

Предварительные результаты экспериментов с СВЧ радиометрическим комплексом L-диапазона на РС МКС

М.Т. Смирнов ¹, А.А. Халдин ²

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141190 Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1,
e-mail: smirnov@ire.rssi.ru

²ФГУП СКБ ИРЭ РАН, 141190 Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1,
E-mail: ahaldin@sdb.ire.rssi.ru

С целью развития и совершенствования методов наблюдения Земли из космоса на РС МКС был установлен панорамный СВЧ радиометрический комплекс РК-21-8, работающий в дециметровом диапазоне длин волн. Предварительный анализ полученных данных позволил оценить стабильность характеристик аппаратуры, основные особенности вариаций излучения различных объектов и помеховую обстановку в период проведения эксперимента.

Ключевые слова: СВЧ радиометрия, дистанционное зондирование Земли.

Введение

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в России и за рубежом в 70 и 80-х годах, показали, что излучательная способность Земной поверхности в дециметровом диапазоне радиоволн сильно зависит от влажности почв и солености океана. Перспективность СВЧ радиометрических измерений для оценки влажности почв и биомассы растительности, а также солености акваторий была показана в ряде работ [Башаринов, Шутко, 1971, Шутко, 1986, Swift and McIntosh, 1983]. При этом эксперименты проводились с наземных установок и с самолетов. Первые спутниковые СВЧ радиометрические эксперименты в этом диапазоне были проведены со станции Skylab [Lerner and Hollinger, 1977].

В последнее время интерес к освоению дециметрового диапазона для дистанционного зондирования Земли со спутников возобновился в связи с возросшими техническими возможностями для проведения таких исследований. При этом главным достоинством является возможность получения глобальных карт влажности почв и солености океана.

В октябре 2009 г. был запущен спутник европейского проекта SMOS с очень сложным СВЧ радиометрическим комплексом MIRAS в котором использован синтез апертуры [Hubert Barré, 2008]. В России было решено создать более простые и дешевые системы для проведения экспериментальных исследований из космоса [Арманд, Тищенко, и др., 2010].

Основные цели Научной программы экспериментов:

- разработка радиофизических методов ДЗЗ из космоса в перспективном дециметровом диапазоне волн для изучения физических явлений и процессов в системе атмосфера - земная поверхность;
- получение экспериментальных данных о пространственно-временных характеристиках влажности почв, состояния растительных покровов и солености океана;
- исследование влияния внешних факторов (галактический фон, ионосфера и др.) на измеряемые характеристики объектов; изучение помеховой обстановки при проведении исследований;
- развитие методов совместной обработки данных различных приборов с разным пространственным разрешением.

В данной статье описываются основные характеристики научной аппаратуры L-диапазона, установленной на МКС, и первые результаты обработки экспериментальных данных.

Краткое описание СВЧ радиометрического комплекса

СВЧ радиометрический комплекс РК-21-8 представляет собой единую конструкцию, состоящую из антенны сборной, 8-ми канального СВЧ приемника L-диапазона (длина волны ~ 21 см), соединенных между собой высокочастотными кабелями и рамы (механического интерфейса), на которой установлены антенна и приемник. Комплекс РК-21-8 разработан и изготовлен в ФГУП СКБ ИРЭ РАН. В таблице 1 приведены его основные технические характеристики.

Антенна сборная представляет собой фазированную антенную решетку (ФАР), имеющую 96 одиночных приемных щелевых излучателей, сгруппированных в шестнадцать столбцов. Столбцы соединены СВЧ кабелями равной длины с диаграммообразующей системой (ДОС), конструктивно расположенной в приемнике. Все 96 одиночных излучателей образуют рабочую поверхность антенны.

Обратная сторона антенны покрыта теплоизоляционным материалом — экранно-вакуумной тепловой изоляцией (ЭВТИ). Антенна конструктивно выполнена в виде четырех идентичных модулей, раскрывающихся на осях с помощью пружин. В каждом модуле находится по четыре столбца из шести одиночных излучателей, соединенных между собой полосковыми элементами. Каждый модуль имеет четыре разъема СВЧ и один разъем термодатчика для контроля температуры модуля антенны. Антенна представляет собой складную конструкцию для того, чтобы ее можно было занести на борт МКС и вынести на внешнюю поверхность МКС через люки для установки комплекса в открытом космосе. На рисунке 1 показана фотография радиометрического комплекса в транспортном положении.

