Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 64–75

Микроволновый радиометр-спектрометр с предельными характеристиками для изучения Земли из космоса в диапазоне 6…220 ГГц

Ю.Б. Хапин [1], А.В. Кузьмин [1], А.Г. Семин [2], Е.А. Шарков [1]

[1] Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
E-mails: kuzmin@iki.rssi.ru, yuhapin@gmail.com, easharkov@iki.rssi.ru
[2] Пензенский государственный педагогический университет, Пенза, Россия
E-mail: semin_ag@mail.ru

Приведен анализ состояния и обозначены тенденций развития космической радиометрии. Рассмотрены характеристики основных типов радиометров с коническим сканированием, работавших последние годы на околоземной орбите на российских и зарубежных спутниках. На основе проведенного анализа предложен проект микроволнового радиометра-спектрометра (МРС) с предельными измерительными характеристиками в спектре частот 6,8 (В, Г); 10,6 (В, Г, ± 45°); 18,7 (В, Г, ± 45°); 22,2 (Г); 36 (В, Г, ± 45°); 85 (В, Г); 118 (6 каналов); 150 (В, Г); 183 (6 каналов) ГГц.

Ключевые слова: радиометр, радиометр-спектрометр, микроволновая радиометрия, радиояркостная температура, восстановление профиля водяного пара в атмосфере.

Введение

Основным средством осуществления глобального мониторинга сегодня являются специализированные спутники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Среди установленной на этих спутниках аппаратуры важную роль в исследовании океана и атмосферы играют микроволновые радиометры. Использование последних связано с тем, что радиояркостная температура подстилающей поверхности служит высокоинформативным параметром, поскольку зависит от ее физической температуры и излучательной способности, определяемой диэлектрическими свойствами и геометрией поверхности (например, волнением на поверхности моря). В то же время в микроволновом диапазоне характеристики пропускания атмосферы меняются весьма значительно, в зависимости от частоты, от малой степени затухания в так называемых «окнах прозрачности» до практически полного поглощения в линиях таких атмосферных составляющих, как кислород и водяной пар. Можно с уверенностью утверждать, что микроволновая радиометрия используется как для зондирования подстилающей поверхности независимо от наличия облачности и внешнего подсвета (что выгодно отличает ее от аппаратуры видимого и инфракрасного диапазона), так и для получения важнейшей информации об атмосфере.

В работе поставлена задача оценить возможность реализации микроволнового радиометра с коническим сканированием с высокой инструментальной точностью (точность, которую дает собственно прибор) определения радиояркостей на основе зарубежных и отечественных проектов и учитывая опыт разработки спутникового радиометра интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА). На основе проведенного анализа предложен вариант микроволнового радиометра-спектрометра (МРС) с предельной инструментальной точностью измерения радиояркостной температуры на частотах

и поляризациях 6,8 (В, Г), 10,6 (В, Г, ±45°), 18,7 (В, Г, ±45°), 22,2 (Г), 36 (В, Г, ±45°), 85 (В, Г), 118 (6 каналов); 150 (В, Г), 183 (6 каналов) ГГц. Кроме того, включенные в радиометр три канала с 4 поляризациями для определения вектора приповерхностного ветра и 6 спектральными полосами на 183 ГГц, для определения детального профиля водяного пара, ставят его в ряд наиболее интересных приборов. Главные исследования по конструкции прибора и вопросам обеспечения малой погрешности измерения радиояркостей связаны со следующими направлениями:

- высокая потоковая эффективность антенны, малое фоновое излучение Земли и платформы;
- проверка стабильности шумов и усиления малошумящих входных устройств;
- улучшение характеристик быстродействия, полосы пропускания и поляризационной развязки фарадеевских вращателей плоскости поляризации (ФВПП) с 4 переключениями (В, Г, ± 45°);
- минимизация энергопотребления и веса радиометра.

Современные радиометры

В *табл. 1* приведены характеристики современных радиометров с коническим сканированием, работавших на околоземной орбите за последние годы на российских и зарубежных спутниках.

