Особенности обработки данных SMOS Level 1С в задачах дистанционного зондирования

А.С. Ященко, П.П. Бобров

Омский государственный педагогический университет, Омск, 644099, Россия E-mail: x rays1@mail.ru

В работе обсуждаются общие принципы работы 2-D интерферометрического радиометра MIRAS (1,4 ГГц) спутника SMOS; целью миссии является дистанционное определение влажности почв и солености океана. Радиометр MIRAS производит измерения при углах зондирования от 10° до 65°, он обладает более высокой по сравнению с аналогами разрешающей способностью. Данные о влажности почв приводятся в файле SMOS Level 2. Радиометрические данные, которые используются при дистанционном определении влажности почв, – в файле SMOS Level 1C. При интерпретации данных дистанционного зондирования возникают трудности, обусловленные специфическими особенностями радиометра MIRAS. Первая – это зависимость размеров участка поверхности, соответствующего пикселю радиометрического снимка, от азимутального угла зондирования. Вторая – это несовпадение двух ортогональных плоскостей поляризации ($H \ V$) излучения, принимаемого MIRAS, с соответствующими плоскостями поляризации излучения у поверхности Земли. В работе описана процедура угловой съемки и процедура формирования радиометрического снимка. Рассмотрены структура файла SMOS Level 1C и процедура извлечения данных из файла. В статье даны рекомендации по обработке данных этого файла. Приведены примеры типичных ошибок, встречающихся в данных SMOS Level 1C.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, программа SMOS ESA, влажность почв

Одобрена к печати: 16.05.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-78-91

Введение

Оценка таких параметров, как влажность почв, влагосодержание снега, количество запасённой в облаках влаги и выпавших осадков, может быть осуществлена с удовлетворительной точностью лишь с помощью данных спутниковых микроволновых радиометров. По ряду причин радиометрические данные L-диапазона являются наиболее подходящими для восстановления влажности поверхностного слоя почв. Программы глобального мониторинга влажности почв инициируются зарубежными космическими агентствами (NASA, ESA, JAXA и др.). Эти же организации курируют процесс разработки, тестирования и валидации алгоритмов. Точность восстановления влажности во многом определяется корректностью используемых в алгоритме радиационных моделей почв, а также наличием достоверной априорной информации о состоянии поверхности.

На данный момент на орбите функционируют два КА с микроволновыми радиометрами L-диапазона (1,4 ГГц) на борту. Это аппарат Европейского космического агентства SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) (Kerr et al., 2010) и аппарат NASA SMAP (Soil Moisture Active and Passive) (Entekhabi et al., 2010). Также функционирует аппарат Японского космического агентства GCOM-W1 с радиометром, имеющим 6 частотных каналов от 6,9 ГГц до 89 ГГц. На борту спутника SMOS установлен 2-D интерферометрический радиометр MIRAS. В отличие от радиометров аппаратов SMAP и GCOM-W1, работающих в режиме конического сканирования под фиксированным углом зондирования (θ), SMOS углами. Такой режим работы позволяет увеличить объём радиометрических данных, получаемых для данного участка поверхности почти одномоментно, а следовательно, повысить точность восстановления влажности. Кроме того, аппарат SMOS имеет более высокое по сравнению со спутником SMAP разрешение. Данные о влажности, рассчитанные по внутренним алгоритмам SMOS, приводятся в файле SMOS Level 2. Однако для решения ряда задач дистанционного зондирования необходимо иметь информацию о T_B поверхности. В силу особенностей функционирования MIRAS такое возможно лишь после выполнения ряда обязательных подготовительных процедур, описанных ниже.

Доступ к архивам радиометрических данных является либо полностью открытым (SMAP и GCOM-W1), либо предоставляется после предварительного согласования с кураторами программы мониторинга поверхности (SMOS). Архивы данных хранятся на серверах космических агентств NASA, JAXA и ESA для спутников SMAP, GCOM-W1 и SMOS соответственно.

