ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2020, № 4, с. 86–96

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИЗК

МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТР-СПЕКТРОМЕТР МИРС КАК ОСНОВА КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА “КОНВЕРГЕНЦИЯ”

© 2020 г. И. Н. Садовский[a], *, А. В. Кузьмин[a], Ю. Б. Хапин[a], Т. О. Козлова[a]

[a]*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

*****E-mail: ilya_nik_sad@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.10.2019 г.

В работе представлено описание микроволнового радиометра-спектрометра (МИРС). Конструкция прибора разработана в результате выполнения эскизного проекта, являющегося первым этапом наземной подготовки космического эксперимента (КЭ) “Конвергенция”. На следующем этапе реализации КЭ предложенные технические решения планируется реализовать в виде конструкторской документации для изготовления опытного и летного образцов. МИРС представляет собой многочастотный сканер-зондировщик, предназначенный для регистрации собственного уходящего радиотеплового излучения системы “земная поверхность–атмосфера”. Набор частот принимаемого излучения лежит в пределах от 10 до 200 ГГц. Прибор предполагается установить на российском сегменте Международной космической станции (МКС). Коническое сканирование поверхности Земли реализуется за счет вращения антенного блока относительно неподвижного основания. При периоде вращения 1.3 с и постоянном угле встречи с Землей в 53.1° обеспечивается непрерывное покрытие поверхности Земли в полосе 800 км с пространственным разрешением для самых высокочастотных каналов в 10 км. В качестве приемников излучения используются 9 радиометров-поляриметров, реализованных по схеме “радиометр полной мощности”. Антенная система МИРС реализована в виде офсетной параболической антенны с разделенными облучателями. В рамках эскизного проектирования выбраны оптимальные конструктивные решения, позволяющие решать основные задачи космического эксперимента и сохранять параметры МИРС в условиях эксплуатации на МКС.

Ключевые слова: космический эксперимент “Конвергенция", спутниковая пассивная радиополяриметрия, радиометр полной мощности, сканер-зондировщик

DOI: 10.31857/S0205961420030057

ВВЕДЕНИЕ

Целью космического эксперимента (КЭ) “Конвергенция” (Шарков и др., 2018) является исследование основных закономерностей зарождения и развития крупномасштабных атмосферных процессов типа тропических циклонов и среднеширотных ураганов на основе комплексного анализа широкого спектра измеряемых параметров системы “океан–атмосфера” (детальные профили температуры и влажности атмосферы, водозапас облаков, интенсивность осадков, температура поверхности океана, скорость и направление приповерхностного ветра и т.д.). Для достижения поставленной цели и решения сопутствующих практических задач будут использоваться данные пассивных радиополяриметрических измерений интенсивности уходящего радиотеплового излучения атмосферы Земли и ее поверхности в диапазоне 10–200 ГГц. С этой целью в рамках наземной подготовки эксперимента разрабатывается микроволновый радиометр-спектрометр, или МИРС (Кузьмин и др., 2005).

Сложность и многообразие решаемых в ходе эксперимента научных и практических задач, в совокупности с множеством ограничений, накладываемых выбором в качестве места установки одного из модулей российского сегмента международной космической станции (РС МКС), потребовало от разработчиков МИРС создания микроволнового зондировщика “нового поколения” (Хапин и др., 2013б), в конструкции которого реализованы следующие принципы: во-первых, это изменение частотно-поляризационного плана измерительного комплекса по сравнению с традиционно применяемым в современных микроволновых зондировщиках дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) (Стерлядкин, Шарков, 2014); во-вторых, – создание комплекса радиометрических приемников с предельной инструментальной точностью измерения радиояркостной температуры (Хапин и др., 2013а); в-третьих, это обеспечение малого пространственного разрешения, соответствующего пространственным масштабам изучаемых процессов и явлений.

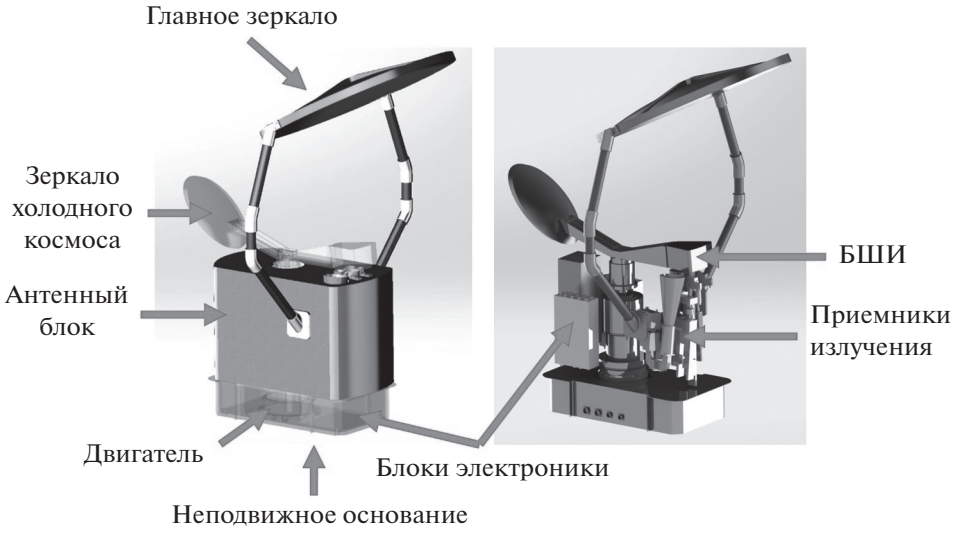

Рис. 1. Условное расположение блоков и систем МИРС. На рисунке слева полупрозрачной представлена неподвижная часть МИРС.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ МИРС

МИРС представляет собой многоканальный радиометр панорамного типа обзора с электромеханическим сканированием пространства лучами, вращающимися вокруг направления в надир (коническое сканирование) под постоянными углами из диапазона 46.6°–51.9° (соответствуют углам встречи с Землей 50.7°–56.9°) с периодом 1.3 с. При таком способе обзора поверхности Земли для высоты орбиты МКС (для оценки выбрано значение 410 км) полоса обзора составляет 830 км.