Таблица 1. Характеристики современных радиометров с коническим сканированием

	SSM/I	***МТВЗА***	***SSMIS***	***AMSR-E***	***WindSat***	***AMSR-2***
Частота, ГГц	19,3 (В, Г); 22,2; 37 (В, Г); 85,5 (В, Г)	18,7 (В, Г); 22,2; 33 (В, Г); 36,5 (В, Г); 52…58; 91 (В, Г); 183,31	19,3 (В, Г); 22,2; 37 (В, Г); 50…63; 91 (В, Г); 150; 183,31	6,92 (В, Г); 10,6 (В, Г); 18,7 (В, Г); 23,8; 36,5 (В, Г); 2 × 89,0	6,8 (В, Г); 10,7 (В, Г, ±45°); 18,7 (В, Г, ±45°); 23,8; 37 (В, Г, ±45°)	6,92 (В, Г); 10,6 (В, Г); 18,7 (В, Г); 23,8; 36,5 (В, Г); 50,3; 53,2; 2 × 89,0
Количество каналов	7	21	16	14	22	16
Диаметр зеркала антенны, м	0,6	0,5	0,6	1,6	1,83	2,0
Количество облучателей	1	1	6	6	11	8
Потоковая эффективность	0,91…0,96		0,91…0,96	0,953…0,96	0,95	0,953…0,96
Калибровка, К	2,7…330	–	2,7…330	2,7…330	2,7…330	2,7…330
Погрешность $T_я$, К	±3	–	–	1 (1σ)	±3	1 (1σ)
Чувствительность, К	0,45…0,9	0,25…0,5	0,2…1,9	0,3…1,1	0,37…0,55	0,3…1,1
Угол визирования, град	45	51	45	47,4	45	47,4
Угол падения, град	53,1	65	53,1	55	53,5	55
Спутник, год запуска	DMSP с 1987	«Метеор-3М» с 2001	DMSP с 2003	Aqua с 2003	Coriolis с 2003	ADEOS с 2012

(В, Г) – вертикальная и горизонтальная поляризации;

(В, Г, ±45°) – вертикальная, горизонтальная и повернутые на ± 45° поляризации.

Инструментальная точность или точность определения абсолютных величин радиояркостной температуры зависит от комплекса устройств, участвующих в приеме сигнала: от антенны и приемников до способа калибровки. Основное влияние на точность оказывают стабильность приемников – коэффициент усиления и шумы, величина потоковой эффективности антенны и уровень бокового излучения, величина кроссполяризации. Каждый из этих параметров можно подробно анализировать, но самым существенным оказывается интегральный параметр потоковой эффективности антенны, который определяет долю энергии попадающей по главному лепестку антенны ко всему телесному углу 4π. Так изменение фона бокового и заднего излучения на 30 К (что является мягкой оценкой при орбитальном движении КА) приводит к ошибкам ~ 3 К при потоковой эффективности антенны 0,9. Анализ показывает, что высокоточное инструментальное вычисление радиояркости требует наличия величины потоковой эффективности 0,95 и более. Как видно из *табл. 1,* из всех видов радиометров лишь AMSR-E, AMSR-2 и WindSat соответствует этому параметру.

Несколько замечаний по отечественным проектам

В нашей стране в конце 1997 г. начал разрабатываться сканирующий радиометр для получения информации об интегральных параметрах атмосферы МИВЗА, необходимой Гидрометцентру. Был согласован масштаб съемки и были выбраны частоты зондирования 20, 35 и 94 ГГц, диаметр антенны – 360 мм. (Алексеев и др., 2003). Радиометр МИВЗА запущен в тестовом варианте на КА «Метеор-3» № 6 в 1991 г. Поскольку платформа, на которую устанавливаются приборы, была обращена на Землю, единственно возможный вариант – двухзеркальная антенна, хоть в ней практически невозможно реализовать высокие характеристики. В качестве антенны в радиометре МИВЗА применялась двухзеркальная антенна Грегори. Это многолучевая параболическая система, в которой каждый частотный канал имел отдельный корругированный рупор.

Расчет параметров антенны проводился в несколько этапов. Сначала рассчитывались рупоры, потом они изготавливалась и снималась диаграмма направленности рупоров. Далее выбирался профиль зеркала, определялось положение рупоров, и рассчитывались радиотехнические характеристики антенны. После изготовления антенны экспериментально измерялась диаграмма направленности антенны. Она с точностью 0,1; 0,2 и 1 дБ совпала с расчетным значением коэффициента усиления. Потоковая эффективность составила 0,92; 0,93 и 0,95, соответственно, на частотах 22; 35 и 90 ГГц. Причем расчетное положение надирных углов с точностью 0,1 град. совпали с измеренными.