1. Особенности радиометра MIRAS и структуры данных в файле SMOS Level 1С

Антенна радиометра MIRAS представляет собой три вытянутых прямоугольных лепестка, на которых расположены 69 приёмных элементов. Лепестки расположены в одной плоскости под углом 120° относительно друг друга. Такая конструкция позволяет реализовать 2-D съёмку T_в поверхности на вертикальной (V), горизонтальной (H) и кросс-поляризации (HV) (Kerr et al., 2010; http://smos.com.pt/project docs.html). Подобный режим работы позволяет определить в результате измерений четыре параметра Стокса. Приём на кросс-поляризации организован следующим образом: два лепестка антенны ведут приём на одной поляризации (V или H), третий лепесток – на ортогональной поляризации. Порядок следования режимов приёма MIRAS следующий: $(H)_1 \rightarrow (H + HV)_2 \rightarrow (V)_3 \rightarrow (V + HV)_4 \rightarrow (H)_5 \rightarrow$ и т. д. Подстрочными индексами обозначена последовательность измерений. Время, отводимое на каждый режим работы, составляет 1,2 с. В комбинированном режиме, например H + HV, ведётся одновременный приём на *H*- и *HV*-поляризациях. Погрешность измерения T_{RH} или T_{RV} зависит от того, в каком режиме съёмки были получены данные. Так, погрешность измерения T_{RH} в режиме H примерно в два раза меньше, чем в режиме H + HV. Отметим, что плоскость поляризации определяется относительно плоскости антенны и не совпадает с таковой относительно поверхности Земли. Нормаль к плоскости, в которой расположены лепестки антенны, составляет угол $\gamma = 32^{\circ}$ с вектором, направленным от спутника в надир. При этом вектор нормали, вектор, направленный в надир, и линия трассы полёта спутника на поверхности Земли лежат в одной плоскости (рис. 1).

Радиометр MIRAS имеет очень широкое поле зрения. Так, исходный снимок SMOS Level 1А включает данные для направлений приёма, которые лежат выше плоскости, перпендикулярной направлению в надир и расположенной на высоте полёта спутника

(direct sky), т. е. содержит информацию о радиоизлучении космического пространства. Кроме того, в процессе формирования радиометрического снимка по данным MIRAS создаётся семь изображений, соответствующих одному и тому же участку поверхности. Одно из них, расположенное в центре, является истинным, а шесть оставшихся, которые его окружают, являются ложными копиями, называемыми alias или replicas. В отечественной литературе по оптике подобные копии называются духами. Истинное изображение и alias частично накладываются друг на друга (область снимка alias overlapping). После удаления данных direct sky, alias и alias overlapping из исходного снимка выделяется область AF-FOV (Alias Free Field of View). Данные о T_{Bp} (p – индекс поляризации), относящиеся к области AF-FOV, имеют наименьшую погрешность измерения. Участок поверхности Земли, ограниченный областью AF-FOV, невелик. По этой причине область AF-FOV расширяют до размеров области EAF-FOV (Extended Alias Free Field of View), захватывающей большую площадь поверхности (puc. 2a) (McMullan et al., 2008). Однако EAF-FOV частично включает в себя область alias overlapping. Это приводит к тому, что погрешность определения T_{во} вблизи края EAF-FOV выше, чем в его центральной части



Рис. 1. Схематическое изображение спутника SMOS на орбите. Серым цветом показаны лепестки антенны. XOY – система координат относительно плоскости антенны. Пунктирная линия – направление приёма излучения в данный момент времени

Файл данных SMOS Level 1С представляет собой продукт, созданный путём объединения отдельных снимков, ограниченных EAF-FOV, полученных за время пролёта спутника от одного географического полюса к другому. Снимки, несущие информацию о состоянии суши, имеют в своём названии аббревиатуру SCLF1C, о состоянии водной поверхности – аббревиатуру SCSF1C. Так же формируются снимки с данными, соответствующими фиксированному углу зондирования $\theta = 42,5^{\circ}$. Такие файлы имеют в названии аббревиатуру BWLF1C и BWSF1C для суши и водной поверхности соответственно. Зачастую в процессе анализа используются именно эти файлы данных, поскольку ширина полосы захвата для $\theta = 42,5^{\circ}$ имеет максимальное значение (*puc 2a, 26*). При использовании данных $T_{B\rho}$ для этого угла зондирования необходимо помнить, что они могут находиться как в области AF-FOV, так и вблизи края EAF-FOV, т. е. иметь разную точность измерения. Пиксели снимков SMOS Level 1C привязаны к координатной проекции ISEA 4H9 Grid. Каждый узел этой проекции, называемый DGG (Discrete Global Grid), имеет уникальный номер (ID) и фиксированные координаты, ему соответствующие (Talone et al., 2015). Диапазон значений θ , для которых в файле SMOS Level 1C приведены данные о T_B , определяется тем, в какие части EAF-FOV попадает участок поверхности с конкретным ID в процессе пролёта SMOS (*puc 26*). Как можно видеть из данных, приведённых на *puc. 2*, для участков 1 и 2 диапазон значений θ будет составлять 40° ÷ 45° и 15° ÷ 65°, соответственно. При этом большая часть данных для участка 2 будет относиться к AF-FOV. Очевидно, что большему диапазону θ соответствует большее число измерений T_B .



