

## **Анализ метрических характеристик и построение эмпирической модели аппаратных искажений спутникового СВЧ радиометрического прибора L-диапазона «Зонд-ПП» для калибровки и обработки данных**

**М.Т. Смирнов**

*ФирЭ им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино, 141190, Московская обл., Россия  
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru*

Рассмотрены методика анализа метрических характеристик СВЧ радиометра L-диапазона «Зонд-ПП» и вопросы выделения и коррекции помех, влияющих на измерения. Эксперимент с радиометром проводился на малом космическом аппарате МКА ФКИ № 1 в 2012–13 гг. Подчеркнута необходимость точной калибровки выходных сигналов СВЧ радиометра и оценки стабильности его функционирования в космосе. Для повышения точности восстановления геофизических параметров предложен алгоритм калибровки измерений с учетом вариаций температуры антенны радиометрической системы. Получены оценки флуктуационной чувствительности радиометра. Показано, что существенное влияние на точность измерений оказывали средства радиолокации и радиосвязи, а также внеземные источники излучения: Солнце и Галактика. Наряду с внешними помехами, которые имели локальный характер и зависели от положения спутника на орбите, в измеренных сигналах иногда наблюдались длительные плавные изменения. Предложена модель измерений, учитывающая основные факторы, влияющие на сигналы радиометра. Выполнен анализ возможных причин наблюдаемых вариаций выходного сигнала в одном из каналов СВЧ радиометрической системы. Предложена методика выделения измеренных сигналов, искаженных внешними помехами, основанная на использовании априорной информации и модельных представлений.

**Ключевые слова:** СВЧ радиометрия, L-диапазон, дистанционное зондирование, алгоритмы, методы, спутники

*Одобрена к печати: 16.09.2016  
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-273-285*

### **Введение**

Для снижения погрешностей определения геофизических параметров по СВЧ радиометрическим измерениям необходимо добиваться высокой чувствительности и стабильности работы измерительных устройств. В данной работе проведен анализ метрических характеристик СВЧ радиометрического прибора L-диапазона «Зонд-ПП» по данным, полученным в ходе эксперимента на космическом аппарате МКА ФКИ № 1 в 2012–13 гг. (Смирнов, Халдин, 2012; Смирнов и др., 2013).

Важнейшим условием достижения высокой точности измерений является надежная калибровка измерений. Для этого использовалась внешняя калибровка по районам с различными и известными коэффициентами излучения и температурами: широколиственные дождевые леса Амазонки, материковые льды Антарктиды и участки спокойной поверхности океана. Погрешности калибровки зависят от количества используемых областей и точности задания радиоярких температур этих областей.

Для мониторинга природных объектов по данным СВЧ радиометрических измерений характеристики измерительного прибора должны быть стабильны. Помимо характеристик прибора, важно оценивать влияние внешних факторов, которые могут влиять как на сам прибор (например, вследствие изменения температуры отдельных элементов), так и на интенсивность принимаемых сигналов (например, излучение Солнца, отраженное поверхнос-

тью океана или материковыми льдами). О наличии внешних факторов можно судить по разности расчетных и измеренных радиоярких температур над выбранными областями океана. Радиояркие температуры океана вычислялись по среднемесячным значениям температуры и солености поверхности океана и скорости приводного ветра. Рассмотрены статистические характеристики указанных разностей.

Природа внешних факторов известна лишь частично. Минимизация их влияния может быть выполнена путем построения эмпирической модели и коррекции результатов измерений. Анализ полученных данных показал, что использование такой модели позволяет в ряде случаев снизить влияние помех, однако для полного решения задачи требуется дополнительная информация, которая не всегда доступна.

### Краткое описание эксперимента

Эксперимент, направленный на развитие методов и средств дистанционного зондирования Земли из космоса, проводился на малом космическом аппарате МКА ФКИ № 1, разработанном ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». На нем был установлен двухлучевой СВЧ радиометрический комплекс L-диапазона «Зонд-ПП», разработанный и изготовленный в ФГУП СКБ ИРЭ РАН (Смирнов, Халдин, 2012). Для повышения чувствительности системы использовалось 2 независимых приемника. Антенна СВЧ радиометра была плоской щелевой, типа фазированной решетки. Основные технические характеристики «Зонд-ПП» приведены в *табл. 1*. Оба луча антенны СВЧ радиометрической системы были ориентированы в направлении, близком к надиру. Геометрия обзора пространства представлена на *рис. 1*.

Таблица 1. Основные характеристики «Зонд-ПП»

<i>Характеристика</i>	<i>Значение</i>
Средняя частота, МГц	1415
Полоса пропускания, МГц	20
Флуктуационная чувствительность при 1 с, К	0,3
Количество выходных сигналов	2
Габариты антенной системы, мм	820×510
Потребляемая мощность (не более), Вт	60
Высота полета, км	820
Пространственное разрешение, км	350
Полоса обзора, км	700