Внешний вид МИРС представлен на рис. 1. В конструкции использована стандартная для подобных систем компоновка (детальный сравнительный анализ действующих микроволновых радиометрических комплексов космического базирования представлен, например, в статье (Хапин и др., 2013б)). А именно: неподвижное основание, в котором расположены блоки электроники и электродвигатель, обеспечивающий вращение антенного блока, и сам антенный блок, в котором совмещены антенная система, приемники излучения и блоки управления.

ПАРАМЕТРЫ СКАНИРОВАНИЯ

Привод обеспечивает вращение антенного блока, за счет этого осуществляется последовательный круговой обзор поверхности Земли с постоянным углом встречи с Землей в 53.1°. Сохранение постоянного угла встречи с Землей является принципиальным моментом. Во-первых, зависимость интенсивности излучения системы “океан–атмосфера” от вертикального угла наблюдения имеет сложный вид, а иногда и резонансный характер, т.е. небольшие изменения угла приводят к скачкообразному изменению излучения. Таким образом, при проектировании геометрии эксперимента очень важно устранить хотя бы этот мешающий фактор. И второе, само значение этого угла выбрано не случайно. Такой угол позволяет исключить влияние на результаты измерений геометрии подстилающей водной поверхности на вертикальной поляризации (см., например, (Кутуза и др., 2016)), а также используется ведущими зарубежными спутниковыми системами, что позволит в дальнейшем проводить валидацию результатов измерений. Следует подчеркнуть, что сохранение постоянного угла встречи с Землей может быть обеспечено только при предложенном методе сканирования.

Период вращения определяется исходя из нескольких факторов. Первое – это высота орбиты МКС, второе – пространственное разрешение системы в 10 км для самых высокочастотных каналов, и третье – это необходимость полного покрытия поверхности при имеющихся значениях пространственного разрешения и высоты орбиты. Исходя из этих условий, период вращения МИРС имеет значение 1.3 с. Схематично картина распределения пятен обзора приведена на рис. 2.

В ходе сканирования рабочими зонами, используемыми для проведения измерений, считаются две зоны обзора: передняя и задняя относительно направления движения МКС, каждая по 120°. Таким образом, получаемая ширина полосы обзора составляет около 800 км. Результаты моделирования показали, что в данном случае полное покрытие поверхности Земли может быть получено за двое суток.

Важным моментом при круговом сканировании является возможность наблюдения каждого

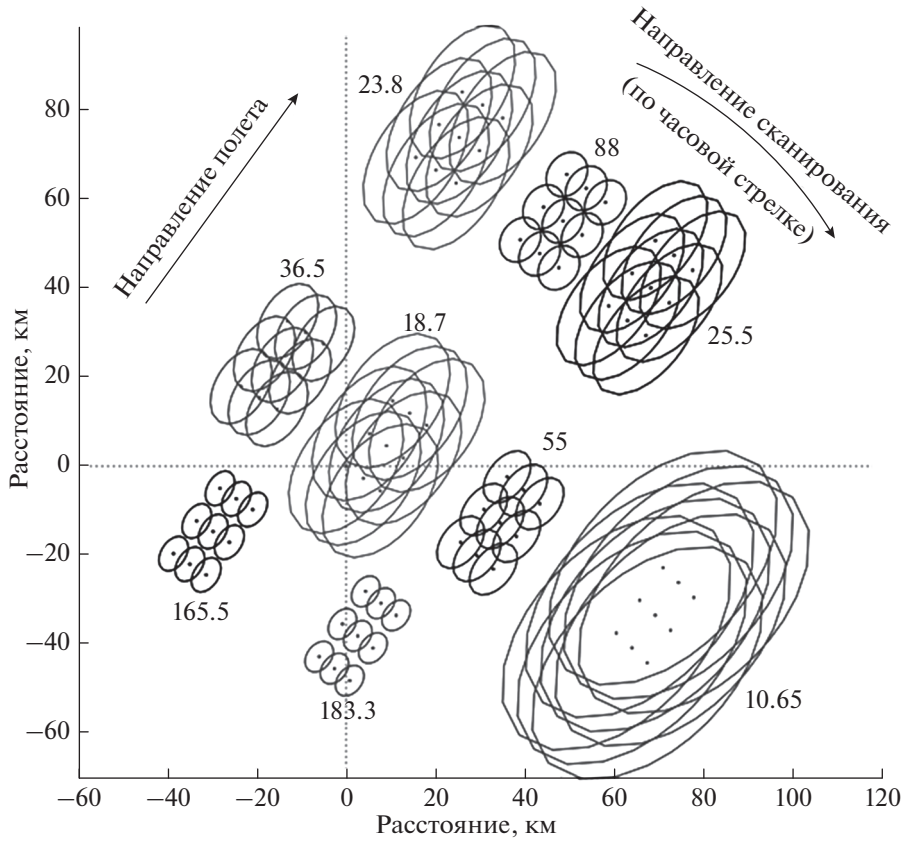

Рис. 2. Схематичное расположение пятен обзора МИРС, соответствующих используемым частотным каналам.

элемента сканирования дважды – в переднем и заднем секторе обзора. Только этот факт позволяет устранить неоднозначность решения некоторых задач эксперимента, как, например, при восстановлении направления приповерхностного ветра.

ПАРАМЕТРЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ МИРС

Микроволновый радиометр-спектрометр МИРС предназначен для измерения радиотеплового излучения атмосферы Земли и ее поверхности в микроволновом диапазоне. Результаты этих измерений используются в качестве входных данных при решении основных задач проекта, которые представлены ниже (поляризация: В – вертикальная, Г – горизонтальная; ±45° – поляризации, повернутые относительно вертикальной на указанный угол; частота в ГГц):

• Восстановление профилей температуры $T(h)$ и влажности $\rho(h)$ атмосферы (18.7(В), 25.25(В), 55.5(Г), 165.5(В), 183.3(Г)).