Рис. 2а. Контур радиометрического снимка SMOS Level IC. Чёрный непрерывный контур – EAF-FOV, Пунктирный непрерывный контур – AF-FOV. Штриховые линии – изолинии для соответствующих углов зондирования. Черные эллипсы – характерный размер пикселя радиометрического снимка для данного θ

Рис. 26. Перемещение двух участков земной поверхности относительно области EAF-FOV в процессе пролёта спутника. Диапазон значений углов θ будет составлять 40°÷45° для первого участка и 15°÷65° для второго

При генерации продукта SMOS Level 1С (https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/ SMOS_L1c-Data-Processing-Models) восстанавливается размер территории, соответствующий пикселю радиометрического снимка (footprint в принятой за рубежом терминологии). Форма footprint – эллипс. Под разрешением снимка SMOS Level 1С понимается длина большой оси этого эллипса. Пространственная ориентация эллипса определяется азимутальным углом зондирования (ω) (*puc. 1*). Это угол между большой осью эллипса (направлением на точку подспутникового надира) и направлением юг-север. Отсчёт угла ω ведётся по часовой стрелке от направления на север (*puc. 3a, б*). Вследствие перемещения участка поверхности в пределах EAF-FOV и изменения азимутального угла разрешение снимка MIRAS не является постоянной величиной. Наилучшее разрешение достигается при зондировании в надир и составляет 32 км, наихудшее – при $\theta = 65^{\circ}$ и составляет 110 км. Следовательно, размер и пространственная ориентация территории «footprint» не остаются неизменными. По этой причине проводить сравнение данных о T_{Bp} , полученных для участка поверхности, соответствующего одному и тому же ID DGG, при значительно различающихся θ или ω не вполне корректно.



Рис. 3. Изменение азимутального угла съёмки участка поверхности с постоянным ID DGG в процессе пролёта спутника SMOS: а) азимутальный угол 175°; б) азимутальный угол 220°. Серые овалы – территории, излучающие в пиксель радиометрического снимка, при данных значениях угла зондирования и азимутального угла. Черная извилистая линия – граница России и Казахстана. Под «направлением на спутник» понимается направление на точку подспутникового надира

Данные, полученные радиометром MIRAS на *p*-поляризации и находящиеся в файле SMOS Level 1С для какого-либо ID DGG, не равны собственным значениям T_{Bp} этого же участка. Причинами этого являются влияние атмосферы и магнитного поля Земли (поглощение и собственное излучение, эффект Фарадея) и особенности съёмки MIRAS. Ослабление излучения поверхности Земли атмосферой и её собственный вклад в излучение, принимаемое радиометром в L-диапазоне, малы и не превышают для T_B нескольких кельвин в умеренных широтах. Лишь в некоторых случаях, например при выпадении обильных осадков, влияние атмосферы может быть более существенным (Lannoy et al., 2015). Эффект Фарадея заключается в повороте плоскости поляризации электромагнитной волны на угол φ при её распространении в магнитном поле. Значения углов φ , приведённые в файлах данных SMOS Level 1С, составляет единицы градусов. Тем не менее, значение φ используется при обработке данных SMOS Level 1С.

Основной причиной различий в T_{Bp} является несовпадение положений плоскостей поляризации, излучаемых участками поверхности и принимаемых спутником.

Приём излучения MIRAS осуществляется в плоскости, образованной векторами *OY* и направлением приёма излучения (*Y*-поляризация, «вертикальная» относительно антенны радиометра), а также в плоскости, ортогональной ей (*X*-поляризация, «горизонтальная» относительно антенны радиометра) (*puc. 1*). Нетрудно понять, что эти плоскости образуют некоторый угол ψ (geometric rotation angles) с плоскостями *V*- и *H*-поляризации у поверхности Земли. Значение ψ в большей степени определяется значением ω .