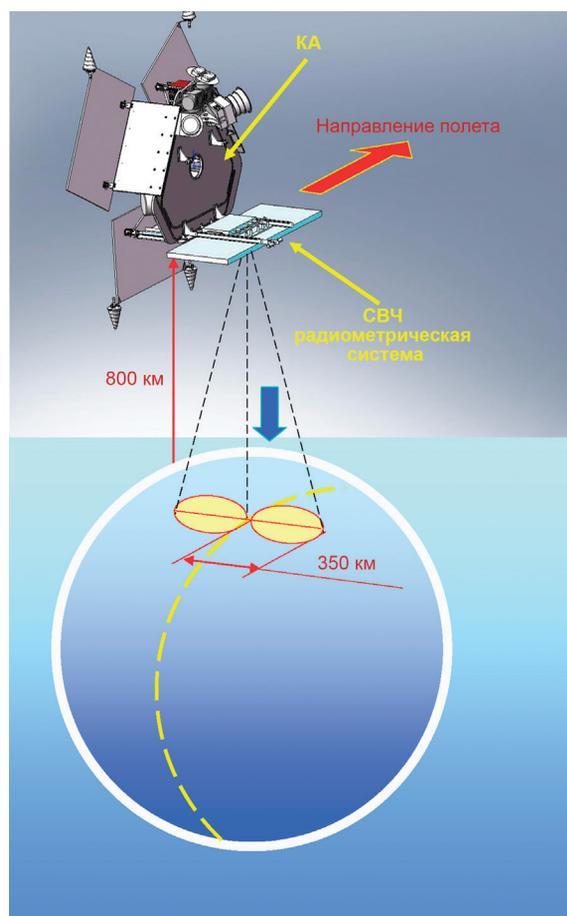


Рис. 1. Схема обзора пространства

Измерения проводились короткими сеансами длительностью около 40 мин, как правило, дважды в сутки. Регулярные измерения начались в сентябре 2012 г., штатная работа прибора шла до конца мая 2013 г. Результаты типичного сеанса измерений представлены на рис. 2.

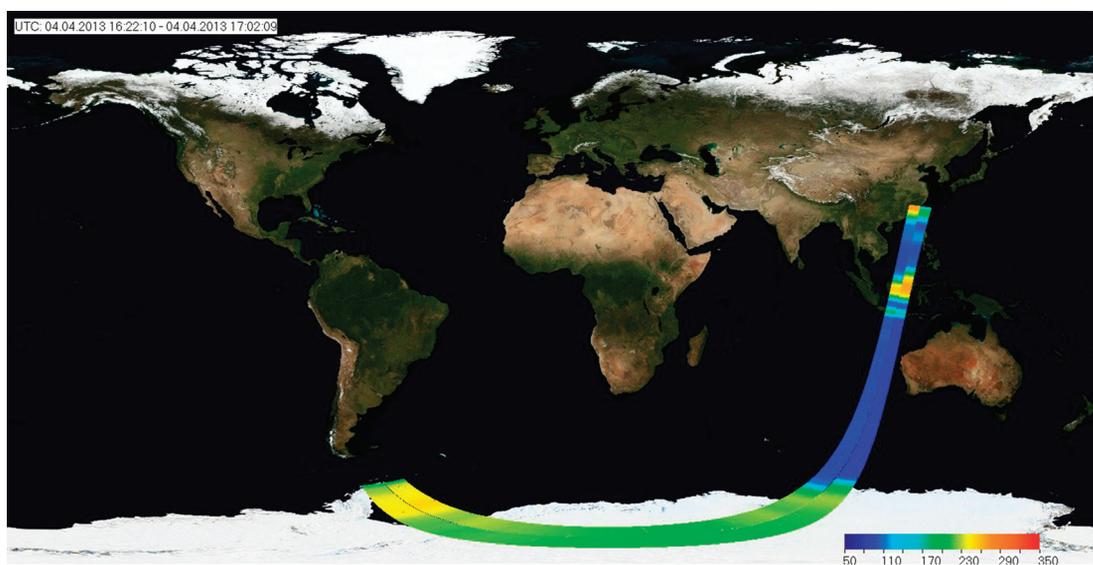


Рис. 2. Типичный сеанс измерений

## Радиометрическая модель измерений и аппаратурных искажений

Для качественной обработки данных, полученных при помощи СВЧ радиометрической системы, требуется знание модели формирования выходных сигналов и их связи с радиояркостью температуры Земли в области измерений.

Связь между измеренными СВЧ радиометром антенными температурами  $T_a$  и радиояркостью температуры исследуемой области Земли в главном лепестке диаграммы направленности антенны  $T_b^m$  определяется соотношением (Башаринов и др., 1974):

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

где  $\beta$  – коэффициент рассеяния антенны,  $\eta$  – коэффициент полезного действия антенны,  $T_b^b$  – средняя радиояркость температура фона, принимаемая через боковые и задние лепестки диаграммы направленности,  $T_p$  – температура антенны. Выходные измеренные сигналы СВЧ радиометра  $u$  связаны с антенными температурами простым линейным уравнением:

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

где коэффициент  $a$  характеризует усиление приемника, а  $b$  – опорный уровень.

Из (1) и (2) следует, что интересующая нас радиояркость температура в главном лепестке диаграммы направленности связана с выходными сигналами радиометра следующим выражением:

$$T_b^m = \frac{a}{\eta(1-\beta)}u + \frac{b}{\eta(1-\beta)} - \frac{\beta}{(1-\beta)}T_b^b - \frac{(1-\eta)}{(1-\beta)}T_p. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что связь между ними линейна, а влияние внешних мешающих факторов, таких как нагрев антенны и излучение, принимаемое через боковые лепестки антенны, носит аддитивный характер.

### Калибровка измерений

Задачей калибровки является главным образом определение неизвестных коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения (2) и по возможности  $\beta$ ,  $\eta$  уравнения (1). Калибровка измерений проводилась по обширным однородным областям пространства на поверхности Земли с известными коэффициентами излучения и температурами. В этом случае неизвестные параметры можно искать путем минимизации среднеквадратичной разности измеренных сигналов и их ожидаемых величин по формулам (1–2) для выбранных калибровочных областей. Определение калибровочных параметров производилось для каждого луча независимо, поскольку излучение в них принималось двумя независимыми приемниками с различными передаточными характеристиками.

