного ветра: Система анализа зарядов, элементов и изотопов (CELIAS) Комплексный анализатор горячих и энергетических частиц (COSTEP) Экспериментальное наблюдение релятивистских ядер и электронов (ERNE) Гелио-сейсмологический аппаратный комплекс (изучение недр Солнца): Прибор наблюдения низкочастотных глобальных колебаний Солнца (GOLF) (Прибор для исследований солнечной постоянной и гравитационных колебаний (VIRGO) Измеритель доплеровского смещения (MDI)
Метод сканирования	Солнечная ориентация
Охват/цикл	Непрерывный из точки Лагранжа L1
Технические параметры (спутника)	Масса: 1 850 кг Мощность: 1,5 кВт Скорость передачи данных: 200 кбит/с

3.2.18 Приборы для мониторинга параметров космической среды

Мониторинг параметров космической среды на уровне платформы позволяет получить информацию, которая используется для мониторинга и прогнозирования общих условий космической погоды, а также для обеспечения безопасности платформы. Такая аппаратура обычно включает в себя:

- a) детекторы заряженных частиц, предназначенные для конкретных диапазонов энергии, либо интегральных, либо спектрально разрешаемых;
- b) магнетометры и электрометры.

Пример характеристик аппаратного комплекса для мониторинга *in situ* параметров космической среды ГАК-М приводится в таблице 3.39.

Таблица 3.39. Пример аппаратного комплекса для мониторинга параметров космической среды: ГАК-М на борту спутника Метеор-М

ГАК-М	Гелиогеофизический аппаратный комплекс
Спутник	«Метеор-М» № 1, «Метеор-М» № 2, «Метеор-М» № 2-1, «Метеор-М» № 2-2
Программа исследований	Мониторинг параметров космической среды на высоте спутника
Основные характеристики	Аппаратный комплекс: Спектрометр геоактивных излучений (МСГИ-МКА): Потоки электронов в энергетическом диапазоне 0,1–15 кэВ (канал высокой чувствительности) Потоки ионов (протонов) в энергетическом диапазоне 0,1–15 кэВ (канал высокой чувствительности) Потоки электронов в энергетическом диапазоне 0,1–15 кэВ (канал низкой чувствительности) Мониторинг интегральных потоков электронов с пороговой энергией 40 кэВ Система радиационного мониторинга (КГИ-4С): Общий поток протонов с пороговой энергией: 5, 15, 25, 30 и 40 МэВ Общий поток электронов с пороговой энергией: 0,17; 0,7; 1,7; 2,0 и 3,2 МэВ Потоки протонов с пороговой энергией: 25 и 90 МэВ
Технические параметры	Масса: 17 кг Мощность: 13,6 Вт Скорость передачи данных: 16 кбит/с

3.2.19 Магнетометры и датчики электрического поля

Магнитное и электрическое поля в магнитосфере могут быть измерены *in situ*, когда спутник движется по своей орбите. Если это высокоэксцентрическая орбита, то она пересекает магнитосферу на различных широтах, обеспечивая получение трехмерных профилей. Градиенты полей лучше наблюдать, когда сразу несколько спутников находятся на скоординированных орбитах. Общепринятыми приборами для этих целей являются:

- a) скалярные или векторные магнетометры;
- b) средства измерения потока электронов (используемые для расчета электрического поля).

Пример характеристик аппаратного комплекса Cluster для трехмерных наблюдений за магнитосферой с использованием четырех спутников приводится в таблице 3.40.

Таблица 3.40. Пример аппаратного комплекса для мониторинга параметров магнитосферы: аппаратура Cluster

<i>Аппаратура Cluster</i>	
Спутник	Cluster A, B, C и D (четыре спутника, работающие одновременно на скоординированных орбитах)
Программа исследований	Мониторинг магнитосферы в 3-D
Основные характеристики	Комплекс включает в себя следующие приборы: Феррозондовый магнитометр (FGM) Пространственно-временной анализ флуктуаций поля (STAFF) Электрические поля и волны (EFW) Волны высокой частоты и исследование электронной плотности по релаксации (WHISPER) Широкополосные данные (WBD) Цифровой волновой процессор (DWP) Измеритель электронного смещения (EDI) Эксперимент: Кластерный ионный спектрометр (CIS) Прибор для исследования плазмы, электронов и токов (PEACE) Исследования при помощи адаптивных детекторов частиц (RAPID) Прибор активного контроля потенциала космического аппарата (ASPOC)
Метод сканирования	4 спутника, пересекающие магнитосферу на высокоэллиптических орбитах
Охват/цикл	Непрерывный; <i>in situ</i> вдоль орбиты
Технические параметры (одного спутника)	Масса: 1 200 кг Мощность: 224 Вт Скорость передачи данных: 16,9 кбит/с