

Анализ СВЧ радиометрических данных L-диапазона, полученных в эксперименте на РС МКС

А.Б. Аквилонова¹, М.Т. Смирнов¹, О.О. Кузнецов¹, А.А. Халдин²

¹ ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская обл., Россия

E-mail: anna@ire.rssi.ru, smirnov@ire.rssi.ru

² ФГУП СКБ ИРЭ РАН, г. Фрязино, Московская обл., Россия

E-mail: ahaldin@sdbireras.ru

Приведен анализ данных СВЧ радиометрических измерений в L-диапазоне, выполненных с июня по август 2011 г. радиометрическим комплексом РК-21-8, установленным на РС МКС. Построены декадные карты излучения земной поверхности. Анализ данных показал, что в определенных районах суши и океанов практически постоянно наблюдаются так называемые «зашкалы» сигналы, которые в большинстве случаев вызваны работой наземных радиолокаторов и других передающих устройств. Результаты измерений с МКС сравниваются с результатами наблюдений при помощи зарубежных спутников этого же диапазона. Рассмотрены мешающие факторы естественного происхождения, такие как отраженное от водной поверхности излучение Солнца и фоновое излучение небесной сферы, а также влияние аппаратурных факторов.

Ключевые слова: СВЧ радиометрические измерения, дистанционное зондирование Земли.

Введение

В настоящее время особую актуальность приобрело получение данных о влажности почвы и солености водной поверхности океанов, которые необходимы для улучшения метеорологических прогнозов, предсказания климата и общего понимания круговорота воды в природе. Эти параметры еще не доступны глобально, с необходимым пространственным и временным разрешением. СВЧ радиометрические измерения в L-диапазоне длин волн позволяют восполнить этот недостаток.

В последние годы осуществляются такие космические проекты с использованием аппаратуры, работающей в этом диапазоне, как SMOS (ESA) (Kerr et al., 2010) и Aquarius (NASA) (Lagerloef et al., 2008). Успешный запуск миссии SMOS был осуществлен в ноябре 2009 г., а Aquarius – в июне 2010 г. Проекты SMOS и Aquarius предназначены для определения как влажности земной поверхности, так и солености океанов.

В феврале 2011 г. в рамках реализации космического эксперимента «СВЧ-радиометрия» на РС МКС был установлен СВЧ радиометрический комплекс РК-21-8, предназначенный для измерения собственного излучения земных покровов и поверхности океана в L-диапазоне длин волн (Смирнов, Халдин, 2012). Основная цель этого эксперимента – разработка методов дистанционного зондирования Земли в перспективном дециметровом диапазоне электромагнитных волн для определения:

- солености океанов,
- влажности почв,
- параметров растительного покрова.

Научная аппаратура (НА) – комплекс РК-21-8 – состоит из 8-канального СВЧ радиометра ($\lambda \sim 21$ см) и сборной (разборной) 8-лучевой антенной системы и была разработана

и изготовлена ФГУП СКБ ИРЭ РАН. Подробное описание комплекса РК-21-8 и первые результаты обработки экспериментальных данных приведены в (Смирнов, Халдин, 2012). Основные характеристики комплекса даны в табл. 1. Схема геометрии наблюдений представлена на рис. 1.

Таблица 1.Основные характеристики комплекса РК-21-8

<i>Наименование</i>	<i>Значение</i>
Средняя частота, МГц	1415
Полоса пропускания, МГц	20
Флуктуационная чувствительность при 1 с, К	0,3
Количество выходных сигналов	8
Количество температурных датчиков	5
Габариты антенной системы, мм	2000 x 1300 x 35
Масса антенны, кг	25
Габариты приемника, мм	670 x 250 x 210
Масса приемника, кг	10
Напряжение питания, В	от 23 до 29
Потребляемая мощность, Вт	не более 120

