

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R RS.1804*

Технические и эксплуатационные характеристики систем спутниковой службы исследования Земли (ССИЗ), работающих на частотах выше 3000 ГГц

(Вопрос МСЭ-R 235/7)

(2007)

Сфера применения

Многие годы в системах ССИЗ, работающих на частотах выше 3000 ГГц, находятся в эксплуатации различные приборы. Эти приборы включают в себя как активные, так и пассивные устройства, размещены в системах на геостационарной орбите (ГСО) и НГСО и используют узкие спектральные линии, а также широкие полосы частот. В настоящей Рекомендации обобщаются сведения о приборах, космических аппаратах, представляющем интерес спектре и типе данных, которые собирают с использованием спектра выше 3000 ГГц.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что наблюдения на частотах выше 3000 ГГц обеспечивают данные, имеющее важнейшее значение для исследования характеристик Земли и ее явлений природы, в том числе данные, касающиеся состояния окружающей среды;
- b) что для получения данных измерений с более высокой точностью и четкостью постоянно развиваются технологии для датчиков спутниковой службы исследования Земли (ССИЗ), работающих на частотах выше 3000 ГГц;
- c) что спектр частот выше 3000 ГГц используется для систем активных и пассивных датчиков, а также многих применений электросвязи;
- d) что поскольку эти системы быстро расширяются и их количество быстро увеличивается, может возрасти вероятность вредных помех между датчиками в ССИЗ и в других службах, работающих на частотах выше 3000 ГГц;
- e) что лазерное излучение в направлении Земля-космос, используемое некоторыми наземными станциями оптического наблюдения для проведения точной локации спутников и луны и для измерения параметров состояния атмосферы, представляет собой возможный источник помех чувствительным спутниковым пассивным датчикам и потенциально может их повредить;
- f) что несмотря на наличие существенных различий между технологиями, используемыми в этой части спектра, в сравнении с технологиями, используемыми на более низких частотах (например, измерение протонов в отличие от интегрирования мощности в динамике по времени), в таких технологиях также есть и много общего;
- g) что следует рассмотреть меры защиты и факторы, связанные с совместным использованием частот, для обеспечения того, чтобы датчики ССИЗ могли продолжать работать на частотах выше 3000 ГГц без вредных помех,

* Настоящую Рекомендацию следует довести до сведения 1-й, 3-й, 4-й, 8-й и 9-й Исследовательских комиссий по радиосвязи.

рекомендует,

1 чтобы операторы систем ССИЗ, работающих на частотах выше 3000 ГГц, учитывали возможность помех от передатчиков научных служб (включая ССИЗ) при отборе требований к программе полета и выборе конструкции датчиков;

2 чтобы в исследованиях помех системам ССИЗ, работающим на частотах выше 3000 ГГц, и помех от таких систем учитывались технические и эксплуатационные параметры, приведенные в Приложении 1.

Приложение 1

1 Введение

Многие годы в системах ССИЗ, работающих на частотах выше 3000 ГГц, находятся в эксплуатации различные приборы. Такие приборы работают в нескольких режимах и предоставляют разнообразные виды данных. Эти инструменты включают в себя как активные, так и пассивные устройства, размещены в системах на геостационарной орбите (ГСО) и НГСО и используют узкие спектральные линии, а также широкие полосы частот. В информации, представленной в следующих разделах, суммируются сведения о приборах, космических аппаратах, представляющем интерес спектре и типе данных, которые собирают с использованием спектра выше 3000 ГГц.

2 Приборы

Приборы, которые будут описаны, распределяются по следующим категориям: формирователи изображений, радиометры/спектрометры или высотомеры лазерных радаров (лидаров). Формирователи изображений – это приборы, основная цель которых заключается в предоставлении двухмерных изображений физических явлений, таких как облака или поверхность Земли. Радиометры/спектрометры – это приборы, измеряющие поток электромагнитного излучения. Высотомеры лидаров – это приборы, измеряющие высоту от космического аппарата до земной поверхности, находящейся непосредственно под ним, с помощью импульсов светового излучения.

2.1 Технические характеристики воспроизведения изображений

Одним из самых первых видов использования спектра выше 3000 ГГц для применений ССИЗ является воспроизведение изображений поверхности Земли и облачного покрова. Затем системы воспроизведения изображений использовались для сбора данных о распределении и частоте грозных разрядов. Описанные ниже три типа систем воспроизведения изображений типичны для общих возможностей систем ССИЗ, обеспечивающих воспроизведение изображений на частотах выше 3000 ГГц. Четвертая система, описанная ниже, с помощью оптических средств определяет погодные явления.

2.1.1 Многоспектральное воспроизведение изображений облаков

Системы А1–А3 функционируют как единый прибор, который обеспечивает сбор изображений на 14 различных длинах волны от 0,5 до 12 мкм. Этот прибор используется для долгосрочного мониторинга облаков при пространственном разрешении 15–90 м, в зависимости от измеряемой длины волны. Он разделен на три отдельные системы, каждая из которых осуществляет собственный телескопический мониторинг различных наборов длины волны. В системах используются следующие полосы частот:

- видимый/ближний ИК-диапазон спектра (VNIR) – 0,50–0,90 мкм (600–333 ТГц¹);
- коротковолновый ИК-диапазон спектра (SWIR) – 1,6–2,43 мкм (187,5–123 ТГц);
- тепловой ИК-диапазон спектра (TIR) – 8–12 мкм (37,5–25 ТГц).