Примерно такие же характеристики получились и в радиометре SSM/I с однозеркальной антенной с одним рупором (*табл. 1*).

Ввиду отсутствия промышленного вращающегося контактного устройства (ВКУ), которое используется в современных схемах построения сканирующих радиометров, был разработан привод с построчным качанием на магнитных подшипниках с периодом сканирования 8–10 сек. Малый период сканирования позволил создать «внешнюю» калибровку

на концах строки с помощью калибровочного зеркала, смотрящего на космос с яркостной температурой 2,7 К и на широкоапертурный излучатель – 330 К.

В 1991 г. радиометр МИВЗА в составе КА «Метеор-3» – 6 был выведен на орбиту. После включения вышел из строя блок питания, поэтому не работал привод радиометра МИВЗА. Результаты работы трассового радиометра опубликованы в статье (Волков и др., 2003).

В 1996 г. по заказу Шанхайского института космического приборостроения разрабатывался проект десятиканального радиометра CMIU с однозеркальной антенной диаметром 970 мм с частотами 10,6 (В, Г), 18,7 (В, Г), 22,2, 36 (В, Г), 90 (В, Г) ГГц, с потоковой эффективностью не менее 0,94, с чувствительность на элемент разрешения 0,15–0,45 К и точностью определения абсолютной яркостной температуры порядка 1–2 К. В архитектуре радиометра CMIU предполагалось использовать ВКУ с подшипником, имеющим большой внутренний диаметр. Через него устанавливается ось с основанием, закрепленным на неподвижную платформу. На оси размещаются калибровочное зеркало, смотрящее на космос и бортовой широкоапертурный излучатель (БШИ). Таким образом, организуется «внутренняя» калибровка, минимизирующая фоновое влияние Земли и платформы на антенную температуру космоса.

ВНИИЭМ (Роскосмос) по согласованному с нами ТЗ приступил к разработке конструкторской документации на ВКУ. Был разработан габаритный чертеж ВКУ.

Далее был выполнен расчет радиотехнических характеристик многолучевой однозеркальной антенны по схеме, описанной для МИВЗА. Потоковая эффективность этой антенны лежала в пределах 0,95–0,965.

Для этого проекта был выполнен расчет калибровочных характеристик. По оценке точность определения абсолютных радиояркостей составила величину близкую к 1,5–2 К. Экспериментально были проверены малошумящие приемные устройства и исследовалась стабильность усиления и шумов. По оценке чувствительность на элемент на разрешения составила величину 0,1–0,4 К. Так же была предложена конструкция привода и испытаны отдельные узлы.

Примерно в то же время разрабатывался двухзеркальный семичастотный радиометр МТВЗА с одним рупором (Чернявский, Черный, 2009). Основные характеристики приведены в *табл. 1*. Поэтому поводу можно сказать, что подобное построение системы рупоров не позволяет обеспечить эффективное облучение и высокую поляризационную развязку на всех частотах. В SSM/I при меньшем числе каналов тем не менее не удалось реализовать высоких характеристик.

Радиометр МТВЗА был выведен на орбиту на КА «Метеор-3М» № 1 в 2001 г. На этот же КА был установлен доработанный МИВЗА. Через несколько месяцев МТВЗА вышел из строя. МИВЗА проработал еще два месяца. Результаты обработки данных МИВЗА приведены в статье (Бухаров и др., 2003).

Руководство Роскосмоса приняло решение финансировать только один радиометр МТВЗА. Предполагалось, что МТВЗА будет разрабатываться совместно. Однако в результате отдано предпочтение радиометру МТВЗА в настоящем виде. Отсутствие конкуренции

в разработке космического радиометра привело к плачевному состоянию российской радиометрии.

В дальнейшем в МТВЗА антенна была преобразована в однозеркальный вариант, была изменена калибровка, были добавлены каналы. И, наконец, появился ряд рупоров, на отдельные частоты. Из всего сказанного можно предположить, что многочисленные доработки без единой концепции едва ли могут изменить измерительные качества прибора.