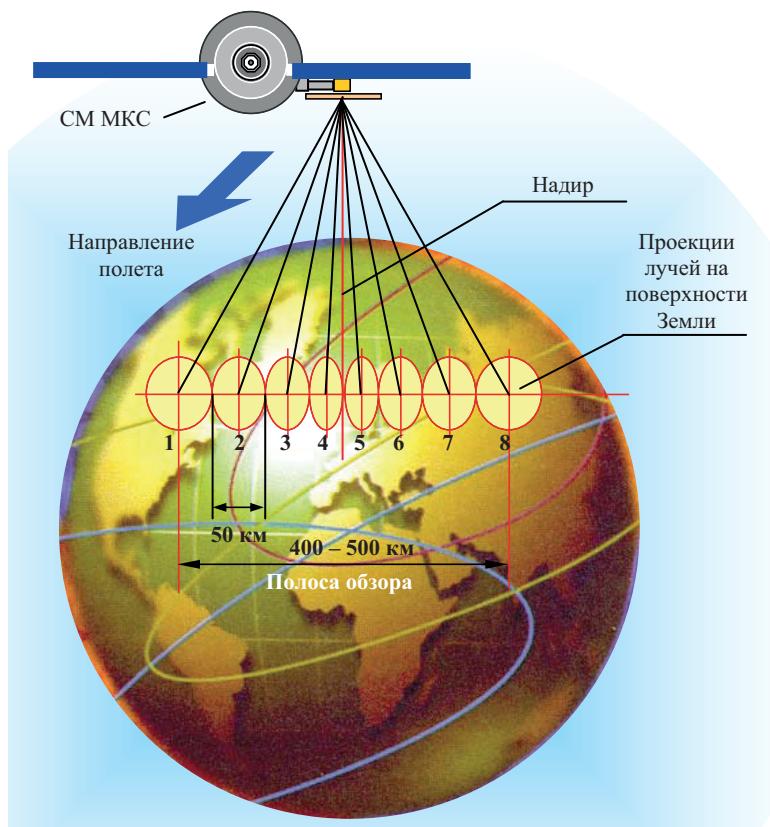


Рис. 1. Геометрическая схема обзора пространства прибора РК-21-8

Номер луча	1	2	3	4	5	6	7	8
Номинальное отклонение от надира, град	-24	-17	-10	-3	3	10	17	24

Основные результаты измерений

В процессе проведения измерений запись информации осуществлялась в двух режимах: ЗАП1 (опрос ~ 5 с) и ЗАП8 (опрос ~ 0,5 с). Всего за период с 14 марта по 16 августа было проведено 314 сеансов измерений¹. Обработка научной информации проводилась в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. В ходе предварительного этапа обработки данных осуществлялись анализ телеметрии и температурных датчиков, а также контроль уровней сигналов. Этап первичной обработки включал в себя:

- временную и географическую привязку измерений;
- формирование файлов для хранения и распространения среди организаций соисполнителей эксперимента;
- визуализацию результатов измерений.

Геометрическая привязка данных производилась с учетом текущих баллистических данных о положении и ориентации станции. Калибровка измерений осуществлялась интерактивно по реперным областям на суше и в океане с использованием имеющихся данных о температуре поверхности, солености воды и скорости ветра над океаном. На этапе тематической обработки были получены предварительные оценки солености поверхностного слоя воды в океане.

Все исходные данные и результаты обработки хранятся в информационной системе ЦОХКИ ИРЭ РАН. В ходе первичной обработки данных для каждого сеанса сброса информации формировались файлы просмотровых форм (browse или quick look). В режиме ЗАП8 основные измерения проводились на нескольких витках над восточными или западными районами Тихого океана преимущественно севернее экватора.

Для анализа количества информации и оценки достаточности полученного количества информации для решения поставленных научных задач нами построены декадные карты покрытия информацией всего земного шара, полученной НА РК-21-8. Для их построения использовался специально разработанный программный модуль. В качестве входных файлов служили файлы нормированных данных и соответствующие файлы географической привязки, которые получаются в результате первичной обработки результатов измерений. Карты покрытия строились для обоих режимов ЗАП1 и ЗАП8. Примеры таких карт приведены на *рис. 2–3*.

Накопленные ряды измерений были проанализированы по следующим направлениям:

- влияние внешних помех на измеряемые сигналы;
- внешние искажающие факторы естественного происхождения;
- аппаратурные факторы, влияющие на точность измерений.

¹ После 14 августа 2011 г. комплекс РК-21-8 прекратил работу.