Этот прибор, отличающийся высокой пространственной разрешающей способностью, широким покрытием спектра и способностью воспроизведения стереоскопических изображений, обеспечивает важнейшие измерения количества облаков, их типа, пространственного распределения, морфологии и свойств излучения. В то время как для измерения наборов аналогичных параметров используются многие приборы формирования изображений облаков, способность осуществлять наблюдения с высоким пространственным разрешением позволяет получать данные, которые могут быть непосредственно связаны с подробно описываемыми физическими свойствами. Кроме того, в районах, где нет облачного покрова, этот прибор обеспечивает долгосрочный мониторинг местных и региональных изменений поверхности Земли, которые либо приводят к глобальным изменениям климата, либо являются их последствием (например, землепользование, обезлесивание, опустынивание, изменение уровня воды в озерах и мелководных временных водоемах и другие изменения, связанные с растительным покровом, движением ледников и вулканическими процессами). В таблице 1 приводятся обобщенные технические параметры этого прибора.

ТАБЛИЦА 1

**Технические параметры систем многоспектрального
воспроизведения изображений облаков**

Система	А1	А2	А3
Область видимости (градусы)	6,09	4,9	4,9
Моментальная область видимости (мкрад)	21,5	42,6	128
Измеренная длина волны (мкм)	0,52–0,60 0,63–0,69 0,76–0,86	1,60–1,70 2,145–2,185 2,185–2,225 2,235–2,285 2,295–2,365 2,360–2,430	8,125–8,475 8,475–8,825 8,925–9,275 10,25–10,95 10,95–11,65
Пространственное разрешение (м)	15	30	90
Скорость передачи данных (Мбит/с)	62	23	4,2
Боковое ориентирование (градусы)	±24	±8,55	±8,55
Боковое ориентирование (км)	±318	±116	±116
Ширина полосы обзора (км)	60	60	60
Тип детектора	Кремниевый (Si)	Силицидо-платиново-кремниевый (PtSi-Si)	Ртутно-теллуридо-кадмиевый (HgCdTe)
Квантование (биты)	8	8	12

¹ 1 ТГц = 1000 ГГц.

2.1.2 Многоспектральное воспроизведение изображений поверхности Земли

Системы В1–В5 функционируют совместно как единый прибор для сбора изображений на семи длинах волны в узком диапазоне 0,45–12,5 мкм и в одном панхроматическом диапазоне 0,5–0,9 мкм. Этот прибор используется для описания и мониторинга изменений в процессах, происходящих с растительным покровом и на земной поверхности. Высокое пространственное разрешение (15–60 м, в зависимости от диапазона длины волны) и сезонное глобальное покрытие этого прибора позволят оценивать как скорость изменения растительного покрова, так и местные процессы, которые вызвали такие изменения. Обезлесивание, разрушение экосистем, продуктивность сельского хозяйства, динамика ледников, риски в прибрежных районах и мониторинг вулканов являются типичными примерами использования этого прибора в научных целях.

Этот прибор обеспечивает измерения с помощью одиночной апертуры в четырех полосах частот:

- видимый диапазон (VIS) – 0,45–0,69 мкм (667–435 ТГц);
- ближний ИК-диапазон (NIR) – 0,76–0,90 мкм (395–333 ТГц);
- SWIR – 1,55–2,35 мкм (194–128 ТГц);
- TIR – 10,42–12,5 мкм (28,8–24 ТГц).

Система В6 – это радиометр, действующий в видимом и ближнем ИК-диапазоне, для наблюдения за сушей и прибрежными зонами. Этот прибор используется для составления карт территорий, занятых сооружениями, и классификационных карт землепользования для мониторинга окружающей среды района. Он обладает возможностью бокового ориентирования для мониторинга бедствий.

Система В7 – это панхроматический радиометр с пространственным разрешением 2,5 м. Для получения данных о местности, включая ее высоту, этот прибор включает три оптические системы для переднего обзора, надира и заднего обзора. Он обеспечивает точную географическую информацию, которая подходит для составления карт мира масштабом 1/25 000.

В таблице 2 приводятся обобщенные технические параметры этих систем.

ТАБЛИЦА 2

Технические параметры систем многоспектрального воспроизведения изображений поверхности Земли

Система	В1	В2	В3	В4	В5	В6	В7
Моментальная область видимости (мкрад)	42,5	42,5	42,5 × 39,4	42,5 × 85,0	21,25 × 18,5	14,28	3,57
Измеренная длина волны (мкм)	0,45–0,52 0,52–0,60 0,63–0,69	0,76–0,90	1,55–1,75 2,08–2,35	10,42–12,50	0,50–0,90	0,45–0,50 0,52–0,60 0,61–0,69 0,76–0,89	0,52–0,77
Пространственное разрешение (м)	30	30	30	60	15	10	2,5
Скорость передачи данных	Данные объединены в поток данных, передаваемый со скоростью 150 Мбит/с					160 Мбит/с (после сжатия данных: 120 Мбит/с)	320 Мбит/с × 3 телескопа = 960 Мбит/с (после сжатия данных: 240 Мбит/с, 120 Мбит/с)
Ширина полосы обзора	185 км (±7,5°), каждый кадр изображения представляет приращение в 170 км вдоль траектории спутника					70 км	до 70 км
Количество детекторов на полосу	16	16	16	8	32	7 000	40 000

2.1.3 Гиперспектральное воспроизведение изображения

Этот инструмент работает таким же образом, что и многоспектральные формирователи изображения, однако при гиперспектральном анализе используются каналы непрерывного спектра, что позволяет использовать производные методы и сложные методы расчета. Гораздо большее количество полос дает возможность рассматривать более сложные системы без предварительного отбора, присущего многоспектральным системам. Гиперспектральное воспроизведение изображений имеет широкий спектр применений в горнодобывающей промышленности, геологии, лесном хозяйстве, сельском хозяйстве и природопользовании.

В гиперспектральном формирователе изображений Системы С используются 220 полос в диапазоне спектра 0,4–2,5 мкм (от 750 до 120 ТГц). Подробная классификация землевладений с использованием Системы С позволит осуществлять более точную дистанционную разведку полезных ископаемых, лучше прогнозировать урожайность, делать более точные оценки и составлять более точные карты локализации.