Таблица 1. Основные технические характеристики СВЧ радиометрического комплекса РК-21-8

Средняя частота, МГц	1415
Полоса принимаемых частот, МГц	20
Флуктуационная чувствительность, К	0,3
Диапазон измеряемых температур, К	10 - 320
Поляризация	Линейная, вертикальная
Количество лучей	8
Полоса обзора, км	400
Угловое разрешение, град.	7 x 10
Пространственное разрешение, км	50
Потребляемая мощность, ВА	≤ 110
Масса, кг	≤ 96
Размеры, мм антенна	1200x1920x40
радиометр	670x250x210

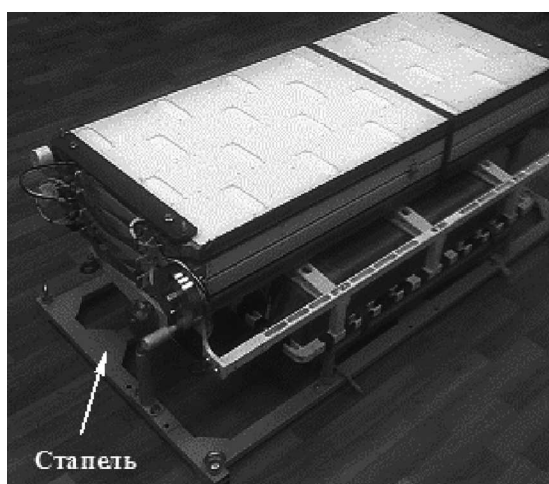


Рис. 1. Транспортное положение комплекса

Антенная система формирует 16 лучей под разными углами, как показано на рисунке 2. В НА «РК-21-8» используется только 8 центральных лучей, сигналы которых поступают на 8 идентичных приемников.

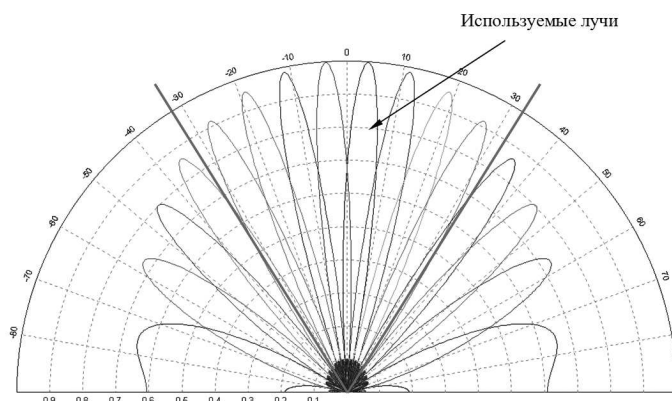


Рис. 2. Диаграмма направленности антенной системы

Приемник радиометрический конструктивно представляет собой единый блок. Внутри корпуса блока размещены электронные элементы и СВЧ узлы восьмиканального приемника. Для повышения стабильности работы прибора основные электронные элементы и узлы приемника помещены в термостатированный кожух, температура в котором автоматически поддерживается постоянной. Значение температуры термостата в виде напряжения аналогового сигнала выводится на выходной разъем прибора. Вторичный источник питания приемника расположен вне термостатированного кожуха.

Габаритные размеры комплекса в рабочем положении указаны на рисунке 3.