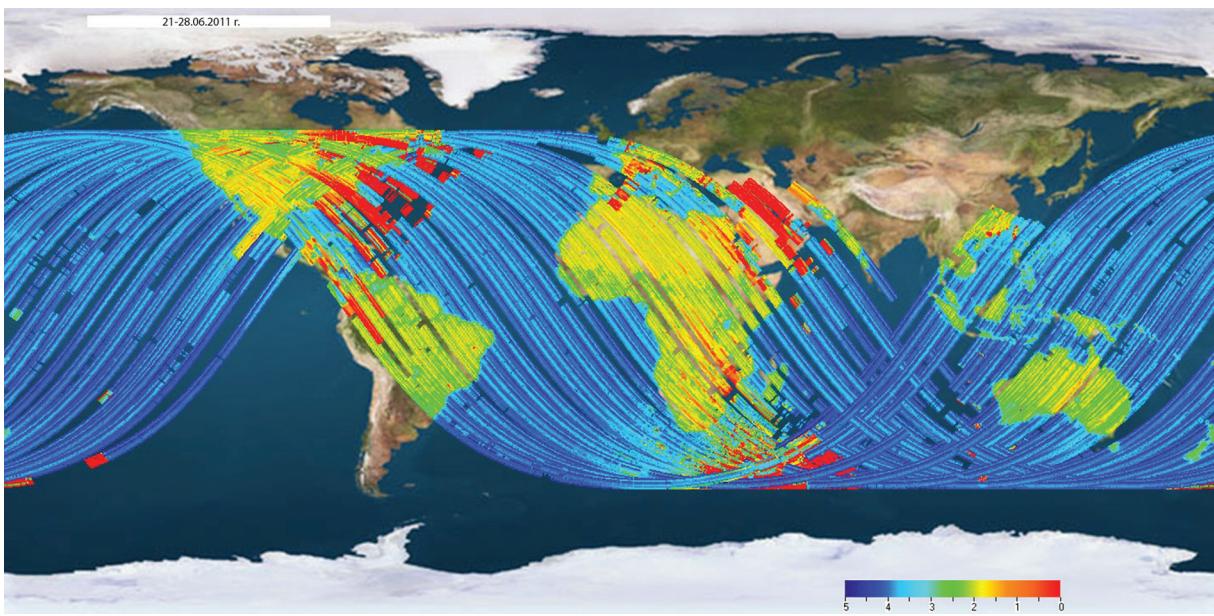


Рис. 2. Карты покрытия информацией за период 21–28.06.2011 в режиме ЗАП1

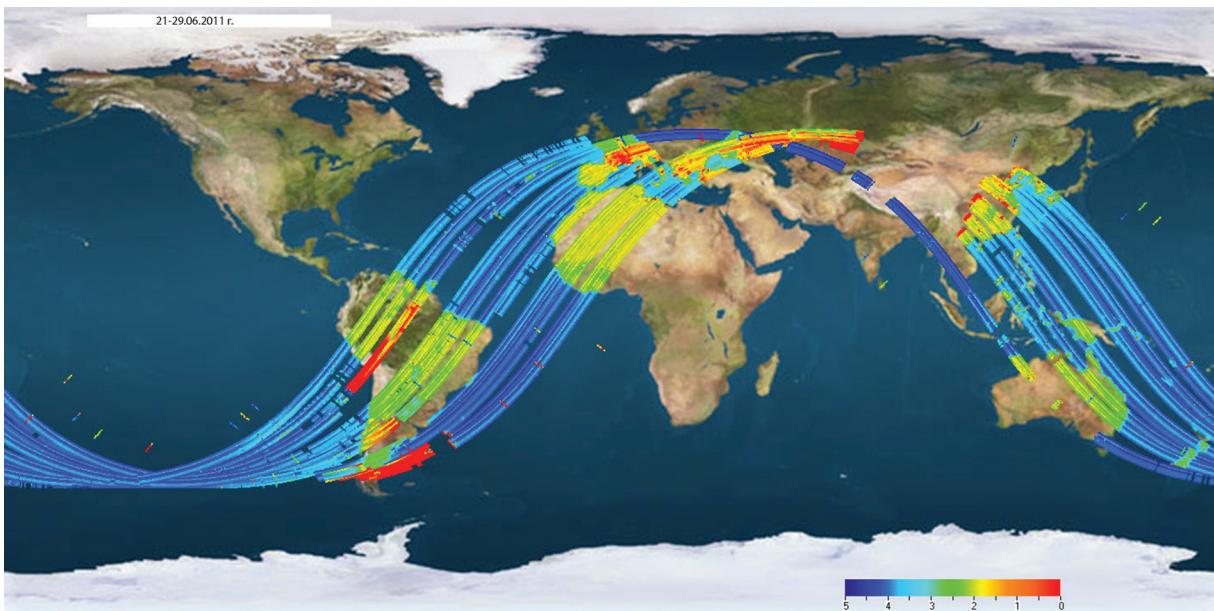


Рис. 3. Карты покрытия информацией за период 21–29.06.2011 в режиме ЗАП8

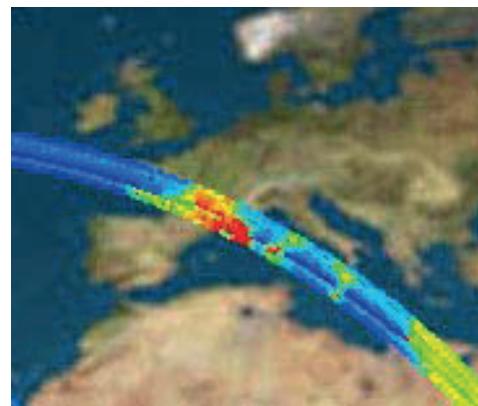
Анализ внешних помех

Анализ полученных данных проводился как по данным отдельных сеансов, так и по обзорным декадным картам. Анализ показал, что в сеансах измерений достаточно часто встречаются нештатные показания выходных сигналов СВЧ радиометрической системы. Это, как правило, превышения уровня значений в 5В или, по-другому, «зашкалы» сигнала. На рисунках эти области отображаются красным цветом. Наличие в большом количестве помех в СВЧ радиометрических данных над сушей существенно сокращает возможности решения задачи по восстановлению влажности почв, что является одной из основных задач космического эксперимента.

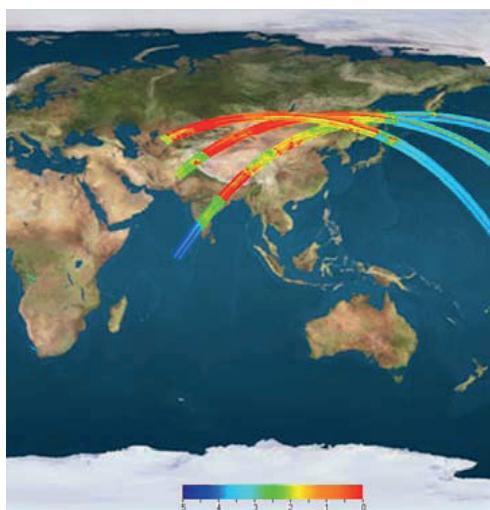
Области, где в большинстве случаев наблюдаются такие помехи над сушей и океанами по данным PK-21-8, приведены на *рис. 4*.



а) Северная Америка



б) Европа



в) Азия



г) Граница Атлантического
и Индийского океанов

Рис. 4. Фрагменты данных PK-21-8 с характерными помехами

Причин, вызывающих эти помехи, может быть несколько, это:

- 1) радиопомехи, обусловленные работой наземных радиолокаторов на частотах, близких к диапазону частот работы СВЧ радиометра;
- 2) радиопомехи, обусловленные работой других (часто незаконных) передатчиков в частотных диапазонах, выделенных для СВЧ радиометрии;