В таблице 3 приводятся обобщенные технические параметры этой системы.

ТАБЛИЦА 3
Технические параметры системы гиперспектрального
воспроизведения изображения

Система	С
Моментальная область видимости (мкрад)	43
Измеренная длина волны (мкм)	0,4–2,5 (непрерывная по 220 полосам)
Пространственное разрешение (м)	30
Скорость передачи данных	250–500 Мбайт за периоды сбора в 8–12 с
Формат снимка (км ²)	7,6 × 100
Количество детекторов на полосу	1 (220 отдельных детекторов)

2.1.4 Зондирование грозовых разрядов

Система D исследует глобальное распространение грозовых разрядов, его взаимосвязь с конвективными осадками и связь с глобальной электрической сетью. Этот прибор состоит из несканирующего формирователя изображения, оптимизированного для определения местоположения и обнаружения грозовых разрядов, с разрешением в зависимости от масштабов грозы (от 4 до 7 км), над крупным районом (600 × 600 км) поверхности Земли. Эта система может осуществлять мониторинг отдельных гроз в своей области видимости в течение 80 с, достаточно долго для того, чтобы оценить коэффициент вспышки молнии. Сочетание четырех методов используется для извлечения данных по грозовым разрядам из изображения окружающей обстановки. Для этих методов необходима возможность отделять пространственные, временные и спектральные данные из последовательных кадров изображения, с тем чтобы среди других излучений опознавать характерные признаки грозовых разрядов. Для подтверждения того, что продолжительность излучения приблизительно равна продолжительности излучения вспышки молнии (обычно ~400 мкс), требуется временная фильтрация. Для подтверждения того, что в спектре грозовых разрядов 0,7774 мкм (385,9 ТГц) присутствует энергия с сильным мультиплетом излучения OI(1), требуется спектральная фильтрация. Затем необходима пространственная фильтрация, для того чтобы определить местоположение грозового разряда.

В таблице 4 приводятся обобщенные технические параметры этой системы.

ТАБЛИЦА 4
Технические параметры системы зондирования грозových разрядов

Система	D
Область видимости (мкрад)	80 × 80
Моментальная область видимости (мкрад)	0,7
Измеренная длина волны (мкм)	0,7774
Пространственное разрешение (м)	~5
Скорость передачи данных (кбит/с)	6
Формат снимка (км)	600 × 600
Детектор	128 × 128 CCD

2.2 Радиометрия и спектрометрия

Радиометрия и спектрометрия – это особые методы измерения, которые могут применяться по отдельности или в сочетании для мониторинга химического состава атмосферы (включая загрязнители), метеорологических тенденций, структуры облаков и характеристик земной поверхности. Эти системы могут работать на частотах с областью спектра от ультрафиолетового (т. е. длина волны < 0,4 мкм) до тепло-инфракрасного (т. е. длина волны > 10,0 мкм). Эти инструменты могут работать в режимах с постоянным сканированием, сканированием или фиксированным наведением при расположении целей на поверхности, а также в лимбе Земли.

Радиометрические измерения, как правило, производятся по менее чем 50 различным полосам без строгого фильтрования. В отличие от этого, спектрометрические измерения могут обеспечить одновременный сбор данных по тысячам узких полос. Ценную информацию можно получить на основе обоих методов измерения не только путем изучения данных по отдельным полосам, но и путем оценки различных данных, полученных на основе данных по многочисленным полосам.

Система E1 – это бортовой прибор, специально предназначенный для измерения глобальных показателей изменения климата. Система E1 со спектральным покрытием 3,7–15,4 мкм (81–19,5 ТГц) может обеспечить весьма точное измерение содержания паров воды и парниковых газов в атмосфере, а также составление точных трехмерных карт паров воды и слежение за распределением парниковых газов в атмосфере.

Система E2 играет важнейшую роль в разработке согласованных, глобальных интерактивных системных моделей Земли, которые могут прогнозировать глобальные изменения с помощью измерения параметров, касающихся почвы, облаков, а также границ и температур аэрозолей, биогеохимии океанов и высоты вершины облаков. Этот прибор обеспечивает высокую радиометрическую чувствительность (12 бит) в 36 полосах спектра с длиной волны от 0,4 мкм до 14,4 мкм (от 750 до 20,8 ТГц).

Система E3 обеспечивает глобальные долгосрочные измерения ключевых компонентов атмосферы Земли, при этом наиболее важные из них – это вертикальное распределение аэрозолей, озона и паров воды в верхних слоях тропосферы через стратосферу. Этот прибор представляет собой дифракционный спектрометр, который измеряет ультрафиолетовую/видимую энергию с использованием 800-элементной линейной антенной решетки приборов с зарядовой связью (CCD) для обеспечения непрерывного спектрального покрытия между 0,29 и 1,03 мкм (1034–291 ТГц). Дополнительная информация по аэрозолям предоставляется дискретным фотодиодом на 1,55 мкм (193,5 ТГц).

Такая конфигурация дает возможность с помощью этого прибора проводить многочисленные измерения показателей поглощения заданных газообразных частиц и измерять многие длины волны широкополосного затухания под влиянием аэрозолей.

Система E4 – это оптический датчик, обеспечивающий наблюдение отраженного солнечного излучения от поверхности Земли, в том числе земной поверхности, океанов и облаков, и/или инфракрасного излучения с использованием многоканальной системы для измерения биологического состава, такого как хлорофилл, органические вещества и вегетативный индекс, а также температуры, снега и льда и распространения облачности. Эти данные используются для понимания изменения климата и глобального распространения углерода.