В заключение скажем несколько слов об угле падения 65 град., который используется в МТВЗА. Для восстановления векторного поля ветра над поверхностью океана, если задаться такой задачей, необходимо проведение измерений теплового радиоизлучения не только на вертикальной и горизонтальной поляризациях, но и определение трех первых параметров Стокса излучения (Поспелов, 2005). Такой подход к определению вектора приповерхностного ветра был впервые предложен сотрудниками ИКИ РАН (Дзюра и др., 1993). Оптимальным для дистанционного измерения скорости и направления ветра является диапазон миллиметровых и коротких сантиметровых волн (10–36 ГГц). При измерениях на более длинных волнах существенно уменьшается крутизна зависимости поляризационной анизотропии от скорости ветра, в то время как на более коротких волнах резко возрастает поглощение излучения в атмосфере, что, соответственно, приводит к уменьшению точности восстановления характеристик ветра.

Оптимальным углом падения можно считать угол в пределах 42–45 град. В этом интервале зависимость радиояркостного контраста на вертикальной поляризации от скорости ветра существенна, в отличие от углов зондирования вблизи 54 град., (используемых в настоящее время в большинстве спутниковых радиометров конического зондирования), где эта зависимость невелика и меняет свой знак при изменении угла, что снижает потенциал спутникового радиометра применительно к оценке вектора ветра. Уменьшение угла падения ниже 42 град., ведет к сокращению полосы обзора. Увеличение угла до 65 град., как выбрано в комплексе МТВЗА, сопровождается расширением спектра поверхностных гармоник, которые вносят вклад в радиояркостную температуру, что требует учета степени развитости волнения и неизбежно приводит к потере точности определения скорости ветра (Ирисов и др., 1987; Трохимовский, 1997).

Перспективный микроволновый радиометр-спектрометр МРС

Изначально проект перспективного микроволнового радиометра с диаметром антенны 1 м предназначался для малого российского океанологическо-метеорологического спутника РОСС, для которого была выбрана высота орбиты 550 км и угол визирования 45 град. В 2001 г. был разработан и передан в НПО им. М.В. Хруничева габаритный чертеж (ГЧ) прибора для привязки на платформе спутника. Однако спустя несколько месяцев был получен отказ по вышеуказанной причине. Между тем коллектив авторов не остановился и продолжал работу над перспективным радиометром.

МРС представляет собой радиометр с коническим сканированием с зеркальной антенной диаметром 1 м, выполненный в виде единого модуля для применения на негерметичных космических платформах. Для удобства сравнения с приборами, приведенными в *табл.1* выбраны: надирный угол 45 град. и угол падения 53,1 град.

За основу построения радиометра была взята схема (Волков, Хапин, 2004; Кузьмин и др., 2005). Она была дополнена каналом 150 ГГц и каналами для восстановления профилей температуры и влажности – 118 и 183 ГГц. Общий вид радиометра приведен на *рис. 1*. Многоканальный радиометр состоит из блоков, смонтированных на вращающейся и неподвижной частях.

На вращающейся части монтируется однозеркальная антенна со смещенной параболой и термостатированный высокочастотный блок (БСВЧ), в состав которого входят:

– многолучевой облучатель;
– малошумящие приемные устройства (МШУ);
– вращающееся контактное устройство (ВКУ);
– блок калибровки (БКЛ);
– устройство сбора данных (УСД).

На неподвижной части монтируются:

– блок привода (БП);
– блок управления (БУ);
– накопитель.