- 3) радиопомехи, создаваемые наземными телекоммуникационными средствами;
- 4) помехи, создаваемые радиотрансляционными космическими аппаратами;
- 5) помехи, обусловленные самой МКС.

Согласно рекомендациям Международного союза телекоммуникаций ITU-R RS.515-5 (Recommendation ITU-R, 2012) для пассивного дистанционного зондирования Земли со спутников выделены следующие частотные полосы, приведенные в *табл. 2*.

Таблица 2. Частотные полосы, выделенные для пассивного дистанционного зондирования Земли (ниже 11 ГГц)

<i>Диапазон частот (ГГц)</i>	<i>Требуемая полоса частот (МГц)</i>	<i>Спектральная линия или центральная частота (ГГц)</i>	<i>Область применения (метеорология, климатология, химия)</i>
1,37–1,427	57	1,4	Влажность почв, соленость океанов, температура морской поверхности, вегетационный индекс
2,64–2,7	60	2,67	Влажность почв, соленость океанов, вегетационный индекс
4,2–4,4	200	4,3	Температура морской поверхности
6,425–7,25	350	6,85	Температура морской поверхности
10,6–10,7	100	10,65	Интенсивность осадков, влагозапас снега, морфология льда, состояние морской поверхности, скорость приводного ветра

Частотный диапазон СВЧ радиометров L-диапазона, используемых как в зарубежных, так и в нашем экспериментах находится в строгом соответствии с данными рекомендациями. Тем не менее, уже в ходе реализации проекта SMOS обнаружилось множество незаконных сигналов по всему миру, делая часть результатов измерений непригодными для научных целей (Camps et al., 2010).