Система E5 – это спектрометр, который обеспечивает наблюдение спектра поглощения в атмосферном лимбе от верхних слоев тропосферы до стратосферы с использованием солнечного света в качестве источника света (метод затенения солнца). Спектрометр покрывает области спектра 3–13 мкм (100–23,1 ТГц) и 0,753–0,784 мкм (398–383 ТГц). Он был разработан для мониторинга стратосферного озона в высоких широтах. Задачи этой системы состоят в мониторинге и изучении изменений в стратосфере, вызванных присутствием хлорфторуглеродов (ХФУ), и оценке эффективности контроля выбросов ХФУ во всем мире. Система E5 предназначена для наблюдений только районов, расположенных на высоких широтах (57–73° с. ш., 64–90° ю. ш.), в связи с геометрической зависимостью явлений затенения солнца и солнечно-синхронной орбиты. На основе таких наблюдений спектра Система E5 может измерять вертикальные профили элементов, связанных с явлением истощения озонового слоя, включая озон (O₃), двуокись азота (NO₂), азотную кислоту (HNO₃), аэрозоли, пары воды (H₂O), ХФУ-11, ХФУ-12, метан (CH₄), закись азота (N₂O), нитрат хлора (ClONO₂), а также температуру и давление.

Система E6 – это спектрометр с преобразованиями Фурье с большой оптической пропускной способностью и большим спектральным разрешением. Этот прибор разработан для обнаружения солнечного спектра SWIR, отражаемого от поверхности Земли, а также спектра TIR, излучаемого от земной поверхности и атмосферы. С помощью этого прибора получают интерферограмму поступающего излучения. Затем такая интерферограмма с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT) преобразуется в спектр, включающий спектры поглощения парниковых газов. Применяя алгоритм преобразования для исключения из преобразованного спектра облаков и аэрозольного загрязнения, можно рассчитать плотность газового столба.

Система E7 – это комбинированная оптическая/микроволновая метеорологическая система воспроизведения изображения/звука, предназначенная для дистанционного зондирования поверхности океанов и земной поверхности, а также для измерения глобальной атмосферной температуры и профилей паров воды.

Микроволновый радиометр, относящийся к Системе E7, основан на технологии комбинирования в пространстве и времени измерений многих частот и поляризации. Он работает на частотах, расположенных как в окнах прозрачности атмосферы 6,9, 10,6, 18,7, 23,8, 31, 36,5 и 91 ГГц, так и в линиях поглощения кислорода 52–57 ГГц и паров воды 183,31 ГГц. Кроме того, этот прибор включает некоторые дополнительные нетипичные рабочие частоты для океанографических исследований в полосах 42 и 48 ГГц. Этот прибор обеспечит измерения профиля атмосферной температуры на расстоянии до приблизительно 42 км и профиля паров воды на расстоянии до 6 км.

Путем комбинирования оптических и микроволновых наблюдений в одном и том же приборе получают некоторые взаимовыгодные преимущества для определения геофизических параметров. Одновременно будут наблюдаться профили температуры атмосферы и профили влажности атмосферы, температуры поверхности моря и скорость ветра около земной поверхности, цвет океана и биологические процессы в верхнем слое океана, что даст возможность визуализировать океанические течения и лучше наблюдать зоны подъема глубинных вод. Кроме того, можно также исследовать взаимодействие океана с атмосферой. Возможности Системы E7 позволяют устранить неточности, которые нередко имеются в тех случаях, когда результаты наблюдений во многих спектрах и на многих частотах получают с помощью различных приборов, осуществляющих наблюдения в различных частях атмосферы, на различных углах и в разное время.

В таблице 5 приводятся обобщенные технические параметры этих спектрометрических инструментов.

ТАБЛИЦА 5

Технические параметры радиометрических и спектрометрических систем

Система	Е1	Е2	Е3
Измерения	Инфракрасный зонд с высоким спектральным разрешением	Спектрорадиометр с воспроизведением изображений	Затенение солнца и луны
Данные	Профили вертикальной температуры и паров воды, характеристики и распределение облаков	Температура земной поверхности, растительный/наземный покров, зоны облачности, пожары	Вертикальные профили ОСЮ, NO ₂ , NO ₃ , O ₃ и H ₂ O в мезо-, страто- и тропосфере
Область спектра (мкм)	0,4–15,4 (2378 каналов) 6,3, 9,6, 11 для конкретных профилей	0,4–3,0 (21 канал) 3,0–14,5 (15 каналов)	0,29–1,55 (9 каналов)
Область видимости (градусы)	±49,5° (боковая)	±55°	±185° азимут 13–31° место
Моментальная область видимости	13,5 км в надире	250 м (2 канала), 500 м (5 каналов), 1000 м (29 каналов)	< 0,5 км при высоте касательной 20 км
Скорость сканирования	22,5 об/мин. (1 виток/2,667 с) 2,0 с/сканирование Земли; 0,667 с/калибровка	20,3 об./мин.	Точки в лимбе
Скорость передачи данных (Мбит/с)	1,44	6,2 (средняя), 10,5 (дневная), 3,2 (ночная)	0,115 для 8 мин.; 3 раза в день
Точность	Плотность излучения: 3%	Абсолютная плотность излучения: 5% < 3 мкм; 1% > 3 мкм	5–15% в зависимости от измеренных химических соединений

ТАБЛИЦА 5 (продолжение)