Предполагалось, что для использованного типа антенны основной вклад в коэффициент рассеяния  $\beta$  вносят ближайшие к главному боковые лепестки. Тогда при использовании обширных однородных территорий, можно считать  $T_b^m = T_b^b$ , т.е. излучение, принимаемое через боковые лепестки, таким же, как и через главный лепесток. Это предположение эквивалентно для уравнения (1) значению  $\beta = 0$ . Отсюда следует, что определение величины коэффициента рассеяния  $\beta$  при такой методике практически невозможно и следует использовать его величины, измеренные при наземных испытаниях, или расчетные значения, полученные при проектировании антенны.

Минимизируемая целевая функция, исходя из (1–2), выглядит при этом следующим образом:

$$\sum_{i=1}^N [u_i - ((T_{bi}^m \eta + T_{pi}(1 - \eta)) - a) / b]^2 = \min, \quad (4)$$

где  $N$  – количество используемых калибровочных областей.

В качестве калибровочных районов использовались 3 основных типа природных объектов, обладающих различными уровнями излучения в СВЧ диапазоне. Это спокойная морская поверхность с радиояркостью температур порядка 90–100 К, материковые льды Антарктиды – 190–200 К и тропические леса Амазонки – 270–300 К.

Для расчетов излучения морской поверхности нами использовалась модель (Klein, Swift, 1977) с поправками на ветер (Camps et al., 2003).

Значения радиоярковых температур материковых льдов подробно изучались в наземных экспериментах (Macelloni et al., 2013). Эти измерения показали очень высокую стабильность уровней излучения, практически не зависящих от времени суток и слабо меняющихся со сменой сезонов.

Существуют различные модели для расчета излучения областей лесов Амазонки. Наиболее развитая из них (Brown, Ruf, 2005) позволяет рассчитывать значения радиоярковых температур в зависимости от частоты, дня, месяца и времени суток. Данная модель была построена на основе экспериментальных данных для сантиметрового диапазона. К сожалению, ее формальное применение для L-диапазона дает явно завышенные значения радиоярковых температур, превышающие 300 К.

Экспериментальные данные для выбранных нами типов природных объектов, полученные в ходе экспериментов с радиометрами L-диапазона Aquarius и SMOS, заметно отличаются между собой, но показывают достаточно высокую стабильность значений. В табл. 2 приведены характерные значения радиоярковых температур для трех типов природных объектов по результатам спутниковых измерений Aquarius и SMOS (Pablos et al., 2014).

Нами для калибровки были выбраны значения, близкие к результатам Aquarius, поскольку данный прибор обеспечивает более высокую точность измерений.

Несмотря на то, что для решения уравнения с тремя неизвестными достаточно иметь 3 измерения с различными значениями радиоярковых температур, точность оценки ис-

комых параметров существенно зависит от их выбора. Опыт калибровки по формуле (4) показал, что оценки коэффициента полезного действия антенн  $\eta$  в данном случае получаются очень неустойчивыми, а вследствие этого и оценки основных калибровочных коэффициентов  $a$  и  $b$  получаются тоже с большими погрешностями. Для решения задачи калибровки нами был выбран несколько иной подход, позволивший разделить переменные и тем самым достичь более высокой точности калибровки.

Таблица 2. Характерные значения радиоярких температур трех типов природных объектов по результатам спутниковых измерений радиометрами L-диапазона Aquarius и SMOS (Pablos et al., 2014)

	<i>Aquarius</i> (угол наблюдения $\sim 30^\circ$ )	<i>SMOS</i>
Леса Амазонки	280÷285 К	270÷276 К
Южная часть Тихого океана	98÷99,5 К	96÷98 К
Антарктида (Dome-C)	202÷204 К	198÷199 К

Для оценок потерь в антенно-фидерном тракте использовалось следующее свойство излучения морской поверхности в L-диапазоне: ее радиояркая температура почти не зависит от термодинамической температуры поверхности. При этом можно выбрать такие участки морской поверхности, в которых радиояркие температуры меняются слабо и измеренный сигнал практически не должен меняться, если нет изменений вклада теплового излучения антенно-фидерного тракта. В этом случае можно оценить именно последний вклад и, соответственно, коэффициент  $\eta$ . Пример результатов измерений, использовавшихся для описанных оценок, приведен на *рис. 3*.

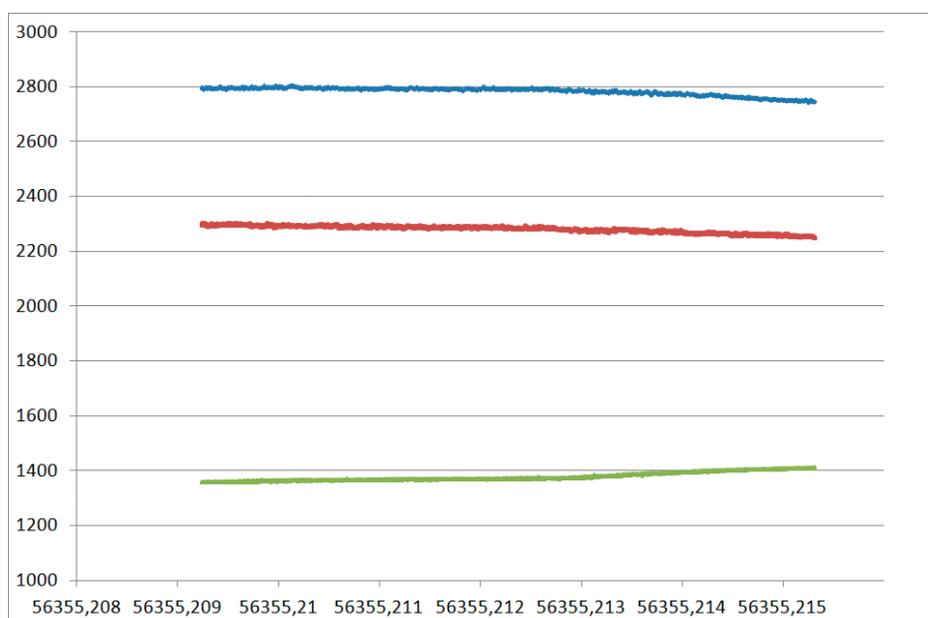


Рис. 3. Фрагмент записи сигналов в условных единицах АЦП от двух лучей антенны (синяя и красная линии) и датчика температуры, расположенного на антенне (зеленая линия)