Анализ, проведенный специалистами ESA по результатам эксперимента SMOS (Oliva et al., 2012), показал, что примерно в 67% случаев не удается идентифицировать источник помех, около 18% – это телевизионная связь, 10% – радары и около 4% – разные радиоканалы связи. С точки зрения распространенности помех по континентам, согласно (Oliva et al., 2012), наибольшая вероятность их наблюдается над Европой и Азией. Для устранения незаконных помех в Европе были предприняты некоторые административные меры, что дало положительные результаты. Эти данные хорошо согласуются с нашими результатами измерений, приведенными на *рис. 2, 3, 4*.

Более подробное сравнение характера помех было выполнено для обзорных карт покрытия данными РК-21-8 с картами вероятности присутствия источников радиопомех (*рис. 5*) по данным 15-дневного осреднения для восходящих (A) и нисходящих (D) витков (SMOS). Карты вероятности строятся каждые две недели и регулярно публикуются на сайте http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/smos_rfi/?q=category/7-global. В качестве примера на *рис. 5* приведены карты вероятности за период 16–30 июня 2011 г., что почти соответствует периоду осреднения данных РК-21-8 (21–29.06.2011), приведенных на *рис. 2, 3*. По наличию помех достаточно хорошо коррелируют и те, и другие карты по районам суши в районах Европы и Азии.

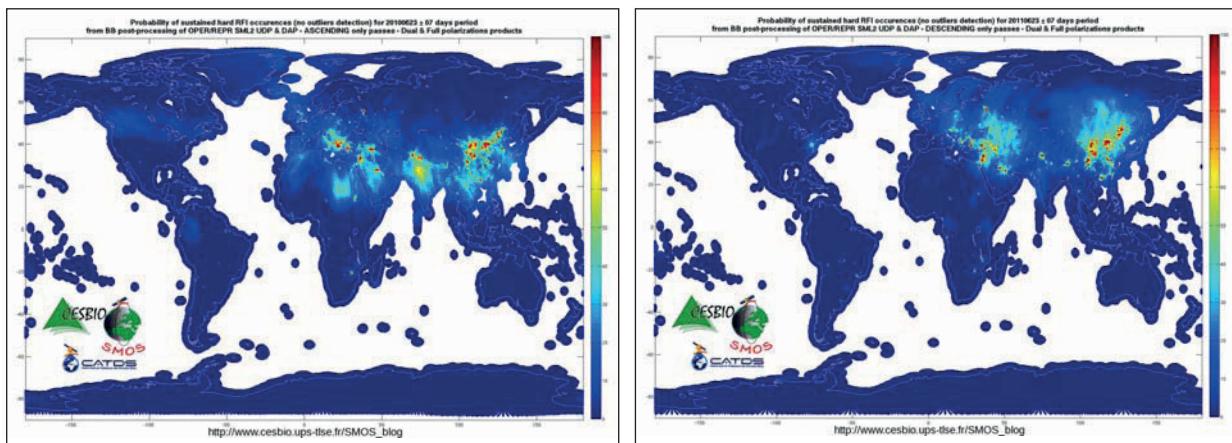


Рис. 5. Вероятность наличия радиопомех по данным SMOS (восходящие витки A – слева и нисходящие D – справа) 16.06.2011.

По оси ординат слева на каждом рисунке указаны географические широты, по оси абсцисс – долготы. Цветовая шкала указывает вероятность наличия помех в %. Красный цвет означает 100%-ю потерю данных, зеленый – 50%-ю и темно-синий – отсутствие помех

Помехи, обусловленные самой МКС, оценить в явном виде чрезвычайно сложно из-за сложности ее конструкции и наличия множества разнообразных приборов и сложности циклограммы работ. На основе анализа электромагнитной совместимости приборов, проводимого на этапе конструирования, было сделано заключение об отсутствии таких помех. Вместе с тем имеются косвенные признаки присутствия таких помех в отдельные промежутки времени.