Технические параметры радиометрических и спектрометрических систем

Система	Е4	Е5	Е6
Измерения	Спектрорадиометр с воспроизведением изображений	Затенение солнца	Спектрометр с преобразованиями Фурье
Данные	Хлорофилл, растворенные органические соединения, температура земной поверхности, распределение растительности, снега, льда	Вертикальный профиль O ₃ , HNO ₃ , NO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, ClONO ₂ , температуры и давления	Измерение концентрации парниковых газов O ₂ , CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O
Область спектра (мкм)	0,375–0,88 (23 канала) 1,040–2,32 (6 каналов) 3,55–12,5 (7 каналов)	3,0–5,7 (канал 1) 6,21–11,76 (канал 2) 12,78–12,85 (канал 3) 0,753–0,784 (канал 4)	0,75–0,78 (Полоса 1) 1,56–1,72 (Полоса 2) 1,92–2,08 (Полоса 3) 5,5–14,3 (Полоса 4)
Область видимости (градусы)	±45	0,017	±35 (боковая) ±20 (по направлению трассы)
Моментальная область видимости	250 м (6 каналов) 1000 м (30 каналов)	1,0 км × 13,0 км (каналы 1, 2) 1,0 км × 21,7 км (канал 3) 1,0 км × 2,0 км (канал 4)	10 км
Скорость сканирования	16,7 об./мин.	Н.п.	0,25, 0,5, 1 (интерферограммы)/с
Скорость передачи данных (Мбит/с)	Канал в 1 км: 4 Мбит/с макс. Канал в 250 м: 60 Мбит/с макс.	54 кбит/с	8 Мбит/с
Точность	Менее 3 мкм Относительная плотность излучения 5% Абсолютная плотность излучения 10% более 3 мкм Тепловая 0,6 К	3% (O ₃), 5% (другие)	1% (CO ₂), 2%(CH ₄) (плотность столба)

ТАБЛИЦА 5 (окончание)

Технические параметры радиометрических и спектрометрических систем

Система	E7
Измерения	Оптическая/микроволновая метеорологическая система воспроизведения изображения/звука
Данные	Дистанционное зондирование профиля температуры атмосферы (до 42 км) и профиля влажности атмосферы (до 6 км), температуры поверхности моря и скорости ветра около земной поверхности, осадков, цвета океана и процессов в активном слое океана, мониторинг льда и снега
Область спектра (мкм)	0,37–0,45 0,45–0,51 0,58–0,68 0,68–0,78 3,55–3,93
Область видимости (градусы)	120° на развертку (полоса шириной 2000 км), длина 19 км
Моментальная область видимости	1,1 × 1,1
Скорость сканирования	20,8 об./мин. (1/2,88 с)
Скорость передачи данных (Мбит/с)	665,4 кбит/с, 30,7 Мбит/с
Точность	Пространственное разрешение 1,1 км, временная устойчивость 10^{-4}

2.3 Высотометрия – активная

Высотометрия действует из космоса с использованием лазерных систем обнаружения и измерения дальности (лидаров), работающих на примерно 1,064 мкм (283 ТГц) и 0,532 мкм (566 ТГц), с визуальным наблюдением в надире. Система F1 – это система в 283 ТГц, используемая для измерения топографии ледового покрова и связанных с ним временных изменений, облаков и свойств атмосферы, а также топографии по направлению трассы над земной и водной поверхностью. Для применений, предназначенных для измерения ледового покрова, лазерный высотомер может измерять высоту от космического аппарата до ледового покрова для обеспечения точности более 10 см при пятне на поверхности диаметром 66 м. Измерение высоты в сочетании со сведениями об орбитальной позиции обеспечивают определение топографии поверхности. Для определения неровности поверхности используются характеристики отраженного импульса. Сведения об изменениях в толщине ледового покрова в несколько десятков сантиметров, которые происходят каждые неполные десять лет, обеспечивают информацию о балансе массы ледового покрова и могут содействовать анализу прогнозов реагирования криосферы на будущие изменения климата. Также можно осуществлять мониторинг баланса массы ледового покрова и воздействия на изменения уровня моря. Точность определения высоты над уровнем земли можно оценить с использованием уклона и неровности земной поверхности. Отражение звука от поверхности можно преобразовать в цифровую форму по всему динамическому диапазону в 30 м над океанами и 80 м в других местах.

Система F2 обеспечивает измерение распределения высоты облаков и аэрозолей по направлению трассы на 566 ТГц с вертикальным разрешением в 75–200 м. Горизонтальное разрешение может варьироваться от 150 м для плотной облачности до 50 км для аэрозольной структуры и высоты пограничного слоя планеты. Измерение с однозначным результатом высоты облаков и вертикальной структуры тонкой облачности будет содействовать изучению воздействия облачности на баланс излучения и обратной связи с климатом. Полярные облака и дымка могут быть обнаружены и проанализированы с гораздо большей чувствительностью, вертикальным разрешением и точностью, чем можно достичь с помощью пассивных датчиков. Можно напрямую и точно измерить высоту пограничного слоя планеты для включения в модели потоков у земной поверхности и модели взаимодействия воздух-море и воздух-земля. Прямые измерения вертикальных профилей аэрозолей будет способствовать пониманию воздействия аэрозолей на климат и аэрозольный транспорт.

В таблице 6 приводятся обобщенные технические параметры систем высотометров лидаров космического базирования.

ТАБЛИЦА 6
Технические параметры систем высотометрии

Система	F1	F2
Длина волны (мкм)	0,532	1,064
Передаваемая энергия (МДж)	36	74
Частота повторения импульсов (Гц)	40	
Расходимость луча (мкрад)	110	
Апертура передатчика лидара (см)	15	
Зона обзора в надире (м)	66	
Апертура приемного телескопа (м)	1	
Область видимости приемника (мкрад)	150	475
Квантовая эффективность детектора	0,6	0,3
Скорость передачи данных (кбит/с)	~450	
Точность наведения (арксек)	1,5	
Точность измерения расстояний (м)	75	0,15

В настоящее время планируется много полетов, связанных с наукой о Земле, в ходе которых будут использоваться орбитальные лазеры. Большинство таких полетов планируется проводить с использованием лазеров, имеющих длины волн, отличные от 0,532 мкм и 1,064 мкм. Примером является полет с программой по активному измерению CO₂, в котором используются лазерные каналы, работающие на 1,570 мкм, 0,770 мкм и, возможно, 0,532 мкм. Направленность других программ полетов – это, например, озон на длине волны менее 0,400 мкм и пары воды, вероятные в полосе 0,930 мкм.