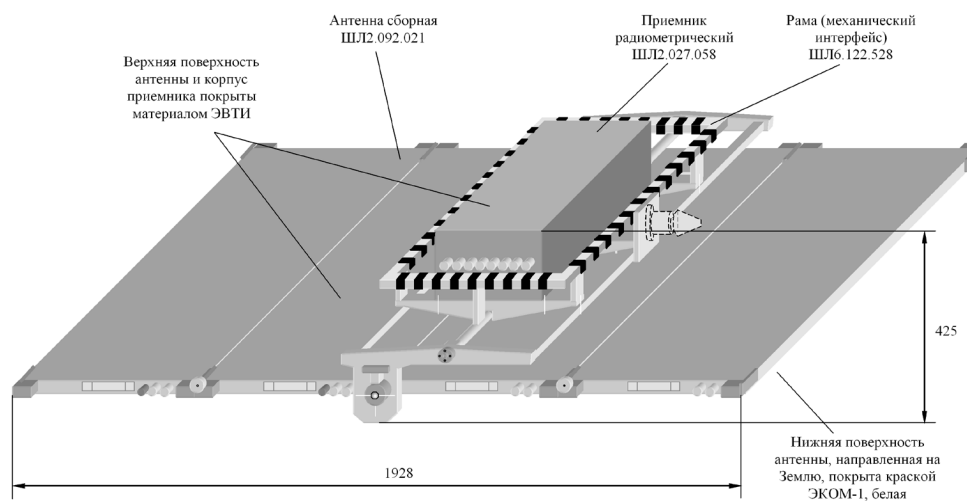


Рис. 3. Габаритные размеры комплекса

Обзор пространства осуществляется в полосе примерно 450 км, лучи диаграммы направленности антенны расположены в плоскости перпендикулярной направлению полета МКС. Геометрическая схема обзора пространства приведена на рисунке 4. Углы встречи лучей диаграммы направленности антенны с нормалью к поверхности Земли составляют 0-25° относительно местной нормали. Особенностью эксперимента на МКС является то, что ориентация антенны может меняться в пределах порядка 5°. Текущие значения углов ориентации определяются по данным служебных систем.

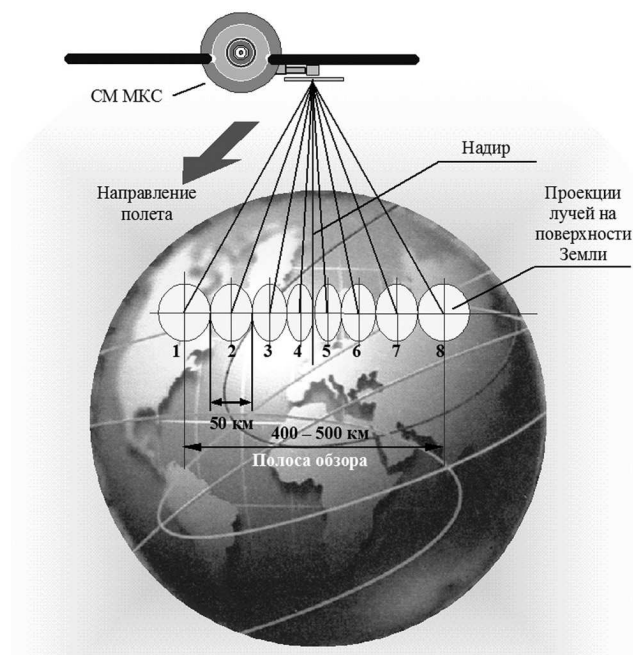


Рис. 4. Геометрическая схема обзора пространства

Общее описание эксперимента

Комплекс РК-21-8 был доставлен 26 января 2011 г. на борт МКС и 16 февраля 2011 г. установлен на универсальном рабочем месте УРМ-Д по II плоскости СМ «Звезда». Установку осуществлял экипаж МКС-26 Дмитрий Кондратьев и Олег Скрипочка. После установки научная аппаратура сразу же была включена в дежурном режиме (режим подогрева). На рис. 5 показана научная аппаратура в рабочем положении на МКС

С 26 апреля по 14 июля 2011 г. научная аппаратура была включена постоянно. Постоянное включение аппаратуры позволяет достичь максимальной стабильности и соответственно точности работы прибора. Запись и сбор информации производился с учетом технических ограничений бортовой системы сбора и передачи информации.



Рис. 5. РК-21-8 в рабочем положении на МКС

В среднем в день записывалось около 3 витков информации в режиме ЗАП8 (опрос с интервалом ~ 0,5 с) и около 5-6 витков в режиме ЗАП1 (опрос ~ 5с). Высокая частота опроса требуется в основном для того, чтобы можно было частично отфильтровать внешние импульсные помехи. Записанная информация сбрасывается на Землю по каналам связи при пролетах над НИП.

Планирование времени включений записи информации и соответственно районов наблюдения, производится на основе приоритетов определяемых научной программой экспериментов.