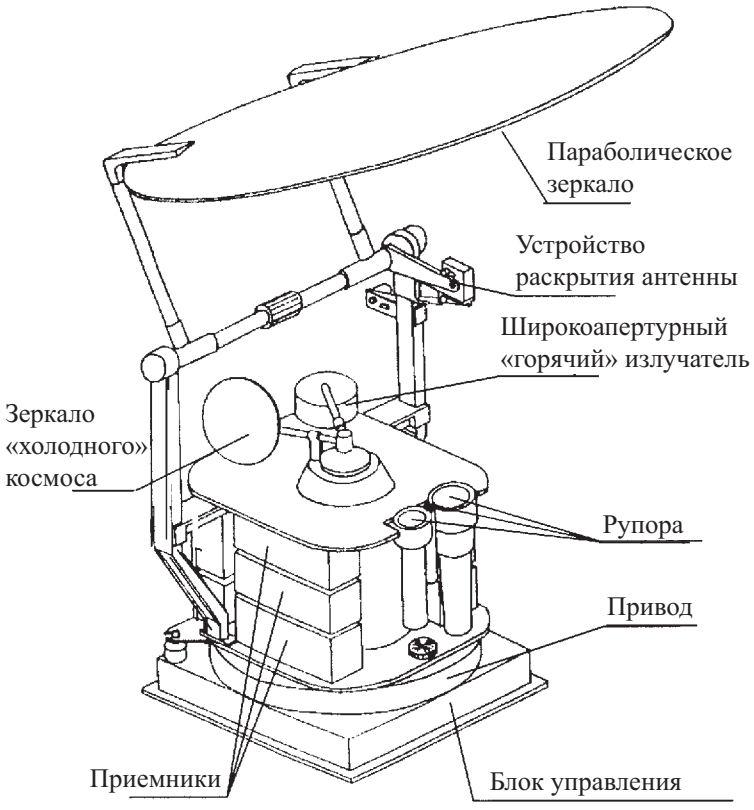

Рисунок. Общий вид радиометра МРС

Некоторые сведения об устройствах

Антенный блок включает в себя однозеркальную антенную систему со смещенным зеркалом и девятью рупорами. Предполагается, что полотно антенны будет изготовлено на основе углеродопласта для уменьшения весовых характеристик.

Были проведены расчеты высокоэффективных антенн для проведения радиометрических измерений. В качестве облучателей были выбраны двухмодовые рупоры Поттера. Рупоры имеют малые габариты, что вполне удовлетворяет требованиям на радиометр. Это первое необходимое условие по достижению высокой потоковой эффективности антенны.

Далее были проведены расчеты рупоров и их изготовление. После чего были измерены диаграммы направленности облучателей. Для проведения расчетов антенны в целом задавались форма поверхности зеркала и его границы, а также положение и измеренные характеристики облучателей.

Следует отметить, что высокая потоковая эффективность обусловлена выбором облучателей с высокой направленностью. Уровень облучения кромки зеркала составляет около –20 дБ относительно центральной части. При этом «перелив» энергии облучателя за край зеркала пренебрежимо мал, что важно для радиометрической антенны. Однако сильное спадание первичного поля к краю зеркала приводит к недоиспользованию периферийной поверхности апертуры, а, значит, к некоторому снижению коэффициента усиления антенны и расширению луча по сравнению со случаем 10–12 дБ спадания поля к краю апертуры, что обычно принято для связных антенн. Тем не менее, такой вариант при некотором проигрыше в разрешающей способности (~ 10%) позволяет избежать неприятностей, связанных с боковым излучением и «переливом» антенны, а, значит, добиться большей точности в измерении яркостной температуры. Это второе условие.

В *табл. 2* приведены результаты исследования потоковой эффективности антенны МРС для разных частотных каналов. Подробно это описано в (Хапин и др., 2013).

Блок калибровки (БКЛ) состоит из «горячего» излучателя (БШИ) с яркостной температурой 350 К и зеркала «холодного» космоса с температурой 2,7 К. ВКУ с большим внутренним диаметром позволяет установить ось, зафиксированную на неподвижной платформе, и закрепить на ней зеркало и излучатель. Детали выполнения процедуры абсолютной калибровки подробно изложены в (Хапин и др., 2013).

Малошумящие приемные устройства (МШУ). Радиометрический прием выполняется по компенсационной схеме с периодической калибровкой (Есепкина и др., 1973).

В каналах 6,8–85 ГГц применяются приемники прямого усиления, на входе которых установлены фарадеевские вращатели плоскости поляризации (ФВПП) на два положения (В, Г) на частоты 6,8 и 85 ГГц и на четыре положения (В, Г, ± 45°) на каналах 10,6; 18,7 и 36 ГГц.

Малошумящие приемники на частоты 118,75 (6 каналов), 150 и 183,3 ГГц (6 каналов) выполнены на основе смесителей с субгармонической накачкой. Как показали расчеты, для восстановления детальных профилей (8 уровней) водяного пара до высот 10…12 км целесообразно проводить измерения вблизи линии резонанса водяного пара на 6 частотах 183 ± 0,2; ± 1,1; ± 2,7; ± 4; ± 6,6; ± 11 ГГц, привлекая и измерения на частотах 85 и 150 ГГц (Семин и др., 2012).