3 Космический аппарат

Хотя не существует официальной процедуры регистрации систем ССИЗ, использующих спектр выше 3000 ГГц, такие приборы могут присутствовать более чем на половине всех космических аппаратов ССИЗ. Ежегодно к запуску на обозримое будущее планируются от одной до трех новых систем ССИЗ, использующих спектр выше 3000 ГГц, при этом в космических кораблях многоразового пользования и на международной космической станции временно размещаются дополнительные приборы. Большинство систем ССИЗ используют негеостационарные орбиты, а значительная часть таких систем находятся на солнечно-синхронных орбитах.

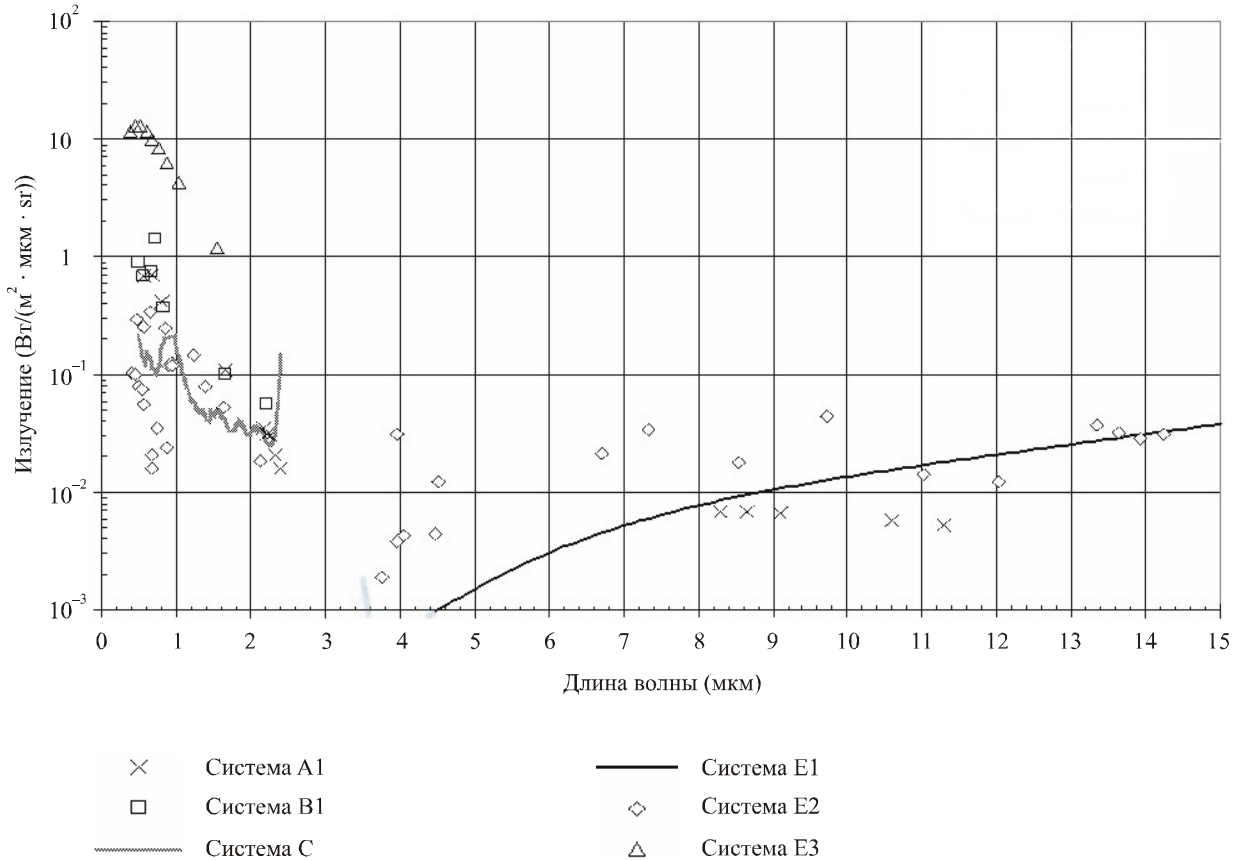
4 Чувствительность системы и природные излучения

Системы ССИЗ обеспечивают сбор информации, касающейся характеристик Земли и ее природных явлений, в том числе данных по состоянию окружающей среды. Каждая система ССИЗ обладает уникальными техническими характеристиками и требованиями к программе полета, которые непосредственно влияют на чувствительность приборов. Требования к чувствительности будут также различаться в зависимости от солнечного освещения, измеряемого объекта и даже срока действия прибора.

4.1 Чувствительность детекторов

Чувствительность детектора ССИЗ, работающего на частотах выше 3000 ГГц, изменяется в зависимости от типа детектора. Примеры минимальной чувствительности для шести систем ССИЗ, работающих на частотах выше 3000 ГГц, приводятся на рис. 1.

РИСУНОК 1
Минимальное определяемое излучение нескольких систем ССИЗ,
работающих на частотах выше 3000 ГГц



Примечание. – Точки размещены на спектральных линиях, которые используются для наблюдений. Поскольку Система С осуществляет наблюдения за более 200 полосами, а Система Е1 – более 2300 полосами, чувствительность детекторов представлена одной линией.