• Определение температуры поверхности океана (ТПО) (10.65(В, Г), 18.7(В, Г), 36.5(В, Г)).

• Измерение скорости приповерхностного ветра $|\bar{W}|$ (10.65(В, Г), 18.7(В, Г), 36.5(В, Г)).

• Определение направления приповерхностного ветра $\bar{W}$ (10.65(±45°), 18.7(±45°), 36.5(±45°)).

• Определение интегральной влажности атмосферы V (18.7(В, Г), 23.8(В, Г), 36.5 (В, Г)).

• Определение интегрального водозапаса облаков Q (18.7(В, Г), 23.8(В, Г), 36.5(В, Г), 88.0(В, Г)).

• Определение интенсивности осадков I (18.7(В, Г), 23.8(В), 36.5(В), 88(В)).

Частотно-поляризационный план МИРС, выбранный для КЭ “Конвергенция”, в основном схож с набором каналов приборов-аналогов. Однако в нем предусмотрены несколько отличий, позволяющих, с одной стороны, расширить перечень классических задач пассивной радиополяриметрии (табл. 1) и, во-вторых, повысить точность и достоверность получаемых данных.

Одной из особенностей МИРС является предложенный сотрудниками ИКИ РАН новый метод дифференциальных измерений для решения проблемы наблюдения распределения водяного пара в нижней тропосфере (Стерлядкин и др., 2017). Метод заключается в использовании разности сигналов, измеренных на склоне линии поглощения водяного пара, вместо традиционных одноканальных измерений на частоте 22.235 ГГц. Сла-

Таблица 1. Продукты, предоставляемые на основе данных действующих радиометрических комплексов космического базирования (в сравнении с разрабатываемым МИРС)

Инструмент	Спутник(и)/носитель	$T(h)$	$\rho(h)$	ТПО	$\lvert\bar{W}\rvert$	$\bar{W}$	V	Q	I
AMSR-2	GCOM-W			+	+		+	+	+
AMSU-A	Aqua, NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19, MetOp-A, MetOp-B	+					+	+	+
ATMS	NOAA-20, SNPP	+	+				+	+	+
GMI (core)	GPM Core Observ			+	+		+	+	+
MHS	NOAA-18, NOAA-19, MetOp-A, MetOp-B		+				+	+	
MWHS-2	FY-3D, FY-3C	+	+				+	+	
MWI (HY-2A)	HY-2B			+	+		+	+	
MWRI	FY-3B, FY-3D, FY-3C				+		+	+	
SAPHIR	Megha-Tropiques		+				+		
SSM/I	DMSP-F15			+	+		+	+	
SSMIS	DMSP-F16, DMSP-F17, DMSP-F18	+	+	+	+		+	+	+
WindSat	Coriolis			+	+	+	+	+	
МТВЗА-ГЯ	“Метеор-М” № 2	+	+	+	+		+	+	+
МИРС	РС МКС	+	+	+	+	+	+	+	+

бое поглощение в полосе 22.235 ГГц приводит к тому, что у “дифференциального” сигнала появляется хорошая чувствительность к изменению влажности в нижних атмосферных слоях 0–4 км.

Другой особенностью МИРС является использование поляриметрических измерений для получения скорости и направления приповерхностного ветра. На трех частотных каналах: 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц – измеряются три параметра Стокса собственного электромагнитного излучения морской поверхности, по которым возможно определить параметры вектора скорости ветра с точность ±1м/с по модулю и ±10° по направлению.

В радиометре-спектрометре МИРС используются 9 радиометрических приемников, обеспечивающих прием электромагнитного излучения в 22 частотных диапазонах. С учетом поляризаций получается 33 измерительных канала, характеристики которых представлены в табл. 2.

АНТЕННАЯ СИСТЕМА МИРС

Общий вид антенной системы представлен на рис. 3. Антенная система состоит из следующих основных конструктивных элементов:

- основного зеркала (1);
- кронштейна крепления основного зеркала к поворотной платформе (2);
- набора облучателей (3), закрепленных на установочной плите;
- зеркала холодного космоса (4).

Рабочая поверхность параболического зеркала представляет собой офсетную (несимметричную) вырезку из параболоида вращения, смещенную от фокальной оси. Диаметр круглой апертуры (проекции кромки зеркала на фокальную плоскость) равен $D = 700$ мм, фокусное расстояние $f = 550$ мм, зазор между кромкой зеркала и фокальной осью равен 145 мм. Кромка рабочей поверхности зеркала – эллипс с осями 768 × 700 мм.

Полученные размеры параболического зеркала являются компромиссом между повышенными требованиями к антенной системе МИРС в части пространственного разрешения, эффективности главного луча и уровню кроссполяризации и ограничений на габариты всего МИРС с учетом необходимости его транспортировки на МКС (габариты гермоперехода МКС: диаметр 800 мм, длина 2000 мм).

В качестве материала для изготовления зеркала планируется использование углепластика, имеющего малую удельную массу, низкий коэффициент температурного расширения, обладающего высокой конструктивной жесткостью и устойчивостью к космическим излучениям. Это позволит минимизировать деформации, обусловленные температурными перепадами, возникающими под действием переменного солнечного излучения (орбита МКС не является солнечно-синхронной), что особенно важно при работе на частотах выше 100 ГГц. В практике создания отечественных систем ДЗЗ применение углепластика для изготовления антенной системы будет использовано впервые.