Таблица 2. Технические характеристики радиометра–спектрометра МРС

Основные характеристики рассчитывались для антенны диаметром 1 м и высоты орбиты 830 км

Параметр	***МРС***								
Частота, ГГц	6,8	10,6	18,7	22,2	36,0	85,0	118,75	150,0	183,3
Количество каналов	2	4	4	1	4	2	6*	2	6**
Поляризация	Г, В	Г, В, ± 45°	Г, В, ± 45°	Г	Г, В, ± 45°	Г, В	Г	Г, В	Г
Динамический диапазон, К	2,7…350								
Потоковая эффективность антенны	0,972	0,974	0,976	0,976	0,979	0,984	0,986	0,987	0,99
Чувствительность на элемент разрешения, К	0,1	0,25	0,3	0,2	0,3	0,35	0,7	0,4	0,55
Точность измерения, $T_я$, К	Не хуже 1,0								
Элемент разрешения, км	75 × 130	48 × 80	27 × 48	23 × 39	14 × 25	6 × 10	6 × 10	6 × 10	6 × 10
Надирный угол, град.	45 ± 0,1								
Угол падения, град.	53,1								
Полоса обзора, км	1552								
Период сканирования, с	1,518								
Информативный поток, КБ/с	320								
Вес, кг	70								
Потребляемая мощность, Вт	120								

* На частоте 118,75 ГГц супергетеродинный двухполосный приемник с 6 спектральными каналами, ширина полос УПЧ 150 МГц.

** На частоте 183,3 ГГц супергетеродинный двухполосный приемник с 6 спектральными каналами, ширина полос УПЧ 500 МГц.

Были проведены исследования стабильности коэффициентов усиления приемных устройств, которые показали, что УПЧ в диапазоне 0,2–2 ГГц может использоваться в режиме компенсационного приема с периодической калибровкой через каждые 15 минут. Для приемников прямого усиления на частотах 6,8 и 36 ГГц измерения показали, что они также могут использоваться в режиме периодической калибровки со временем калибровки для первого – 45 с, для второго – 25 с.

Фарадеевские вращатели плоскости поляризации (ФВПП). Были проведены исследования ФВПП в составе радиометра с центральной частотой 36 ГГц. ФВПП имел полосу ± 1 ГГц, поляризационная развязка для ортогональных поляризаций составила 23–24 Дб во всей полосе и время переключения с одной поляризации на другую не более 80 мкс. Эти параметры вполне подходят для выполнения переключения четырех поляризаций и дают возможность упростить конструкцию приемников и уменьшить вес радиометра в целом.

Вращающееся контактное устройство (ВКУ) имеет 9 колец: для передачи 12 В напряжения на БСВЧ и передачи с него потока данных. ВКУ выполнено на подшипниках большого диаметра с внутренним диаметром 26 мм.

Блок привода (БП) обеспечивает требуемый режим конического сканирования блока СВЧ. Предложена конструкция и испытаны отдельные элементы.

Блок управления приводом (БУ) обеспечивает работу привода с необходимой стабильностью периода и угловой скорости.

Устройство сбора данных (УСД) формирует сигналы и управляет переключателями ФВПП, начала и конца калибровок, собирает данные от преемников и передает их в накопитель.

Накопитель обеспечивает предварительную обработку данных от всех каналов, формирует поток данных и передает упакованные данные в радиолинию.

Энергопотребление и вес. При разработке габаритного чертежа радиометра были проведены оценки энергопотребление и веса отдельных блоков и прибора в целом. Результаты приведены в *табл. 2*.

Зарубежные проекты

Для сравнения, приведем основные характеристики зарубежных радиометров. Назовем некоторые из них.

Проект MEGHA-TROPIQUES

Совместный франко-индийский проект MEGHA-TROPIQUES (Aguttes et al., 2000) предназначен для исследования водяного цикла в тропической атмосфере в рамках климатических изменений. Запуск спутника на низкоширотную орбиту с наклонением 20° и высотой 400 км состоялся в октябре 2011 г. Весь частотный диапазон от 10,6 до 183,3 ГГц поделен между двумя следующими радиометрами.