При описании файлов SMOS Level 1С данные, относящиеся к X- и Y-поляризациям, в некоторых случаях указываются как H и V. К какому типу поляризации относятся эти данные, можно понять только из сопутствующей документации. Для пересчёта данных SMOS из X- и Y-поляризаций в значения, соответствующие H- и V-поляризациям относительно поверхности Земли, используется следующее выражение (Martin-Neira, Ribo, Martin-Polegre, 2002):

$$\begin{bmatrix} T_{BH} \\ T_{BV} \\ T_{B3} \\ T_{B4} \end{bmatrix}_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos^{2}(\alpha) & \sin^{2}(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & 0 \\ \sin^{2}(\alpha) & \cos^{2}(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(2\alpha) & -\sin(2\alpha) & \cos(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{\theta}^{-1} \begin{bmatrix} T_{BX} \\ T_{BY} \\ 2\operatorname{Re}(T_{B}) \\ 2\operatorname{Im}(T_{B}) \end{bmatrix}_{\theta}, \quad (1)$$

где T_{BH} , T_{BV} – радиояркостная температура на H- и V-поляризации соответственно; T_3 , T_4 – третий и четвёртый параметр Стокса, соответственно; T_{BX} , T_{BY} – радиояркостная температура на X- и Y-поляризации соответственно; $\operatorname{Re}(T_B)$, $\operatorname{Im}(T_B)$ – действительная и мнимая часть T_B , принятая в режиме кросс-поляризации; $\alpha = \varphi + \psi$. Наибольшие отличия между значениями T_{BX} , T_{BY} и T_{BH} , T_{BV} наблюдаются для ω , близких к 90° или 270°, что соответствует углу θ , близкому к 42°. Для этих ω значения ψ могут составлять десятки градусов, что существенно превышает φ . Несмотря на то что значения ψ существенно превышают значения φ , влияние эффекта Фарадея учитывается при обработке данных. Значения углов ω , φ и ψ приведены в файле Level 1C. Результаты пересчёта данных SMOS не приводятся.

Таким образом, можно констатировать, что решение обратной задачи дистанционного зондирования с использованием данных SMOS Level 1С без учета особенностей работы 2-D интерферометрического радиометра MIRAS приведёт к ошибочным результатам.

2. Структура организации хранения данных SMOS Level 1С

Основным форматом хранения данных SMOS Level 1С является Earth Explorer format. В настоящий момент существует несколько программных продуктов, с помощью которых можно визуализировать данные в этом формате и проводить их первичную обработку: SMOS Viewer, BEAM VISAT и недавно представленный продукт ESA SNAP, близкий по интерфейсу и функционалу к BEAM. Главным достоинством этих программных продуктов является возможность быстрой визуализации данных для участков поверхности, симметрично расположенных относительно трассы пролёта спутника для $\theta = 42,5^{\circ}$, в пределах EAF-FOV. Кроме того, эти продукты позволяют осуществлять конвертацию данных SMOS Level 1C в более распространённые форматы хранения данных NetCDF, csv и др. Однако процедура конвертации занимает значительный промежуток времени, а информация, полученная в процессе преобразования, требует дополнительной обработки (см. пояснение к *maбл. 1, 2*). Кураторы программы SMOS предоставляют информацию о структуре файлов данных, а также библиотеки скриптов для среды MATLAB, позволяющих обрабатывать данные SMOS Level 1C без предварительной конвертации. Пользователь, обладающий базовой подготовкой программирования в таких средах, как MATLAB, SciLab или C++, при наличии информации о структуре файла может написать необходимую ему процедуру или функцию обработки данных SMOS Level 1C самостоятельно.

Снимок SMOS Level 1С состоит из двух файлов: HDR и DBL. Данные, содержащиеся в файле HDR, являются служебными. Они несут информацию о трассе пролёта спутника, а также о файлах данных, используемых при генерации снимка SMOS Level 1С. Данные о T_{Bp} и сопутствующая информация хранятся в файле DBL. Чтение данных из файла DBL в среде какого-либо компилятора осуществляется, как из обычного бинарного файла. Файл DBL можно разбить на два логических блока:

- перечень снимков, которые использовались при создании файла данных SMOS Level 1C;
- данные о T_{B} .

Файл DBL начинается с записи длиной 4 байта о числе N снимков, использовавшихся при создании файла SMOS Level 1С. Далее следует N блоков длиной 166 байт с данными о каждом из кадров. Из каждого блока для дальнейшей обработки необходимы сведения о номере снимка (Snapshot ID) и времени съёмки общим объёмом 16 байт. Данные о T_B поверхности начинаются после ($N \times 166 + 4$)-го байта с записи длиной 4 байта, которая указывает общее число ID DGG в данном файле. Состав блоков данных, описывающих участок поверхности с определённым ID DGG, приведён в *табл. 1, 2*. Первый блок данных (*табл. 1*) несёт общую информацию об участке поверхности, для которого приведены радиометрические данные.