Таблица 2. Параметры радиометрических каналов МИРС

Номер частотного канала	Частота, ГГц	Стабильность, МГц	Полоса, МГц	Поляризация	Чувствительность при τ = 1 с, K	Чувствительность в элементе разрешения, K	Чувствительность в элементе разрешения с поляризацией, K	Количество каналов
1	10.65	±25	100	Г. В. ±45°	0.042	0.18	0.37	4
2	18.7	±25	200	Г. В. ±45°	0.03	0.25	0.35	4
3	23.8	±10	400	Г. В	0.02	0.2	0.3	2
4	24.0	±25	250	В	0.025	0.26	0.26	1
5	24.5	±25	250	В	0.025	0.26	0.26	1
6	25.5	±25	250	В	0.025	0.26	0.26	1
7	26.5	±25	250	В	0.025	0.26	0.26	1
8	36.5	±50	2000	Г. В. ±45°	0.01	0.16	0.33	4
9	52.8	±5	1 × 380	Г	0.033	0.7	0.7	1
10	53.596 ± 0.115	±5	2 × 168	Г	0.035	0.75	0.75	1
11	54.4	±5	1 × 380	Г	0.033	0.7	0.7	1
12	54.94	±5	1 × 380	Г	0.033	0.7	0.7	1
13	55.5	±10	1 × 310	Г	0.036	0.8	0.8	1
14	57.290	±1	1 × 310	Г	0.036	0.8	0.8	1
15	88	±130	4000	Г. В	0.015	0.25	0.35	2
16	165.5	±130	3000	В	0.02	0.4	0.6	1
17	183.3 ± 0.3	±25	400	Г	0.05	1.2	1.2	1
18	183.3 ± 1.0	±50	500	Г	0.045	1.0	1.0	1
19	183.3 ± 1.8	±50	1000	Г	0.033	0.7	0.7	1
20	183.3 ± 3.0	±70	1000	Г	0.033	0.7	0.7	1
21	183.3 ± 4.5	±70	2000	Г	0.023	0.5	0.5	1
22	183.3 ± 7.0	±70	2000	Г	0.023	0.5	0.5	1

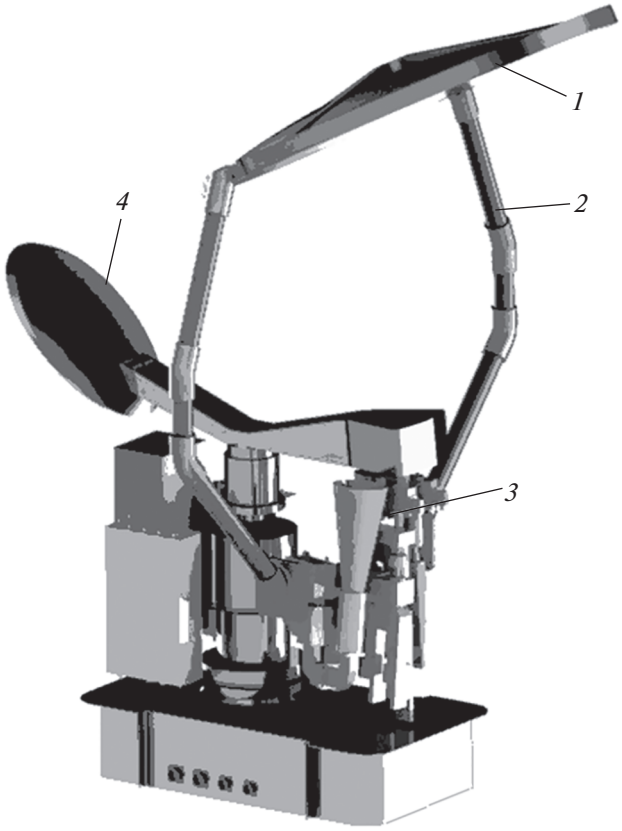

Рис. 3. Компоненты антенной системы. Пояснения даны в тексте.

В силу значительного разброса необходимых частотных диапазонов, в антенной системе МИРС используются 9 отдельных облучателей по числу используемых радиометрических приемников. В качестве облучателей антенной системы предложено использование двухмодовых рупоров Поттера, имеющих самые малые габариты при равенстве прочих радиотехнических параметров. Ввиду того, что каждый облучатель занимает свое положение в фокальной области параболического зеркала, максимумы соответствующих лучей разнесены по углу и антенная система формирует в пространстве систему лучей (работает в многолучевом режиме) по принципу “один облучатель – один луч”. Расчетные значения положения лучей в пространстве приведены на рис. 4. Обобщенные характеристики разработанной антенной системы МИРС приведены в табл. 3.

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ

Малая высота орбиты МКС (относительно “стандартных” солнечно-синхронных орбит спутников ДЗЗ) и необходимость сплошного покрытия подстилающей поверхности Земли с пространственным разрешением в 10 км являются обоснованием высокой скорости углового сканирования МИРС (период вращения составляет 1.3 с). В свою очередь, это приводит к тому, что время накопления сигнала в элементе разрешения для самых высокочастотных каналов МИРС составляют порядка 2 мс. При таких критически малых временах накопления сигнала выбор схемы реализации радиометрических приемников оказывает определяющее влияние на точность проводимых измерений и, как следствие, на точность решения основных задач проекта “Конвергенция”.

В силу того, что радиометры, построенные по схеме “радиометр полной мощности” (РПМ), потенциально обладают наивысшей чувствительностью среди всех известных схем СВЧ-радиометров, в проекте “Конвергенция” все радиометры будут реализованы именно по такому принципу.

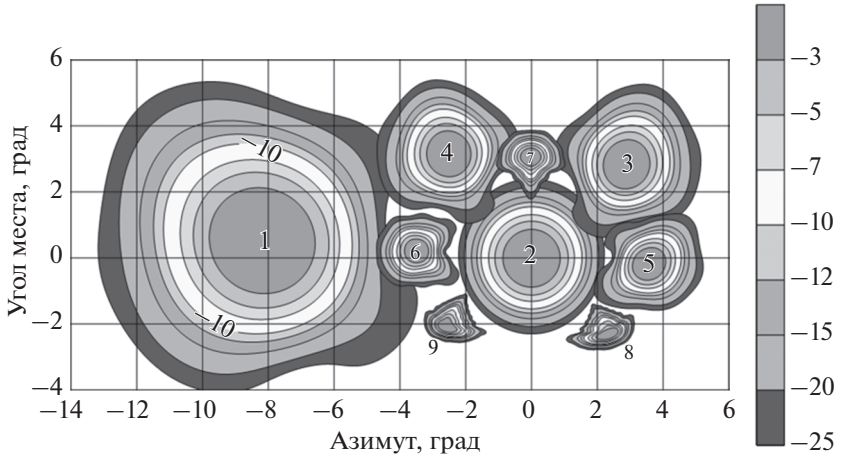

Рис. 4. Расчетное расположение лучей антенной системы МИРС в пространстве. Номера каналов соответствуют частотам из табл. 3.