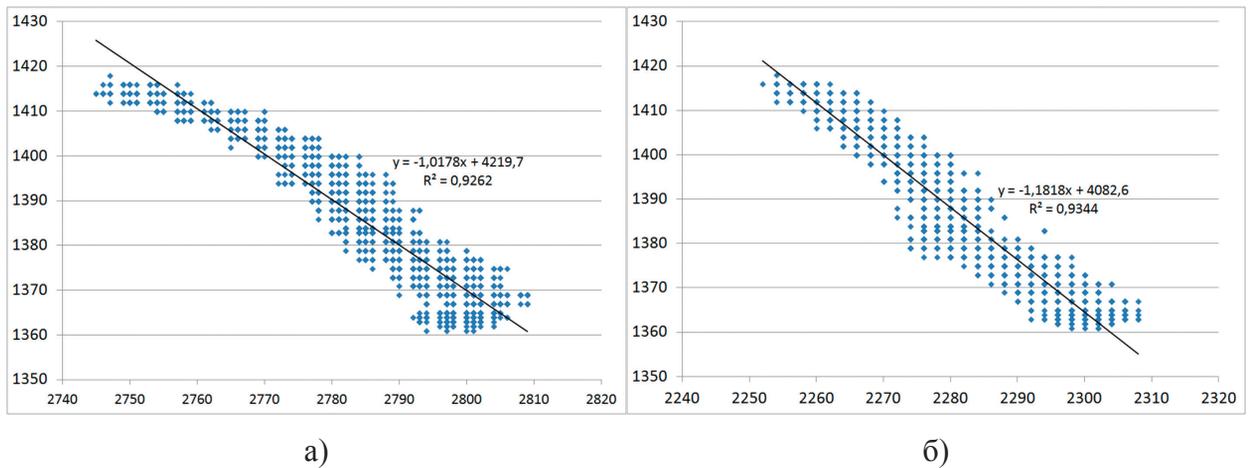


Рис. 4. Диаграммы рассеяния, характеризующие взаимосвязь между выходными сигналами радиометра и показаниями датчика температуры антенны при измерениях над морской поверхностью (а – для первого, б – второго лучей, данные рис. 3)

Для иллюстрации существования взаимосвязи показаний измеренного сигнала и температуры антенны на рис. 4 представлены соответствующие диаграммы рассеяния при измерениях над морской поверхностью. Каждая точка на диаграмме отражает численные значения измеренных величин в условных единицах АЦП. Уравнение линейной регрессии позволяет вычислить коэффициент взаимосвязи между ними и тем самым получить оценку коэффициента полезного действия антенны.

На рис. 5 приведен пример калибровочного сеанса, в котором температура антенны менялась не более чем на 1 К. В этом случае коэффициент полезного действия антенны  $\eta$  можно считать известным по методике описанной выше и определять только коэффициенты  $a$  и  $b$ . На рис. 6 приведены результаты калибровки по трем калибровочным уровням (вода, лед, суша). Для целей калибровки выбирались только участки Антарктиды, покрытые материковыми льдами.

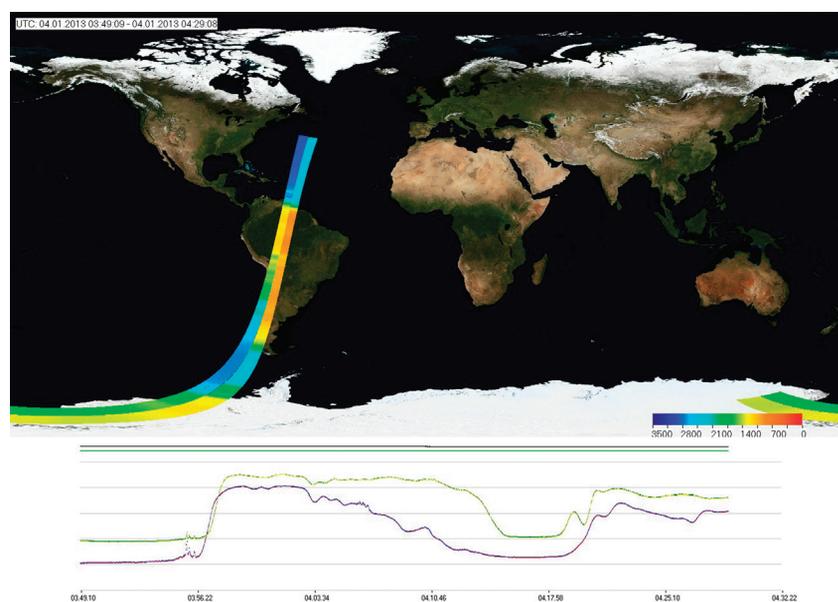


Рис. 5. Калибровочный сеанс измерений за 04.01.20013 г. (вверху – измеренные сигналы в виде изображения, внизу – график измеренных сигналов для двух лучей)