Внешние факторы естественного происхождения

Наряду с активными помехами при решении задачи определения солёности океана необходимо учитывать такие факторы, как отраженное от водной поверхности излучения Солнца и фоновое излучение небесной сферы.

Для определения возможного влияния отраженного радиоизлучения Солнца от водной поверхности океанов для районов со сбоями был вычислен угол Солнца для заданных координат в районах южной части Индийского и Атлантического океанов. Угол Солнца вычислялся помостью свободно распространяемой программы WinEphem, которая позволяет вычислить эфемериды Солнца, Луны и планет Солнечной системы. Согласно расчетам угол Солнца над горизонтом в рассмотренных районах проведения измерений аппаратурой РК-21-8 не превышал 23 градусов, и в большинстве случаев эти районы были в «тени». Таким образом, за период проведения измерений РК-21-8 отраженное радиоизлучение Солнца от водной поверхности не может оказывать существенного влияния.

Фоновое излучение небесной сферы в L-диапазоне складывается из различных компонент, включая излучение атомарного водорода, излучение Кассиопеи и др. (Dinnat et al., 2010). На *рис. 6* приведена карта полного излучения неба, рассчитанная как сумма излучений всех этих компонент.

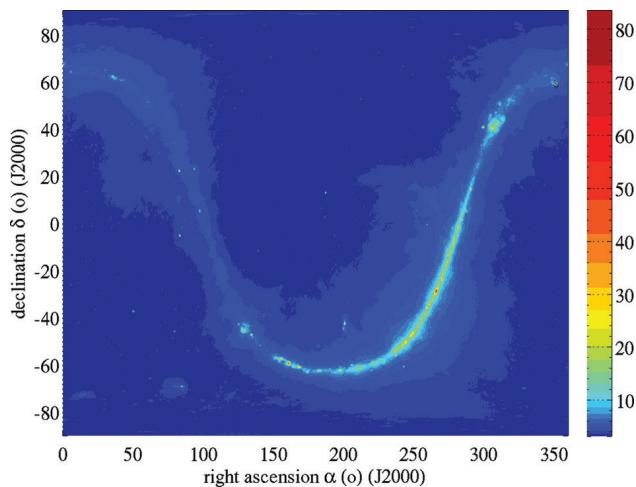


Рис. 6. Карта полного излучения неба, рассчитанная как сумма излучений всех компонент, включая излучение атомарного водорода, излучение Кассиопеи и др. (Dinnat et al., 2010). Цветовая шкала указана в градусах Кельвина

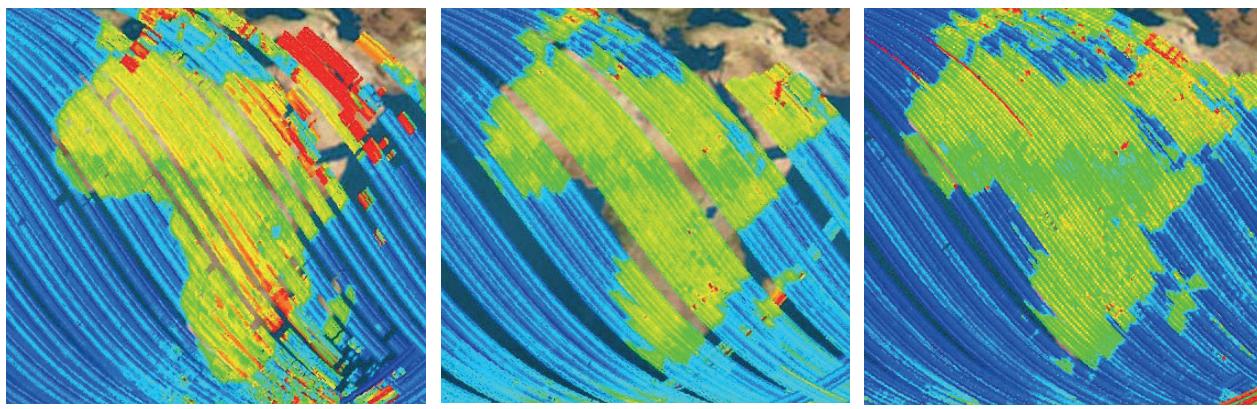
Из рисунка видно, что это излучение достаточно локализовано и должно проявляться в виде полос на измеряемых изображениях. В настоящее время таких характерных особенностей в явном виде не обнаружено. Основная сложность заключается в том, что для учета влияния этих факторов необходимо оперативно рассчитывать геометрию измерений и текущее положение МКС.