Таблица 3. Характеристики антенной системы МИРС

№	f, ГГц	G, дБ	КИП	Эффективность луча, дБ		$\Delta\theta_{-3дБ}$, град	Кросс, дБ	Угол между надиром и лучом, град	Направление луча	
				−20	−30				Az, град	El, град
1	10.65	35.3	0.56	0.946	0.957	3.2	−18.2	49.8	8.2	0.6
2	18.7	40.9	0.65	0.968	0.975	1.76	−24.4	48.7	0	0
3	23.8	42.2	0.55	0.960	0.971	1.48	−21.7	51.56	−2.9	2.8
4	25.5	42.7	0.54	0.962	0.973	1.38	−21.6	51.85	2.5	3.1
5	36	45.3	0.49	0.959	0.971	1.0	−22.5	48.6	−3.6	−0.2
6	55	47.8	0.37	0.961	0.974	0.74	−21.5	49.0	3.45	0.2
7	85	49.8	0.25	0.964	0.975	0.63	−23.8	51.74	0.04	3.04
8	166.3	51.7	0.1	0.965	0.976	0.73	−23.0	46.45	−2.35	−2.3
9	183.3	51.5	0.08	0.967	0.977	0.63	−22.2	46.7	2.65	−2.05

Конструкция антенной системы МИРС предусматривает использование 9 облучателей параболического зеркала, к которым подсоединяются 9 радиометрических приемников на частоты 10.65, 18.7, 23.8, 25.25, 36.5, 55.0, 85.0, 165.5 и 183.3 ГГц. Часть из них (25.5, 55.0 и 183.3 ГГц) принимает микроволновое излучение в нескольких частотных полосах, поэтому количество радиометров полной мощности составляет 22. Три радиометра принимают излучение на четырех линейных поляризациях (радиометры 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц), так что в сумме это составляет 12 информационных каналов. Три радиометра принимают излучение на двух ортогональных линейных поляризациях (радиометры 23.8 и 88 ГГц), что дает четыре информационных канала. Остальные 17 РПМ принимают фиксированную линейную поляризацию (17 информационных каналов). Итого, сигналы 22 РПМ представляются 33 информационными каналами.

В радиометрах полной мощности 18.7, 23.8, 25.25, 36.5 и 88.0 ГГц приемник реализован по варианту прямого усиления сигнала. В остальных (10.65, 55.0, 165.5 и 183.3 ГГц) использован супергетеродинный вариант детектирования.

Для достижения планируемых значений чувствительности разрабатываемых радиометрических приемников будут использованы передовые СВЧ-компоненты иностранного производства (элементная база фирм Low Noise Factory/Omnimus Instruments (Швеция) и Spacek Lab (США)), обладающие наилучшими параметрами с точки зрения их шумовых характеристик, согласования и надежности.

КАЛИБРОВКА МИРС

Микроволновый радиометр спектрометр МИРС использует стандартную двухточечную калибровку. Опорные точки – температура “холодного” космоса (отраженное зеркалом “холодного” космоса (ЗХК) реликтовое излучение с яркостной температурой 2.7 K) и температура бортового широкоапертурного излучателя (БШИ) (модель “черного тела” с температурой из диапазона 230–340 K) (Лапшин и др., 2018). Такая калибровка МИРС обеспечивает достоверность и единство измерений параметров земных и атмосферных объектов.

Требования к конструкции и метрологическим характеристикам ЗХК и БШИ обусловлены оптической схемой МИРС, количеством и расположением антенных облучателей, диапазонами частот и температуры и другими геометрическими, радиофизическими и термодинамическими характеристиками МИРС и МКС. БШИ и ЗХК располагаются в секторах сканирования, где не проводится измерение яркостной температуры Земли. Эти области располагаются между передним и задним секторами обзора и составляют приблизительно по 60° каждый. При вращении антенного блока ЗКХ и БШИ последовательно перекрывают апертуры облучателей девяти калибруемых радиометров. Таким образом осуществляется последовательная подача на входы радиометров МИРС излучения “теплого” БШИ и излучения “холодного” космоса.

Бортовой широкоапертурный излучатель закрепляется на неподвижной (относительно основания) крепежной штанге, зафиксированной на оси вращения антенного блока МИРС (см. рис. 2). Трапецеидальная форма апертуры БШИ выбрана из расчета оптимального перекрытия всех рупорных облучателей при их прохождении под БШИ (положение, представленное на рис. 2).

Излучающий элемент (ИЭ) БШИ изготовлен из монокристаллических кремниевых стержней прямоугольного сечения (10 × 10 мм), высотой от

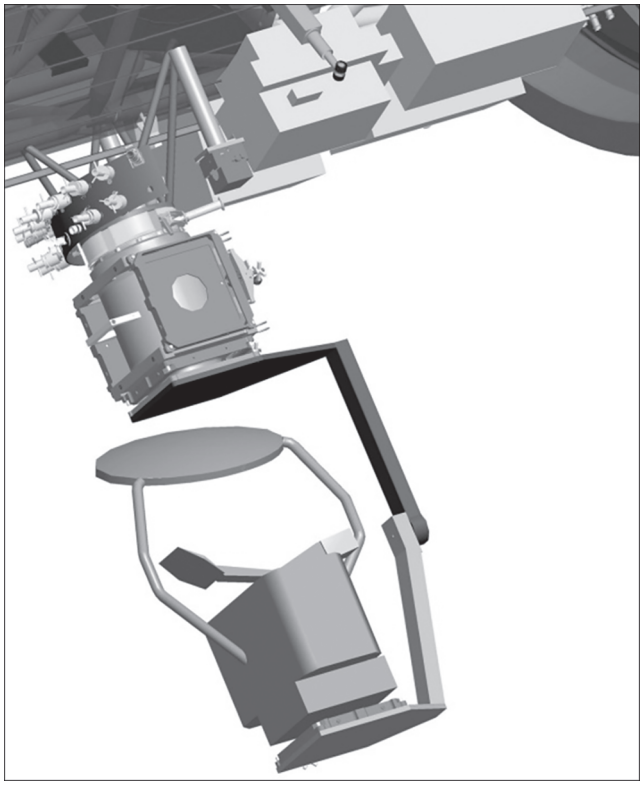

Рис. 5. Вариант реализации механического адаптера для установки МИРС на УРМ-Н1-4 НЭМ.