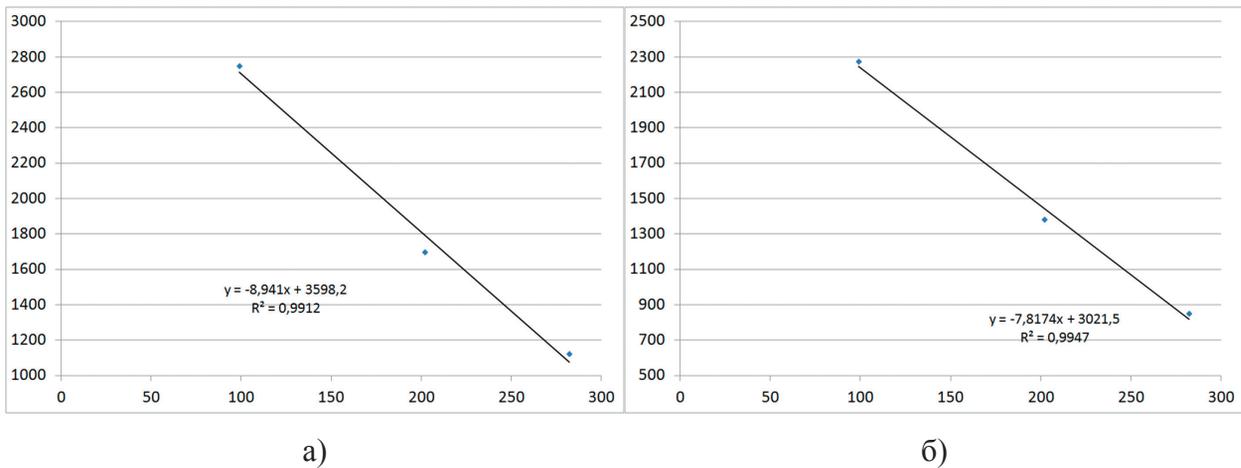


Рис. 6. Регрессионные прямые связи измеренных сигналов и расчетных значений радиоярких температур

Хотя для решения задачи в этом случае достаточно двух разных значений радиоярких температур, надежность калибровки по нескольким уровням получается выше. В частности, при использовании трех и более уровней можно оценить коэффициент детерминации искомой регрессионной зависимости или другие статистические параметры. В приведенном примере коэффициент детерминации достигает 0,99.

### Анализ метрических характеристик и искажений сигналов

Традиционно основной метрической характеристикой радиометра считается его флуктуационная чувствительность. Однако практика обработки данных показывает, что этот параметр не является ключевым для решения целевой задачи определения параметров океана и суши, поскольку для ее решения требуются достаточно длительные измерения. В этом случае основной проблемой становится стабильность всех характеристик радиометрической системы. Если вклад температуры антенны может быть в большой степени учтен, то влияние ряда внешних факторов остается недостаточно исследованным.

Оценка флуктуационной чувствительности радиометра производилась по результатам измерений радиоярких температур над однородной морской поверхностью. В качестве величины флуктуационной чувствительности использовались оценки среднеквадратичных вариаций сигнала на заданном интервале времени порядка 10–20 сек. Оценки значений флуктуационной чувствительности при рабочей постоянной времени 0,1 сек составили 0,41 К для первого луча и 0,35 К для второго. При интегрировании сигналов в пересчете на 1 сек эффективная чувствительность радиометров возрастает до 0,1–0,2 К.

Анализ результатов измерений показал, что характеристики приемников и антенн достаточно стабильны. За все время работы прибора значения калибровочных коэффициентов не изменились и обеспечивали оценочную точность измерений абсолютных значений радиоярких температур в 1–3 К.

В этом случае особенно важное значение имеют различные внешние воздействия, оказывающие существенное влияние на качество и точность измерений. К таким воздействиям относятся различные активные средства радиолокации и радиосвязи, а также естественные источники излучения космического происхождения, включая Солнце и галактическое излучение.

В настоящее время разработано множество методов и алгоритмов обнаружения помех в радиометрических сигналах. Сравнительный анализ наиболее качественных методов обнаружения радиочастотных помех проведен в (Misra, 2009). Алгоритм обнаружения импульса работает по принципу простой пороговой обработки радиометрических данных. Эта методика требует высокой скорости интегрирования и короткого интервала усреднения, чтобы оптимально выявлять и удалять короткие радароподобные импульсы. Алгоритм анализа коэффициента эксцесса измеренного сигнала основан на предположении о гауссовой статистике входного теплового сигнала. При наличии излучений нетеплового характера значение коэффициента эксцесса отличается от 3. Результаты анализа используемых алгоритмов обнаружения помех показали, что алгоритм обнаружения импульсов имеет очень высокое качество, когда длительность выборки для анализа согласована с длительностью импульса помехи. Наилучшие результаты получаются при использовании этого алгоритма для импульсов малой скважности. Когда возможно увеличить длительность выборки, алгоритм анализа коэффициента эксцесса работает лучше, при этом обеспечивая более надежное обнаружение при работе с помехами переменной скважности и мощности. Оптимальным является сочетание этих методов в зависимости от внешних условий. В данной работе для выделения импульсных помех использовался алгоритм анализа коэффициента эксцесса.

Наряду с внешними помехами, носящими локальный характер, в измеренных сигналах наблюдались длительные, плавные изменения. На *рис. 7* приведен пример результатов работы без визуально идентифицируемых длительных внешних воздействий, а на *рис. 8* – при их наличии. Автоматизированное выделение таких помех представляет большую трудность.

Визуальный анализ характера наблюдаемых вариаций выходных сигналов показал, что в одном из каналов радиометра он не может быть объяснен внутренними изменениями характеристик прибора. При этом в первом канале такие изменения сигнала наблюдаются гораздо реже и в меньшей степени.