1804-01

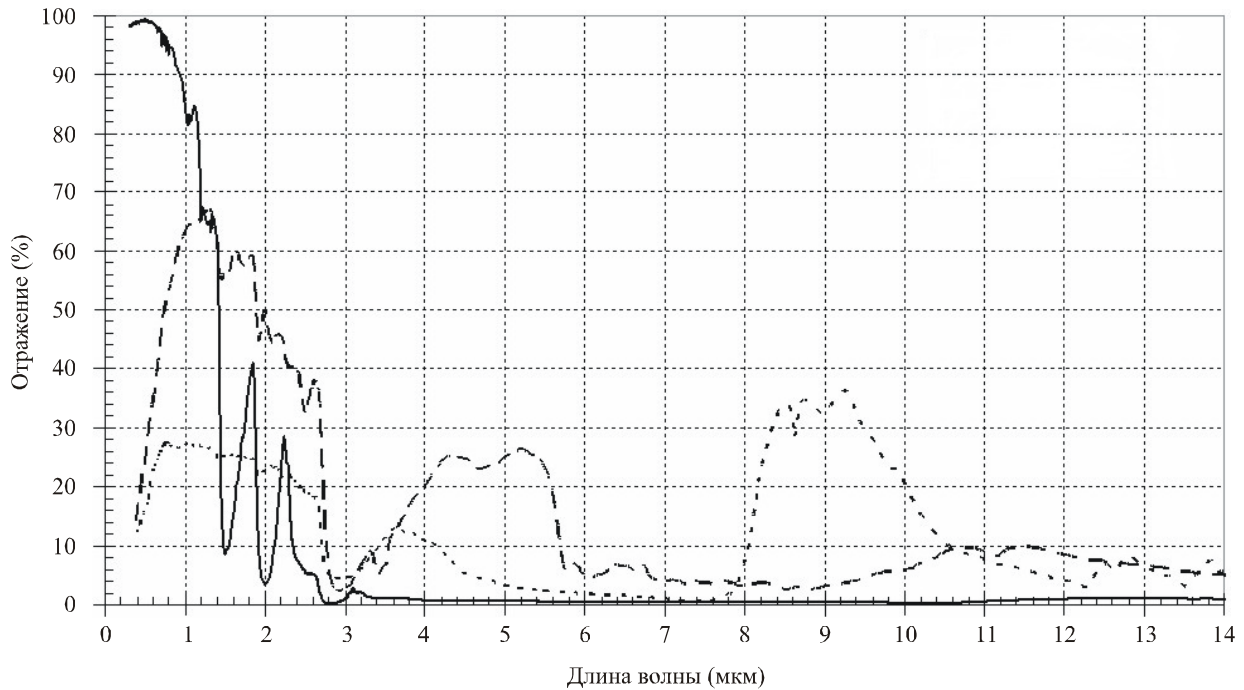
4.2 Эффективная температура Земли

Эффективная температура Земли колеблется в зависимости от излучающей способности объекта, находящегося в зоне обзора датчика, а также от отражающей способности объекта на длине волн, которые его освещают. Датчики ССИЗ, работающие на частотах выше ~420 ТГц (< 0,7 мкм), как правило, проводят измерения на основе отражательной способности. Датчики ССИЗ, работающие на частотах ~420 ТГц, в частности ниже 100 ТГц, как правило, проводят измерения на основе излучающей способности.

Системы ССИЗ, работающие на частотах выше 3000 ГГц, способны различать материалы, наблюдаемые на земной поверхности, с использованием графиков отражения, наблюдаемого в диапазонах спектра в несколько тысяч ТГц (несколько мкм). Пример таких графиков отражения приводится на рис. 2.

РИСУНОК 2

Графики отражения различных материалов



1804-02

В датчиках ССИЗ, работающих на частотах выше 3000 ГГц и измеряющих излучающую способность, объект, излучающий радиацию, принимается, как правило, за черное тело, хотя и со средней излучающей способностью менее 1,0. Теоретическая концепция черного тела исходит из того, что поверхность поглощает все падающее на нее излучение и имеет максимально возможное радиоактивное излучение для данной температуры. Излучающая способность объекта регулируется тремя функциями: законом смещения Вина, законом Стефана-Больцмана и функцией Планка.

Закон смещения Вина гласит, что длина волны максимальной излучательной способности спектра, λ_M , обратно пропорциональна температуре объекта.

$$\lambda_M = \frac{A}{T} \quad \text{мкм}, \quad (1)$$

где:

A : постоянная Вина (2897 К · мкм)

T : температура (К).

Закон Стефана-Больцмана гласит, что общая мощность, излучаемая на единицу площади поверхности черного тела, S , пропорциональна биквадрату его температуры.

$$S = \sigma_B T^4 \quad \text{Вт/м}^2, \quad (2a)$$

где:

σ_B : постоянная Стефана-Больцмана ($5,671 \times 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴)).

Однако поскольку природные материалы не являются совершенными черными излучателями, эффективная яркостная температура пропорциональна средней излучающей способности вещества, ϵ ; таким образом излучаемая мощность равна:

$$S = \sigma_B \epsilon T^4 \quad \text{Вт/м}^2, \quad (2b)$$

где:

ϵ : средняя излучающая способность ($0 \leq \epsilon \leq 1$).

Функция Планка используется для расчета радиации, излучаемой от объектов, таких как совершенное черное тело.