60 до 70 мм, заточенных с одного конца на конус с углом при вершине ~20°. Для повышения электропроводности кремния в условиях пониженной температуры (при работе в условиях открытого космоса) применяется легирование, чтобы достигнуть уровня концентрации доноров или акцепторов 1×10^{16} см$^{-3}$, что обеспечивает необходимые значения коэффициента поглощения ИЭ БШИ в требуемом диапазоне температуры 78–300 K и диапазоне частот от 6 до 200 ГГц.

Несимметричность апертуры БШИ относительно рупоров калибруемых радиометров осложняет установление равномерности термодинамической температуры по объему и апертуре ИЭ БШИ, а это в свою очередь может привести к отличающимся от среднего значениям шумовой температуры на входах разных облучателей, принимающих излучение от различных элементов апертуры БШИ. В связи с этим, для измерения эффективного значения термодинамической температуры ИЭ БШИ предусмотрено восемь платиновых термометров сопротивления типа ПТСВ-6м (шесть – рабочие, два – в резерве). ИЭ БШИ установлен в корпусе, изготовленном из алюминиевого сплава. Для увеличения жесткости конструкции и уменьшения массы корпус имеет ребра жесткости и изготавливается в виде одной неразъемной детали. Корпус БШИ закрывается матами экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) для экранирования солнечной радиации.

Калибровка с помощью ЗХК производится для каждого частотного диапазона при вращении антенного блока в момент попадания соответствующего облучателя в фокальную область неподвижного ЗХК. При этом офсетное параболическое ЗХК перекрывает конус облучения основного зеркала (как это показано на рис. 1) и формирует прожекторный пучок в пределах того углового сектора космического пространства, в котором нет ярких объектов. Таким образом, азимут центров лучей, формируемых зеркалом холодного космоса в момент калибровки, будет примерно одинаковым и будет находиться в плоскости симметрии неподвижного ЗХК, а угол места для лучей от облучателей с разным углом визирования будет различным.

Геометрически, рабочая поверхность ЗХК представляет собой короткофокусную офсетную вырезку из параболоида вращения. Размеры зеркала: 350 × 250 мм, фокусное расстояние 70 мм, вынос кромки от фокальной оси 11 мм.

Для минимизации массы изделия ЗКХ выполняется из алюминиевого сплава, так как здесь не требуется такая высокая точность и температурная стабильность формы поверхности, как в случае основного зеркала. Изготавливается ЗХК методом штамповки из плоского листа. При этом необходимая жесткость конструкции обеспечивается достаточно глубоким профилем поверхности, наличием отбортовки по краю и дополнительными ребрами жесткости с тыльной стороны зеркала. Тыльная стороны ЗХК закрывается матами ЭВТИ.

РАСПОЛОЖЕНИЕ НА МКС

Установка МИРС предполагается на новом научно-энергетическом модуле (НЭМ), введение в эксплуатацию которого было запланировано на 2018 г., но задерживается, по всей видимости, на неопределенное время. В связи с этим помимо модуля НЭМ рассматривались и другие варианты расположения МИРС на универсальные рабочие места (УРМ), используемые для установки научного, навигационного и связного оборудования РС МКС. Предварительные оценки показали, что только использование УРМ-Н1-4, расположенного в нижней части модуля НЭМ, позволяет обеспечить схему измерений с двумя секторами обзора. Это условие является обязательным в задаче восстановления направления скорости приповерхностного ветра, а неопределенность последнего параметра может повлечь за собой снижение точности решения других задач КЭ. Дополнительное наблюдение элемента поверхности в два раза повышает время накопления сигнала и, сле-

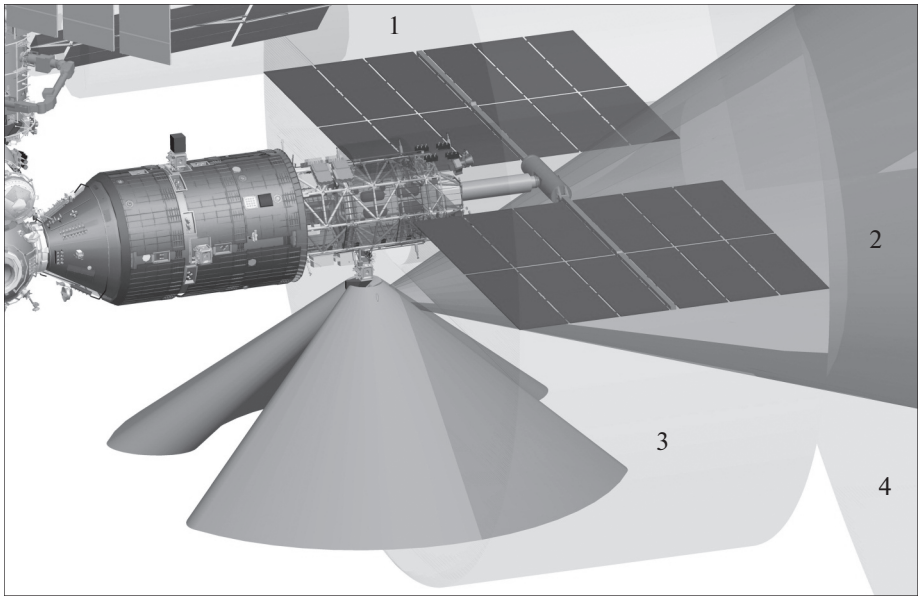

Рис. 6. Частичное перекрытие полей зрения антенной системы МИРС (область 3) и ЗХК (область 2) зонами ометания солнечных панелей модуля НЭМ (область 1) и американского сегмента МКС (область 4) (при установке МИРС на УРМ-Н1-4 НЭМ).