- Радиометр MADRAS со сканированием по конусу, работающий на частотах 10,6 (В, Г); 18 (В, Г); 23; 36 (В, Г); 89 (В, Г) и 157 (В, Г) ГГц. Разрешение 40-6 км в зависимости от частоты.
- Радиометр SAPHIR, имеющий шесть каналов на частотах 183,31 ± 0,2; ±1,1; ±2,7; ±4; ±6,6; ±11 ГГц. Осуществляется линейное сканирование поперек направления полета с максимальным углом отклонения ±50° от надира таким образом, что полоса захвата составляет 1661 км.. Разрешение на поверхности в направлении надир составляет 10 км, увеличиваясь в поперечном направлении до 22 км на краях сканирования, размер среднего пиксела составляет 12,3 км (Aires et al., 2012).

Радиометр GMI

Радиометр GMI, заявленный в проекте изучения глобального водяного цикла Global Precipitation Measurement (GPM), представляет собой микроволновой многоканальный радиометр с коническим сканированием. В прибор входит 13 каналов на частотах 10 (В, Г), 18 (В, Г), 23 (В), 36 (В, Г), 89 (В, Г), 166 (В, Г), 183,3 + 3 (В), 183,3 + 7 (В) ГГц. Диаметр зеркальной антенны составляет 1,2 м, угол визирования выбран 48,5 град.; при этом угол

падения на поверхности – 52,8 град. При секторе сканирования 140 град. полоса обзора составит 904 км. Наклонение орбиты спутника GPM выбрано 65 град. при высоте 407 км. Запуск GMI на спутнике GPM намечен на 2014 г.

Заключение

Отметим главную особенность предлагаемого проекта микроволнового сканирующего радиометра – это высокие измерительные свойства системы. Основное направление усилий связано с задачей достичь значений потоковой эффективности антенны по каждому каналу не менее 0,97, разработать конструкцию прибора с малым уровнем влияния фона Земли и платформы КА и обеспечить высокую точность абсолютной калибровки. Предлагаемый микроволновый сканирующий радиометр-спектрометр МРС позволит из космоса измерять радиояркостные температуры в диапазоне частот 6–220 ГГц с точностью порядка 1 К.

Очевидно, что с точки зрения практических задач основной интерес представляют возможности комплекса по измерению ключевых параметров океана и атмосферы и их взаимодействия. Предварительные оценки позволяют предположить точности и диапазоны измерений основных параметров:

- скорость приповерхностного ветра с точностью 1 м/с (в диапазоне 0–10 м/с) и 10% свыше 10 м/с;
- направление приповерхностного ветра с точностью 10 град.;
- температура поверхности океана с точностью 1град. (в диапазоне 0–40 град. С);
- интегральное содержание водяного пара с точностью 0,5 кг/кв. м (в диапазоне 0–80 кг/кв. м);
- водозапас облачности с точностью 0,1 кг/кв. м (в диапазоне 0–5 кг/кв. м);
- интенсивность осадков с точностью 2,5 мм/час (в диапазоне 0–25 мм/час);
- восстановление профиля влажности атмосферы на 8 уровнях до высоты 10–12 км;
- поток тепла через границу океан-атмосфера с точностью 20 Вт/кв. м (в диапазоне 0–500 Вт/кв. м).

Литература

1. *Алексеев П.В., Викторов А.С., Волков А.М., Гончаров А.К., Гордон З.И., Кочеров С.А., Некрасов В.В., Прохоров Ю.Н., Хапин Ю.Б.,* Микроволновый сканирующий радиометр интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА) // Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. С. 68–76.
2. *Беспалова Е.А., Веселов В.М., Гершензон В.Е., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Раев М.Д., Трохимовский Ю.Г., Семин А.Г., Смирнов Н.К., Скачков В.А., Хапин Ю.Б., Чистяков В.Н., Шарков Е.А., Эткин В.С.* Об определении скорости приповерхностного ветра по измерениям поляризационной анизотропии собственного и рассеянного СВЧ-излучения // Исследование Земли из космоса. 1982. № 1. С. 87–94.