Файлы научной и сопроводительной информации поступают в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН из ЦУП ЦНИИмаш. Обработка научной информации проводится в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

В качестве основных этапов обработки можно выделить следующие:

- Предварительный анализ данных
 - Анализ телеметрии и температурных датчиков
 - Контроль уровней сигналов
- Временная и географическая привязка измерений
- Предварительная обработка и визуализация результатов измерений для экспресс-анализа
- Формирование файлов для хранения и распространения среди организаций соисполнителей эксперимента
- Калибровка измерений
- Тематическая обработка информации

Все результаты экспериментальных исследований хранятся в информационной системе ЦОХКИ ИРЭ РАН.

Предварительные результаты обработки научной информации

Географическая привязка данных осуществлялась при помощи специально разработанного сотрудниками РКК «Энергия» и ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН комплекса программ. На рис. 6 приведен пример просмотрной формы результатов измерений после географической привязки.

Анализ результатов измерений показал, что измеряемые сигналы достаточно стабильны. Температурный режим прибора находится в пределах нормы.

Одной из существенных проблем при проведении СВЧ радиометрических измерений в L-диапазоне является наличие внешних электромагнитных помех. Полученные экспериментальные данные показали, что, несмотря на присутствие мощных помех, большая часть Земли пригодна для проведения качественных измерений. На рис. 5. зоны с сильными помехами отображены красным цветом. Для корректной обработки научной информации, зоны помех требуется исключать из рассмотрения.

Калибровка данных осуществлялась по специально выбранным пространственно однородным областям поверхности Земли с известными характеристиками излучательной способности и другими параметрами, такими как температура поверхности, соленость воды, скорость приводного ветра и др. При этом предполагалось, что измеренная антенная температура T_a может быть описана следующим выражением:

$$T_a = (T_b^m(1 - \beta) + T_b^b \beta)\eta + T_p(1 - \eta) , \quad (1)$$

где T_b^m и T_b^b - радиояркостные температуры принимаемого излучения в главном лепестке диаграммы направленности антенны и собранные ее боковыми лепестками соответственно,

β - коэффициент рассеяния антенны, η - коэффициент, определяющий потери в антенне, T_p - температура антенны.

С измеренными сигналами на выходе приемника u и антенная температура T_a связана линейно:

$$T_a = ua + b, \quad (2)$$

где a и b - коэффициенты, определяемые при калибровке.

Для пространственно однородных областей в первом приближении можно считать $T_b^m = T_b^b$ или $\beta=0$. В этом случае система уравнений (1) и (2) имеет 3 неизвестных и может быть решена при наличии независимых измерений не менее чем в 3 областях с отличными значениями T_b^m и T_p . Искомые коэффициенты могут быть найдены путем минимизации целевой функции:

$$\sum_{i=1}^N [u_i - (T_b^m \eta + T_p (1 - \eta) - a) / b]^2 = \min,$$

где N – количество районов калибровки.

С точки зрения тематической обработки на начальном этапе нами проводился в основном качественный анализ измеренных в эксперименте характеристик радиотеплового излучения Земли.

На рисунке 7 приведен фрагмент изображения радиоярких температур Южной Америки, полученный в виде композита измерений на разных витках.