дуя общей практике реализации радиометрических измерений, повышает точность измерений в 1.4 раза.

Среди основных проблем при работе с УРМ-Н1-4 следует выделить следующие.

Во-первых, для установки блока МИРС на УРМ-Н1-4 НЭМ требуется достаточно сложный адаптер. Вариант адаптера показан на рис. 5. Возможность использования такого адаптера должна быть подтверждена прочностным расчетом адаптера и расчетом нагрузок на УРМ-Н1-4.

Во-вторых, в поле зрения антенной системы попадают зоны ометания солнечных батарей НЭМ и американского сегмента (рис. 6), что будет вызывать на светлых участках орбиты частичное перекрытие поля зрения МИРС и приведет к сужению его полосы обзора. Следует отметить, что по воздействию на результаты измерений можно выделить статичные элементы конструкции и динамические, в частности, солнечные батареи РС и АС МКС. Попадание статичных элементов конструкции приводит к полной невозможности интерпретации получаемых с данного направления визирования данных. Влияние циклического характера может быть учтено, что влечет лишь частичную потерю радиометрических данных.

Кроме этого в поле зрения калибровочного зеркала (см. рис. 6) попадает часть привода солнечных батарей НЭМ с осью вращения, значит, поле зрения калибровочного зеркала будет затеняться при любом положении привода. При наличии в поле зрения ЗХК статичных элементов выполнение калибровки невозможно. Это влечет за собой возникновение неконтролируемых ошибок в результатах всех проводимых измерений. В данной ситуации существует несколько вариантов решения данной проблемы. Первый – изменение направления визирования калибровочного зеркала по углу места (ближе к надиру) и по азимуту (против направления полета). Конструктивно такая возможность существует в небольшом диапазоне углов, однако внесение подобных изменений неизбежно повлечет за собой сужение рабочих секторов обзора. Второй вариант – это отказ от использования ЗХК и переход к альтернативным способам калибровки радиометрических приемников, например, по “холодному” и “горячему” БШИ (при этом существует возможность значительного увеличения потребляемой мощности системы и снижение заявленных характеристик по чувствительности радиометрической аппаратуры и точности измерения абсолютных значений радиояркостной температуры). И третий, наиболее предпочтительный вариант, – это использование “зеркальной” компоновки МИРС (осуществляется путем взаимной перестановки ЗХК и БШИ) с параллельным поворотом направления визирования ЗХК только в азимутальной плоскости (против направления полета).

Внесение подобных изменений в конструкцию МИРС может быть выполнено только с учетом реальной геометрии выносного кронштейна и в тесной кооперации с сотрудниками Ракетно-космической корпорации “Энергия” им. С.П. Королева (РКК “Энергия”), ответственными за построение полей визирования научной аппаратуры

(НА) при размещении на РС МКС. Применение третьего варианта позволит выполнить требование по ширине полосы в полном объеме, вне зависимости от участка орбиты МКС.

Обобщая вышесказанное, следует констатировать, что несмотря на существенные сложности технической реализации механического адаптера и необходимость дополнительных оценок механических нагрузок на рабочее место, использование УРМ-Н1-4 НЭМ для размещения МИРС является наиболее предпочтительным. На нем обеспечиваются два сектора обзора, которые, даже в силу возникающих ограничений (сужение диапазона рабочих азимутов за счет механического адаптера и частичного затенения солнечными батареями (цикличность работы солнечных батарей может быть учтена) на солнечном участке витка), в большей степени подходят для решения научных задач НА "Конвергенция". Также использование УРМ-Н1-4 НЭМ обеспечивает возможность постоянной калибровки оборудования (обеспечивается работа ЗХК без привязки к участку орбиты) и широкий диапазон углов ориентации звездных датчиков (большая часть полусферы против направления полета), используемых для корректировки значений углов встречи с Землей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы над эскизным проектом космического эксперимента "Конвергенция" была доказана возможность создания микроволнового радиометра-спектрометра с предельными характеристиками. Были рассмотрены все возможные варианты его реализации и выбраны оптимальные технические решения, позволяющие решать основные задачи эксперимента на современном мировом уровне, а в некоторых случаях и превосходить его. Проект прошел успешную защиту в РКК "Энергия" и получил положительное заключение о технической реализуемости на РС МКС. В настоящий момент осуществляется переход к этапу разработки конструкторской документации.

Хотелось бы отметить, что успешная реализация проекта "Конвергенция" позволит отработать выбранные технические решения и методики обработки и предоставления информации для решения широкого спектра научных и практических задач. По замыслу авторов проекта, это первый шаг на пути создания российской группировки специализированных спутников пассивного дистанционного зондирования, укомплектованных современными сканерами-зондировщиками, ориентированной на получение метеорологической информации в глобальном масштабе.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке темы "Мониторинг" (Государственное задание №01.20.0.2.00164) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-01009-а).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Н.Ю. Комаровой за помощь в оформлении материалов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 / Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. М.: GRANP Polygraph. 2005. Т. 1. С. 238–243.

Кутуза Б.Г., Яковлев О.И., Данилычев М.В. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.

Лапшин А.И., Кузьмин А.В., Садовский И.Н., Юрчук Э.Ф. Бортовые широкоапертурные излучатели для калибровки спутниковых микроволновых радиометров дистанционного зондирования Земли // 11-я Всероссийская научно-техн. конф. "Метрология в радиоэлектронике": материалы конф. М.: ФГУП "ВНИИФТРИ". 2018. С. 208–213.

Стерлядкин В.В., Пашинов Е.В., Кузьмин А.В., Шарков Е.А. Дифференциальные радиотепловые методы восстановления профиля влажности атмосферы с борта космических аппаратов // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 2. С. 64–76.

Стерлядкин В.В., Шарков Е.А. Дифференциальные радиотепловые методы определения вертикального профиля водяного пара в тропосфере и стратосфере Земли // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 5. С. 15–28.