3. *Бухаров М.В., Геохланян Т.Х., Хапин Ю.Б.* Интегральные влажностные параметры атмосферы над океанами по информации микроволнового радиометра МИВЗА // Метеорология и гидрология. 2003. № 12. С. 46–55.
4. *Волков А.М., Бухаров М.В., Озёркина В.В., Улова Л.Н., Хапин Ю.Б.* Восстановление параметров атмосферы регрессионным методом по микроволновым измерениям из космоса // Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. С. 1–10.
5. *Волков А.М., Хапин Ю.Б.* Микроволновый сканирующий радиометр-поляриметр нового поколения МСР (6,8…89 ГГц). Получение и использование спутниковых данных о природных ресурсах Земли и окружающей среде // Сб. науч. тр. СПб: Гидрометеоиздат, 2004. Вып. 1. С. 33–36.
6. *Дзюра М.С., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Способ дистанционного определения скорости и направления ветра над водной поверхностью, А.С. 1582849 от 23.05.1988 // Бюллетень изобретений. 1993. № 45–46.
7. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры / Под ред. Д.В. Королькова. М.: Наука, 1973. 416 с.
8. *Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Радиотепловая спектроскопия морской поверхности // Доклады АН СССР. 1987. Т. 297. № 3. С. 587–589.
9. *Кравцов Ю.А.. Мировская Е.А., Попов А.Е., Троицкий И.А., Эткин В.С*. Критические явления при тепловом излучении периодически неровной водной поверхности. Известия АН СССР // Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 7. С. 733–739.
10. *Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Хапин Ю.Б., Шарков Е.А.* Микроволновый сканирующий радиометр-поляриметр нового поколения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 1. С. 238–243.
11. *Поспелов М.Н.* Применение микроволновой поляриметрии для дистанционного зондирования морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 2005. № 1. С. 39–50.
12. *Семин А.Г., Кузьмин А.В., Хапин Ю.Б., Шарков Е.А.* О возможности восстановления вертикального распределения водяного пара в атмосфере тропиков по измерениям в линии 183 ГГц из космоса // Исследование Земли из космоса. 2012. № 2. С. 41–52.
13. *Трохимовский Ю.Г.* Модель радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности // Исследование Земли из космоса. 1997. № 1. С. 39–49.
14. *Хапин Ю.Б., Кузьмин А.В., Шарков Е.А.* О предельных характеристиках спутникового радиометра-спектрометра в диапазоне 6-220 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 150–159.
15. *Чернявский Г.М., Чёрный И.В.* СВЧ-радиометры для задач гидрометеорологии на борту спутников «Метеор – 3М» и «Метеор – М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Седьмая всероссийская конференция: Сб. тезисов. 2009.
16. *Aguttes J.P., Schrive J., Goldstein Ch., Rouzé M., Raju G.* MEGHA-TROPIQUES, a satellite for studying the water cycle and energy exchanges in the tropics // IEEE/IGARSS Conf. 2000. Honolulu, HI, July 24–28, 2000.

17. *Aires F., Bernardo F., Prigent C.* Atmospheric water-vaper profiling from passive microwave sounders over ocean and land. Part I: Methodology for the Megha – Tropigues mission // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2012.
18. *Hollinger J.P., Peirce J.L., Poe G.A.* SSM/I Instrument Evaluation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1990. V. 28. No. 5. P. 781–790.

Microwave radiometer-spectrometer with limit characteristics for the study of the Earth from space in the range of 6…220 GHz

Yu.B. Khapin [1], A.V. Kuzmin [1], A G. Semin [2], E.A. Sharkov [1]

[1] Space Research Institute, Moscow, Russia
E-mails: yuhapin@gmail.com, kuzmin@asp.iki.rssi.ru, e.sharkov@mail.ru
[2] State Pedagogical University, Penza, Russia
E-mail: semin_ag@mail.ru

The analysis of the status and outlined the trends in the development of space radiometry. Considered are the characteristics of the main types of radiometers with conical scanning, worked recent years in Earth orbit at the Russian and foreign satellites. On the basis of the conducted analysis of proposed project microwave radiometer-spectrometer (MRS) with limit of measuring characteristics in the frequency spectrum of 6,8 (V, H), 10,6 (V, H, ±45°); 18,7 (V, H, ±45°); 22,2 (H); 36 (V, H, ±45°); 85 (V, H); 118 (6 channels); 150 (V, H); 183 (6 channels) GHz.

Keywords: radiometer, radiometer-spectrometer, microwave radiometry, brightness temperature, recovery profile of water vapor in the atmosphere.