Аппаратурные факторы

Среди аппаратурных факторов, влияющих на результаты измерений, существенную роль играют возможная нестабильность усиления прибора и вариации температуры антенно-фидерного тракта. В состав комплекса РК-21-8 не входят специальные средства для калибровки измерений, поэтому основным способом контроля его характеристик является анализ результатов измерений над так называемыми реперными районами с известными характеристиками излучения по независимым данным.

Одним из таких районов служит Африка. На *рис. 7* приведены карты излучения Африканского континента за три периода с интервалом примерно в месяц. Сравнение этих карт с данными ИК-съемки показывает что карты, построенные по данным РК-21-8, четко отражают общий характер поверхности суши. Особенно хорошо выделяется приэкваториальная область. Вместе с тем видно изменение общего уровня измеренных сигналов, что говорит о некоторых изменениях характеристик усиления СВЧ радиометра.

В дальнейшем, после проведения калибровки по внешним реперам, т.е. приведения характеристик излучения к яркостным температурам, можно будет говорить более точно о состоянии и характеристиках подстилающей поверхности.



21–29.06.2011 г.

21–31.07.2011 г.

01–13.08.2011 г.

Рис. 7. Карты излучения Африки за три периода

Вариации температуры антенно-фидерного тракта проявляются в измеренных сигналах СВЧ радиометров за счет наличия потерь в них. Анализ информации при измерениях над океанами показал, что в данном эксперименте указанными потерями пренебрегать нельзя. Наличие температурных датчиков, расположенных на антенне, позволяет в значительной степени учесть их.

На *рис. 8* приведен пример, иллюстрирующий влияние температуры антенны на результаты измерений. На графиках представлены результаты калибровки измерений, полученных в центральном луче диаграммы направленности и соответствующие значения температуры антенны по одному из датчиков в зависимости от времени. Коррекция по температурным датчикам дает более реалистичные результаты, чем без нее.