Хапин Ю.Б., Кузьмин А.В., Семин А.Г., Утеев А.В. (2013а). 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.

Хапин Ю.Б., Кузьмин А.В., Семин А.Г., Шарков Е.А. (2013б). Микроволновый радиометр-спектрометр нового поколения с предельными характеристиками для изучения Земли из космоса в диапазоне 6–220 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 64–78.

Шарков Е.А., Кузьмин А.В., Веденькин Н.Н., Jeong S., Ермаков Д.М., Квитка В.Е., Козлова Т.О., Комарова Н.Ю., Минаев П.Ю., Park Il.H., Пашинов Е.В., Позаненко А.С., Прасолов В.О., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В., Хапин Ю.Б., Hong G., Черненко А.М. Космический эксперимент "Конвергенция": научные задачи, бортовая аппаратура, методики решения обратных задач // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 71–96.

Microwave Radiometer-Spectrometer MIRS as a Basis of the Space Experiment "Convergence"

I. N. Sadovsky[1], A. V. Kuzmin[1], Yu. B. Khapin[1, †], and T. O. Kozlova[1]

[1]*Space Research Institute RAS, Moscow, Russia*

This paper describes the microwave radiometer spectrometer MIRS. The device's construction was developed during a preliminary designing, which is the first stage of the ground preparation of the space experiment (SE) "Convergence". At the next stage of SE preparation, the proposed technical solutions are planned to be implemented as a design documentation for manufacture test and flight prototypes. MIRS is a multifrequency scanner-sounder designed to register an own radiation of an ocean-atmosphere system. The set of frequencies of the registered radiation lies in the range from 10 to 200 GHz. The device is supposed to be installed on the Russian segment of the International Space Station (RS ISS). Conical scanning is implemented by rotating of an antenna system relative to a fixed base. With a rotation period of 1.3 s and constant Earth-incidence angle equal 53.1 degrees, continuous coverage of the Earth's surface with 800 km wide scan and with spatial resolution for the highest frequency channels of 10 km is provided. As the radiation receiver, 9 radiometer-polarimeters are used, implemented according to the "full power radiometer" scheme. The MIRS antenna system is implemented as an offset parabolic antenna with separated feeds. Within the framework of the outline design, the optimal constructive solutions were chosen, which allow solving the main tasks of the space experiment and ensuring the MIRS parameters in the operating conditions on the ISS.

Keywords: space experiment "Convergence", satellite passive radiopolarimetry, full-power radiometer, scanner-sounder

REFERENCES

Kuzmin A.V., Pospelov M.N., Khapin Yu.B., Sharkov E.A. Mikrovolnovyy skaniruyushchiy radiometr-polyarimetr novogo pokoleniya [New generation microwave scanning radiometer-polarimeter] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: Sb. nauchnykh statey / Ed. Ye.A. Lupyan, O.Yu. Lavrova. M.: GRANP Poligraf. 2005. V. 1. P. 238–243. (In Russian).

Kutuza B.G., Yakovlev O.I., Danilychev M.V. Sputnikovyy monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti [Earth satellite monitoring: microwave radiometry of the atmosphere and surface]. M.: LENAND, 2016. 336 p. (In Russian).

Lapshin A.I., Kuzmin A.V., Sadovsky I.N., Yurchuk E.F. Bortovyye shirokoaperturnyye izluchateli dlya kalibrovki sputnikovykh mikrovolnovykh radiometrov distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Onboard wide-aperture radiators for calibration of satellite microwave radiometers for remote sensing of the Earth] // 11-ya Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Metrologiya v radioelektronike": Materialy konferentsii. M.: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut fiziko-tekhnicheskikh i radiotekhnicheskikh izmereniy. 2018. P. 208–213. (In Russian).

Sterlyadkin V.V., Pashinov E.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A. Differentsial'nyye radioteplovyye metody vosstanovleniya profilya atmosfery s borta kosmicheskikh apparatov [Differential radio thermal methods of atmospheric humidity profile retrieving from spacecraft] // Issledpvaniye Zemli iz kosmosa. 2017. № 2. P. 64–76. (In Russian).

Sterlyadkin V.V., Sharkov E.A. Differentsial'nyye radioteplovyye metody opredeleniya vertikal'nogo profilya vodyanogo para v troposfere i stratosfere Zemli [Differential radiothermal methods for determining the vertical profile of water vapor in the troposphere and stratosphere of the Earth] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2014. № 5. P. 15–28. (In Russian).

Khapin Yu.B., Kuzmin A.V., Semin A.G., Uteyev A.V. (2013a) O predel'nykh kharakteristikakh sputnikovogo radiometra-spektrometra v diapazone 6–220 GGts [On the limit characteristics of satellite radiometer-spectrometer in the range of 6...220 GHz] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. V. 10. № 3. P. 150–159. (In Russian).

Khapin Yu.B., Kuzmin A.V., Semin A.G., Sharkov E.A. (2013b) Mikrovolnovyy radiometr-spektrometr novogo pokoleniya s izucheniyem kosmicheskogo prostranstva v diapazone 6–220 GGts [Microwave radiometer-spectrometer with limit characteristics for the study of the Earth from space in the range of 6...220 GHz] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. V. 10. № 4. P. 64–78. (In Russian).

Sharkov Ye.A., Kuz'min A.V., Veden'kin N.N., Chon S., Yermakov D.M., Kvitka V.Ye., Kozlova T.O., Komarova N.Yu., Minayev P.Yu., Park Il.H., Pashinov Ye.V., Pozanenko A.S., Prasolov V.O., Sadovskiy I.N., Sazonov D.S., Sterlyadkin V.V., Khapin Yu.B., Khong G., Chernenko A.M. Kosmicheskiy eksperiment "Konvergentsiya": nauchnyye zadachi, bortovaya apparatura, metodiki resheniya zadach [Space Experiment "Convergence": Scientific Objectives, On-Board Equipment, Methods of Reverse Problems] // Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2018. № 4. P. 71–96. (In Russian).