Одна из основных гипотез состояла в том, что это может быть внешнее излучение естественных источников. При этом возможен либо солнечный нагрев одной из сторон антенны (последний член уравнения (3)), либо попадание излучения Солнца в боковые лепестки диаграммы направленности антенны (третий член уравнения (3)). Для ее проверки был проведен анализ взаимного расположения космического аппарата и различных объектов, включая положение Земли и Солнца во время измерений. Подробный анализ условий съемки показал, что влияние Солнца не может быть таким мешающим фактором, поскольку даже при работе аппаратуры полностью в тени Земли наблюдались длительные

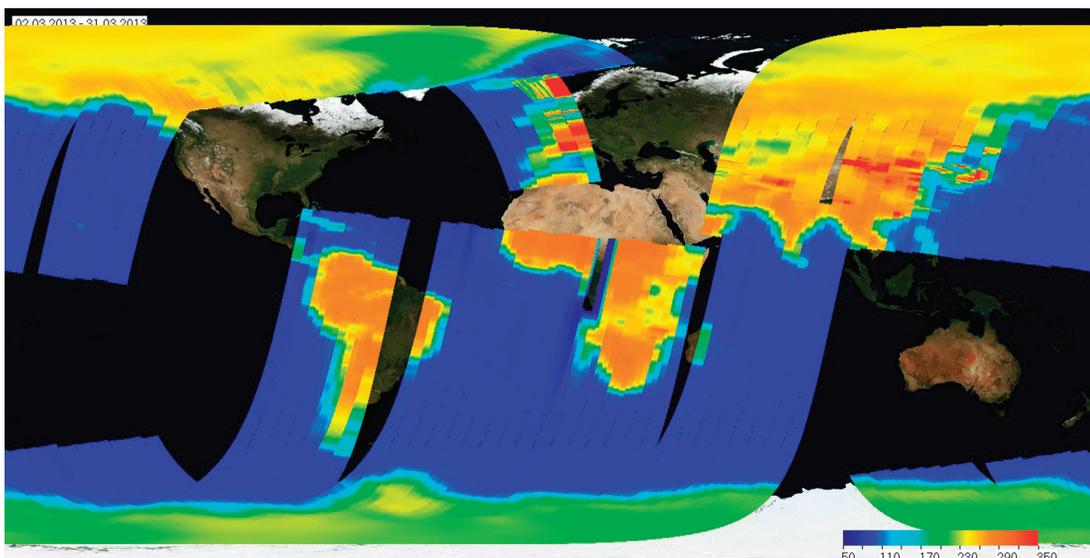


Рис. 7. Результаты измерений радиоярких температур Земли, полученных при помощи «Зонд-ПП» за март 2013 г.

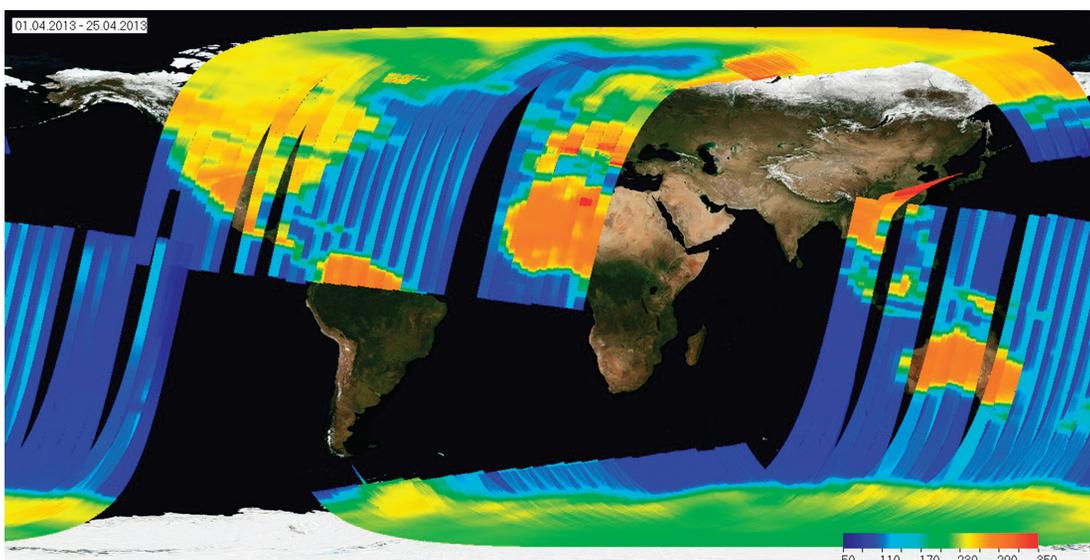


Рис. 8. Результаты измерений радиоярких температур Земли, полученных при помощи «Зонд-ПП» за апрель 2013 г.