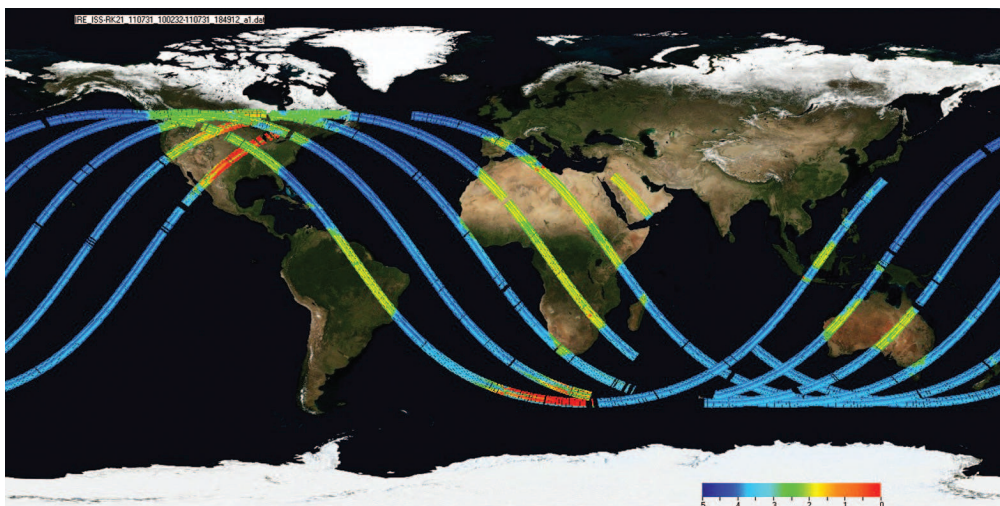


Рис. 6. Пример результатов измерений. 31.07.2011

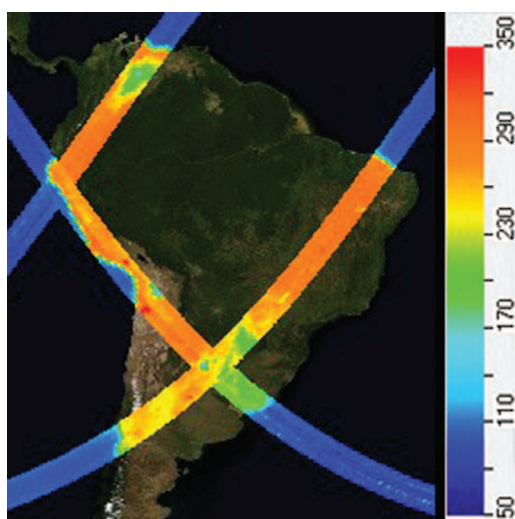


Рис. 7. Фрагмент изображения радиоярких температур Южной Америки

Из рисунка видно, что ее излучение пространственно неоднородно. Сопоставление дистанционных данных с картой биом показало, что наблюдается общее соответствие между типами растительности и интенсивностью измеренного излучения.

Заключение

Полученные экспериментальные данные показали работоспособность созданного СВЧ радиометрического комплекса и принципиальную возможность получения новых данных о характеристиках поверхности Земли в перспективном дециметровом диапазоне электромагнитных волн.

Все экспериментальные данные архивируются в информационной системе ЦОХКИ ИРЭ РАН и по завершении этапа отработки программного обеспечения для обработки информации будут доступны пользователям.

Литература

1. *Баширинов А.Е., Шутко А.М.* Измерение влажности земных покровов методами сверхвысокочастотной радиометрии // *Метеорология и гидрология*, 1971, №9, С. 17–20.
2. *Шутко А.М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986.
3. *Swift C. T. and McIntosh R. E.* Considerations for microwave remote sensing of ocean surface salinity // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1983, vol. GRS-21, P. 480–491.
4. *Lerner R. M. and Hollinger J. P.* Analysis of 1.4 GHz radiometric measurements from Skylab // *Remote Sens. Environ.*, 1977, Vol. 6; P. 251–269.
5. *Hubert M. J. P. Barré, Berthyl Duesmann, and Yann H. Kerr.* SMOS: The Mission and the System // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008, Vol. 46, NO. 3, P. 587–593
6. *Н. А. Арманд, Ю. Г. Тищенко, В. П. Саворский, М. Т. Смирнов, В. С. Аблязов, А. А. Халдин.* Перспективные космические проекты с СВЧ-радиометрическими системами L-диапазона // *Исследование Земли из космоса*. 2010, № 1, С. 20–26.

Preliminary Results of Experiments with L-band Microwave Radiometric System Onboard of RS ISS

M.T. Smirnov ¹, A.A. Khaldin ²

*¹Fryazino Department of Institute of Radioengineering and Electronics RAS
141190, Fryazino, Moscow region, Vvedenskogo sq. 1
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru;*

*²Special Design Bureau IRE RAS
141190, Fryazino, Moscow region, Vvedenskogo sq. 1
E-mail: ahaldin@sdb.ire.rssi.ru*

L-band microwave radiometric system RK-21-8 mounted onboard of Russian Segment of International Space Station is aimed on the development of new technologies in Earth remote sensing. Preliminary analyses of obtained data show that measuring characteristics of instrument are stable. Data obtained allow to estimate characteristics of microwave thermal emission for variety of earth surfaces and RFI situation during measuring campaign.

Keywords: microwave radiometry, Earth remote sensing.