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{k_B T \lambda}} - 1 \right)} \quad \text{Вт(м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{sr)}, \quad (3)$$

где:

h : постоянная Планка ($6,63 \times 10^{-34}$ Дж \cdot с)

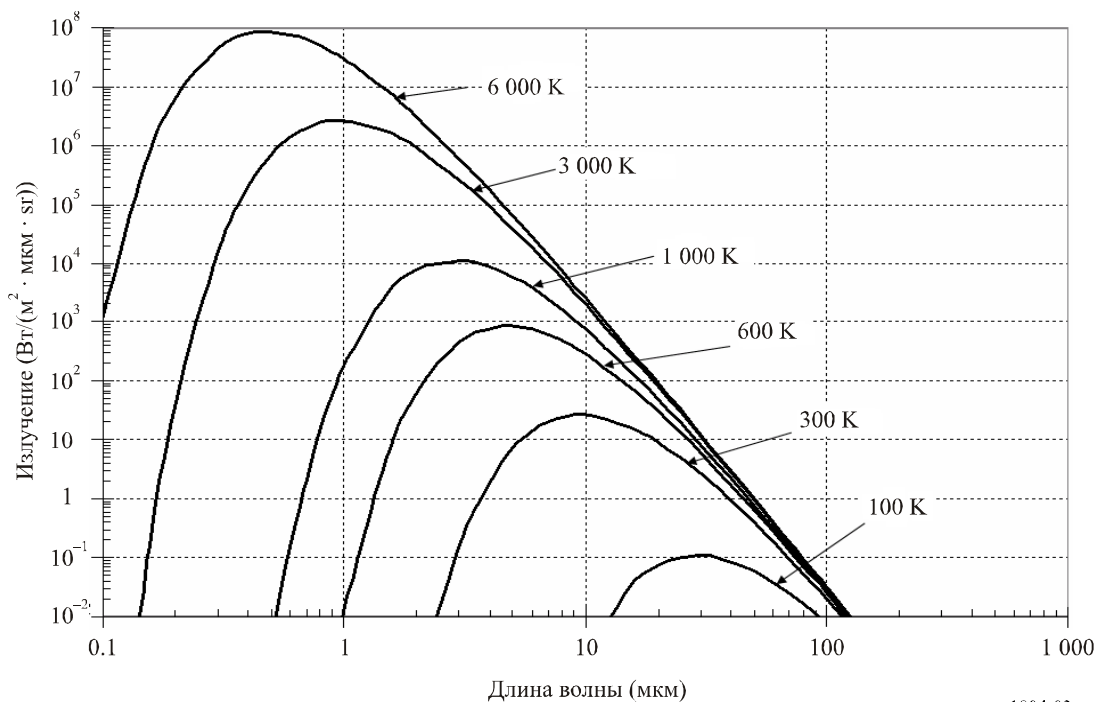
c : скорость света (3×10^8 м/с)

k_B : постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К).

Эти принципы приводят к установлению отношений, приведенных на рис. 3, где показывается теоретическое излучение, Вт/(м² \cdot мкм \cdot sr), для нескольких яркостных температур (К).

РИСУНОК 3

Излучение совершенного черного тела на нескольких температурах



5 Резюме

Спектр выше 3000 ГГц многие годы использовался в разнообразных применениях активных и пассивных ССИЗ. Такие виды использования предполагается в будущем продолжать, если не расширять. В будущих исследованиях следует принимать во внимание технические и эксплуатационные характеристики этих систем, представленные в пунктах 2–4. В Дополнении 1 в настоящему Приложению даются дополнительные сноски, URL официальных веб-страниц некоторых экспедиций, использованных в качестве основ для систем, которые определены в пункте 2.

Дополнение 1 к Приложению 1

Официальные веб-сайты для различных датчиков ССИЗ, работающих на частотах выше 3000 ГГц

Усовершенствованный радиометр с траекторным сканированием (AATSR):

<http://envisat.esa.int>

Атмосферный инфракрасный зонд (AIRS):

<http://airs.jpl.nasa.gov/>

Усовершенствованный космический термоэмиссионный и отражающий радиометр (ASTER):

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

Усовершенствованный радиометр с очень высоким разрешением (AVHRR):

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Усовершенствованный радиометр видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра типа 2 (AVNIR-2):

<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/avnir2.htm>

Усовершенствованный тематический картограф + (ETM+):

<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/etm+.html>

Система геоаучных лазерных высотомеров (GLAS):

<http://glas.gsfc.nasa.gov/>

Геостационарный радиационный баланс Земли (GERB):

<http://www.esa.int/specials/msg>

Формирователь глобальных изображений (GLI):

<http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI/ov/sensor.html>

Эксперимент по глобальному мониторингу озона (GOME-2):

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Датчик наблюдений за парниковыми газами (GOS):

http://www.jaxa.jp/missions/projects/sat/eos/gosat/index_e.html

Инфракрасный зонд с высоким разрешением (HIRS):

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Аппарат разведки и навигации гиперсреды Hyperion:

<http://eol.usgs.gov/hyperion.php>

Атмосферный спектрометр с улучшенным лимбом-II (ILAS-II):

<http://www-ilas2.nies.go.jp/en/project/ilas2outline.html>

Инфракрасный интерферометр зондирования атмосферы (IASI):

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Датчик формирователя изображений грозовых разрядов (LIS):

http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/lis.html

Спектрометр с формированием изображения со средним разрешением (MERIS):

<http://envisat.esa.int>

Интерферометр Майкельсона для пассивного зондирования атмосферы (MIPAS):

<http://envisat.esa.int>

Сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения (MODIS):

<http://modis.gsfc.nasa.gov/>

Микроволновый радиометр (Микроволновый сканирующий радиометр температурного и влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА)):

<http://kargonet.narod.ru/rab2/mtvza.htm> (Russian only)

Панхроматическое средство дистанционного зондирования для съемки стереоскопических изображений (PRISM):

<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/prism.htm>

Сканирующий абсорбционный спектрометр с формированием изображения для составления атмосферных карт (SCIAMACHI):

<http://envisat.esa.int>

Прибор для наблюдения за космическим пространством (SEM):

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Вращающийся усовершенствованный формирователь видимого и инфракрасного изображения (SEVIRI):

<http://www.esa.int/specials/msg>

Эксперимент по исследованию аэрозольного и газового состава стратосферы (SAGE III):

<http://www-sage3.larc.nasa.gov/instrument/>

Эксперимент по исследованию аэрозольного и газового состава стратосферы (SAGE III):

<http://www-sage3.larc.nasa.gov/instrument/>