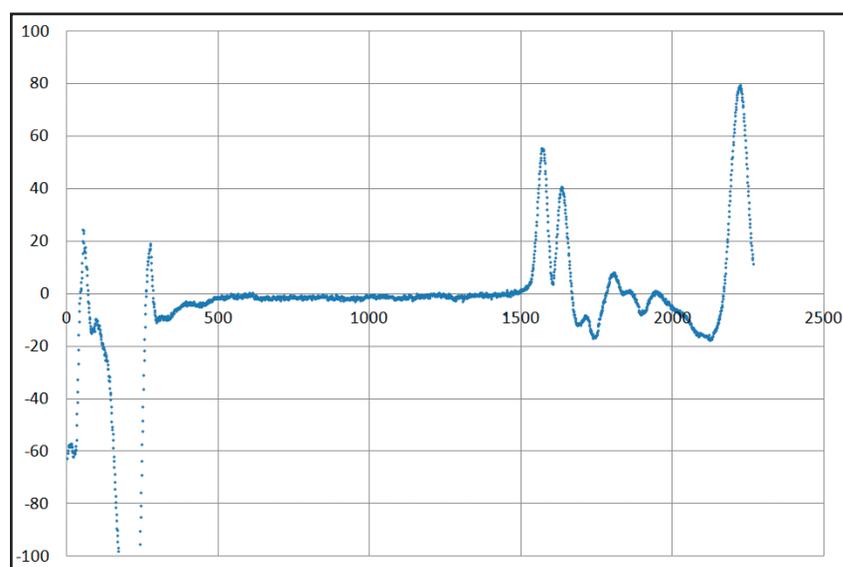
(от нескольких минут до длительности всего сеанса измерений) повышения уровня сигнала в одном из лучей радиометра.

Для объективного выделения наблюдаемых искажений измеренного сигнала можно использовать информацию о разности радиоярких температур между двумя лучами  $\Delta T_{bd} = T_{b1} - T_{b2}$  и их отличия в каждом луче от соответствующих модельных расчетов  $\Delta T_{dmi} = T_{bi} - T_{bi}^m$  для областей Земли, где модельные значения могут быть получены по независимым данным.

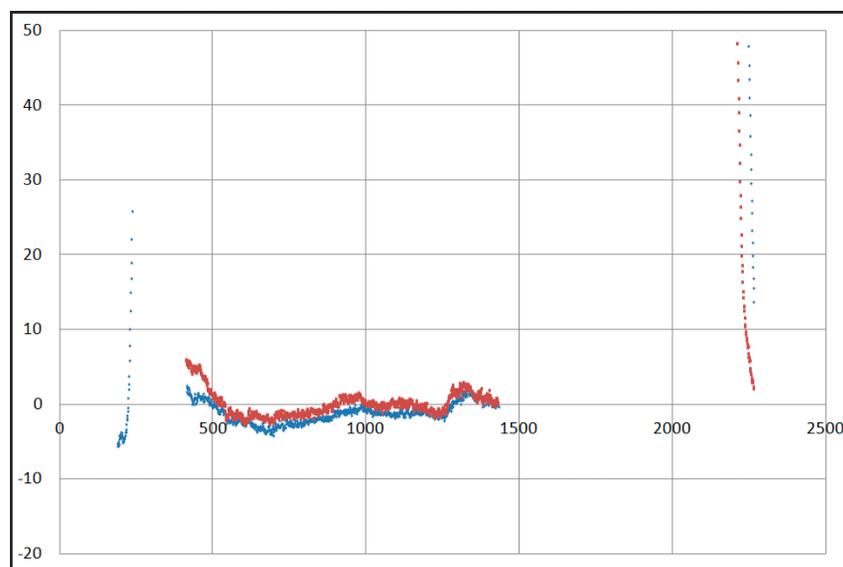
На рис. 9 приведен пример указанных разностей при работе радиометрической системы в отсутствии внешних воздействий. В этом случае разности радиоярких температур как между каналами, так и между модельными значениями и результатами измерений над однородными поверхностями близки к 0. Максимальные разности  $\Delta T_{bd}$  наблюдаются

в тех случаях, когда в поля зрения лучей попадают различные контрастные объекты, т.е. в основном в переходных областях «суша–море» при косом пересечении береговой линии.

Если априорно выделить однородные области, исключив переходные области, то превышение разности  $\Delta T_{bd}$  заданного порога может служить признаком наличия внешних воздействий в одном из лучей. Величина порога определяется эмпирически по результатам анализа полученных данных и оценок естественных вариаций радиояркостных температур. При наличии внешних воздействий сразу в двух лучах, необходимо дополнительно установить порог разности  $\Delta T_{dmi}$ . Комбинация двух условий превышения порогов может служить критерием качества информации для длительных возмущений, но мало-пригодна для выделения локальных воздействий.



а)



б)

Рис. 9. Разности радиояркостных температур между двумя лучами  $\Delta T_{bd}$  (а) и между измеренными и модельными расчетами  $\Delta T_{dmi}$  (б) при отсутствии внешних воздействий

Полностью формализовать процедуру выделения сигналов с внешними воздействиями не удастся, поскольку требуется знание большого количества дополнительной географической и иной информации, но анализ таких графиков позволяет интерактивно сформировать флаги качества информации для дальнейшей обработки. Так, фрагменты измерений, помеченные флагом внешних воздействий, исключаются из рассмотрения.

### Заключение

Проведенный эксперимент на малом космическом аппарате с использованием СВЧ радиометрического прибора L-диапазона «Зонд-ПП» позволил отработать методические вопросы измерений и обработки информации в реальных условиях.

При калибровке и обработке информации важное значение имеет учет влияния вариаций температуры антенно-фидерного тракта. Наличие температурных датчиков на антенной системе прибора позволяет в значительной степени учесть этот фактор, но требует специальных алгоритмов для оценки потерь.

Анализ условий съемки показал, что излучение Солнца и галактики не может быть причиной наблюдаемых вариаций выходного сигнала в одном из лучей радиометра.

Для обработки данных были разработаны специальные программные инструменты, которые могут быть использованы для обработки информации других экспериментов. Все полученные данные архивированы и могут быть использованы для дальнейшей обработки с учетом выявленных искажений выходных сигналов.