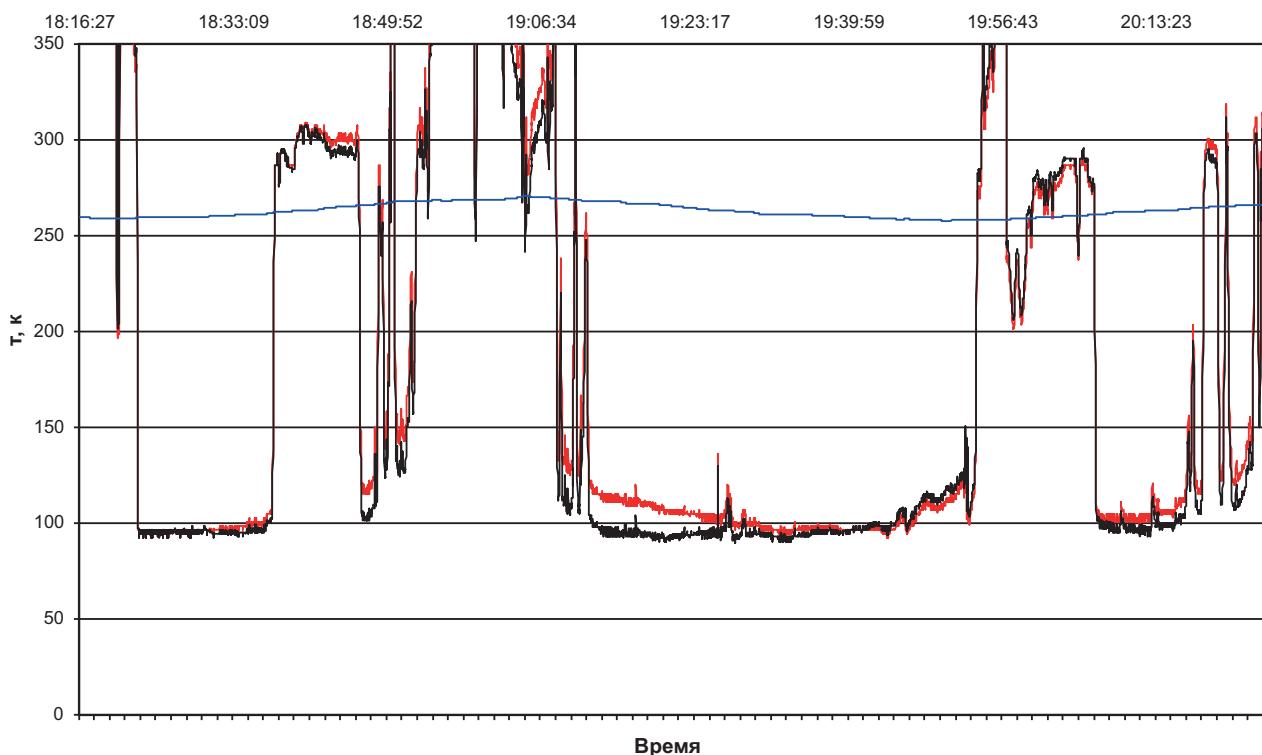


Рис. 8. Учет влияния температуры антенны (синяя линия – температура антенны, красная линия – радиояркостная температура до коррекции, черная линия – после коррекции)

Выводы

Анализ данных, полученных в ходе эксперимента «СВЧ-радиометрия» на РС МКС, позволил проанализировать помеховую обстановку при измерениях в L-диапазоне. Анализ данных показал, что в определенных районах суши и океанов практически постоянно наблюдаются так называемые «зашкалы» сигнала, которые в большинстве случаев вызваны работой наземных радиолокаторов и других передающих устройств. Рассмотренные мешающие факторы естественного происхождения, такие как, как отраженное от водной поверхности излучения Солнца и фоновое излучение небесной сферы, а также аппаратурные факторы могут быть учтены при дальнейшей обработке. Полученные данные пригодны для дальнейшей тематической обработки,

Литература

1. Смирнов М.Т., Халдин А.А. Предварительные результаты экспериментов с СВЧ радиометрическим комплексом L-диапазона на РС МКС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 160–166.
2. Camps A., Gourrion J., Tarongí J.M., Gutiérrez A., Barbosa J., Gutiérrez R. RFI analysis in SMOS imagery // Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, Proceedings, July 25–30. 2010. Honolulu, Hawaii. U.S.A. P. 2007–2010.
3. Dinnat E.P., Le Vine D.M., Abraham S., Flory N. Map of sky background brightness temperature at L-band. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/AQUARIUS/DinnatEtAl2010/>
4. Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., et al. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle //Proceedings of the IEEE. Vol. 98. No. 5. May 2010. P. 666–687.
5. Lagerloef G., Colomb F.R., Le Vine D., Wentz F., Yueh S., Ruf C., Lilly J., Gunn J., Yi Ch., De Charon A., Feldman G., Swift C. The Aquarius/SAC-D Mission // Oceanography. 2008. Vol. 21. No. 1. P. 68–81.
6. Oliva R., Daganzo E., Kerr Y., Mecklenburg S., Nieto S., Richaume P., Gruhier C. SMOS radio frequency interference scenario: Status and actions taken to improve the RFI environment in the 1400–1427 MHz passive band // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. May 2012. Vol. 50. No. 5. P.1427–1439.
7. Recommendation ITU-R RS,515-5(08/2012). Frequency bands and bandwidths used for satellite passive remote sensing.

Analysis of passive microwave L-band data obtained in experiment on RS ISS

A.B. Akvilanova¹, M.T. Smirnov¹, O.O. Kuznetsov¹, A.A. Khaldin²

¹ *Fryazino Department of Institute of Radioengineering and Electronics RAS
Fryazino, Moscow region, Russia*

E-mail: anna@ire.rssi.ru , smirnov@ire.rssi.ru

² *Special Design Bureau IRE RAS, Fryazino, Moscow region, Russia
E-mail: ahaldin@sdbireras.ru*

The analysis of microwave radiometric measurements data is provided in the L range, executed from June to August, 2011 by the radiometric PK-21-8 complex mounted onboard of RS ISS. Decade cards of radiation of the earth surface are constructed. The analysis of data showed that in certain regions of a land and oceans were almost constantly observed RFI signals which were in most cases caused by operation of land radars and other sending devices. Results of measurements from ISS are compared to results obtained by means of foreign satellites in the same range. Factors of a natural origin, such as the radiation of the Sun, reflected from a surface of the water, the background radiation of the sky and instrument impacts are considered.

Keywords: microwave radiometric measurements, Earth remote sensing.