### Литература

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты: М.: Наука, 1974. 187 с.
2. 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.
3. Смирнов М.Т., Ермаков Д.М., Маклаков С.М., Халдин А.А., Максимов А.Е. Эксперимент по дистанционному СВЧ радиометрическому зондированию Земли в L-диапазоне с малого космического аппарата, первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 142–149.
4. Brown S.T., Ruf C.S. Determination of an Amazon Hot Reference Target for the On-Orbit Calibration of Microwave Radiometers // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2005. Vol. 22. P. 1340–1352.
5. Camps A., Corbella I., Vall-llossera M., Duffo N., Torres F., Villarino R., Enrique L., Miranda J., Julbé F., Font J., Julià A., Gabarró C., Etcheto J., Boutin J., Weill A., Caselles V., Rubio E., Wursteisen P., Berger M., Martín-Neira M. L-band sea surface emissivity: Preliminary results of the WISE-2000 campaign and its application to salinity retrieval in the SMOS mission // Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 4. P. 8071–8079.
6. Klein L., Swift C. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1977. Vol. 25. No. 1. P. 104–111.
7. Macelloni G., Brogioni M., Pettinato S., Zasso R., Crepaz A., Zaccaria J., Padovan B., Drinkwater M. Ground-Based L-Band Emission Measurements at Dome-C Antarctica: The DOMEX-2 Variability // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2013. Vol. 51. No. 9. P. 4718–4730.
8. Misra S., Mohammed P.N., Güner B., Ruf Ch.S., Piepmeier J.R., Johnson J.T. Microwave Radiometer Radio-Frequency Interference Detection Algorithms: A Comparative Study // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47. No. 11. P. 3742–3754.
9. Pablos M., Piles M., González-Gambau V., Vall-llossera M., Camps A., Martínez J. SMOS and Aquarius Radiometers: Inter-Comparison Over Selected Targets // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2014. Vol. 7. No. 9. P. 3833–3844.

# Analysis of measuring capabilities and empirical model of instrumental distortions of ZOND-PP satellite microwave L-band radiometric instrument for calibration and data processing

M.T. Smirnov

*Fryazino Department of V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS  
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia  
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru*

The method of analysis of measuring capabilities of L-band microwave radiometer ZOND-PP and the allocation and correction of interference that affect the measurements are presented. An experiment with the radiometer was performed on small spacecraft MKA FKI No. 1 in 2012–13. It has stressed the need for precise calibration of the output signals of microwave radiometer and assessment of its operation stability in space. To improve the retrieval accuracy of geophysical parameters an algorithm is proposed for the measurements calibration taking into account variations in temperature of the antenna of the radiometric system. The estimates of the fluctuation sensitivity of the radiometer are made. It has been shown that significant impact on the accuracy of measurements provided the means of radar and radio communications, as well as extraterrestrial sources of radiation: the Sun and the Galaxy. Along with external interference which had local character and was dependent on the position of the satellite in orbit, the measured signals were sometimes distorted by long gradual changes. This, in its turn, proposed the model of measurement that takes into account the main factors influencing the signal of the radiometer. The analysis of the possible causes of the observed variations of the output signal in one of the channels of microwave radiometric system is made. The method of allocation of the measured signals distorted by external interference based on the use of a priori information and model calculations is proposed.

**Keywords:** passive microwave remote sensing, L-band, algorithms, methods, satellites

*Accepted: 16.09.2016  
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-273-285*

## References

1. Basharinov A.E., Gurvich A.S., Egorov S.T., *Radioizluchenie Zemli kak planety* (The radio emission of the Earth as a planet), Moscow: Nauka, 1974, 187 p.
2. Smirnov M.T., Khaldin A.A., *Predvaritel'nye rezul'taty eksperimentov s SVCh radiometricheskim kompleksom L-diapazona na RS MKS* (Analysis of passive microwave L-band data obtained in experiment on RS ISS), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 160–166.
3. Smirnov M.T., Ermakov D.M., Maklakov S.M., Khaldin A.A., Maksimov A.E., *Eksperiment po distantsionnomu SVCh radiometricheskomu zondirovaniyu Zemli v L-diapazone s malogo kosmicheskogo apparata, pervye rezul'taty* (Experiment in passive microwave remote sensing of the Earth in the L-band with small satellite, the first results), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 142–149.
4. Brown S.T., Ruf C.S., Determination of an Amazon Hot Reference Target for the On-Orbit Calibration of Microwave Radiometers, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, Vol. 22, pp. 1340–1352.
5. Camps A., Corbella I., Vall-llossera M., Duffo N., Torres F., Villarino R., Enrique L., Miranda J., Julbé F., Font J., Julià A., Gabarró C., Etcheto J., Boutin J., Weill A., Caselles V., Rubio E., Wursteisen P., Berger M., Martín-Neira M., L-band sea surface emissivity: Preliminary results of the WISE-2000 campaign and its application to salinity retrieval in the SMOS mission, *Radio Science*, 2003, Vol. 38, No. 4, pp. 8071–8079.
6. Klein L., Swift C., An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, Vol. 25, No. 1, pp. 104–111.
7. Macelloni G., Brogioni M., Pettinato S., Zasso R., Crepaz A., Zaccaria J., Padovan B., Drinkwater M., Ground-Based L-Band Emission Measurements at Dome-C Antarctica: The DOMEX-2 Variability, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 9, pp. 4718–4730.
8. Misra S., Mohammed P.N., Güner B., Ruf Ch.S., Piepmeier J.R., Johnson J.T., Microwave Radiometer Radio-Frequency Interference Detection Algorithms: A Comparative Study, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, No. 11, pp. 3742–3754.
9. Pablos M., Piles M., González-Gambau V., Vall-llossera M., Camps A., Martínez J., SMOS and Aquarius Radiometers: Inter-Comparison Over Selected Targets, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, Vol. 7, No. 9, pp. 3833–3844.