Наименование поля	Обозначение	Объём, байт
Номер в сетке DGG	ID DGG	4
Широта	Grid Point Latitude	4
Долгота	Grid Point Longitude	4
Высота	Grid Point Altitude	4
Тип поверхности (суша, вода, удалённость от берега)	Grid Point Mask	1
Число блоков данных о T_{B} для ID DGG	BT_Data_Counter	2
Общее количество байт	19	

Таблица 1. Блок данных, описывающих положение участка поверхности

Общее количество измерений T_B для участка поверхности с определённым ID DGG на всех поляризациях и углах зондирования равно значению BT_Data_Counter. Значение BT_Data_Counter не является постоянной величиной и, как уже отмечалось ранее, зависит от того, в какие части снимка, ограниченного EAF-FOV, попадёт участок поверхности в процессе пролёта спутника SMOS. Общий объём блока данных о T_B для участка с определённым ID DGG составляет (BT_Data_Counter·28) байт (см. *табл. 2*).

Наименование поля	Обозначение	Байт
Метка, описывающая тип поляризации и состояние данных	Flags 2	
Действительная часть <i>Т</i> _в	BT Value _Real 4	
Мнимая часть T_{B}	BT Value _Imag 4	
Точность определения T_B	Pixel Accuracy 2	
Угол зондирования	Incidence Angle 2	
Азимутальный угол зондирования	Azimuth Angle 2	
	Faraday rotation	2
Вращение плоскости поляризации	Geometric rotation	2
Номер снимка Snaps		4
Большая полуось пикселя	Footprint Axis 1 2	
Малая полуось пикселя	Бликселя Footprint Axis 2	
Общее количество байт		28

Таблица 2. Блок данных о *T_B* и сопутствующая ей информация для участка с определённым ID DGG

При такой организации хранения данных представляется возможным:

извлечь данные, принадлежащие снимку с известным Snapshot ID (временем съёмки);

– извлечь данные о $T_{\scriptscriptstyle B}$ для участка поверхности с определённым ID DGG для всех θ ;

– извлечь все данные, приведенные в *табл.* 2, относящиеся к определённому θ, для всех интересующих ID DGG вдоль трассы пролёта.

В процессе первоначального анализа данных о T_B наибольшую важность имеет значение Flags. Каждый бит этого двухбайтного числа несёт информацию о 15 параметрах, описывающих данный пиксель кадра. При конвертации данных число Flags, как и все остальные данные, представляется в десятичной системе счисления. Это не позволяет без обратного преобразования в двоичную систему счисления определить такие параметры, как вид поляризации, наличие или отсутствие помех и др.. Наиболее важными для анализа являются биты числа Flags, находящиеся в разрядах, описанных в *табл. 3*. При отсутствии информации, приведённой в *табл. 3*, данные о T_B во многом теряют информативную ценность.

Разряд числа Flag	Значение битов	Смысл	
1,2	00	«Горизонтальная» поляризация (X)	
	01	«Вертикальная» поляризация (Y)	
	01 или 11	Кросс-поляризация (ХҮ)	
7	1	Помеха на Х-поляризации	
	0	Отсутствие помехи на Х-поляризации	
11	1	Пиксель находится в области AF-FOV	
	0	Пиксель находится вне области AF-FOV	
14	1	Вероятность помехи на всех поляризациях	
	0	Отсутствие вероятности помехи на всех поляризациях	
15	1	Помеха на У-поляризации	
	0	Отсутствие помехи на У-поляризации	
16	1	Помехи на всех поляризациях	
	0	Отсутствие помех на всех поляризациях	

Таблица 3. Характеристики пикселя, описываемые значениями битов в соответствующих разрядах двухбайтного числа Flags

3. Процедура извлечения данных из файла SMOS Level 1C и их первичная обработка

Рассмотрим процесс извлечения данных о T_{Bp} из файла DBL. Будем считать, что нас интересует информация о территории, соответствующей одному ID DGG. На первом этапе происходит считывание информации о перечне всех снимков, которые использовались при создании файла SMOS Level 1C, Snapshot ID для данного ID DGG и моментов времени, в которые они были получены. Затем в процессе последовательного чтения данных из файла DBL блоками, длина которых приведена в *табл. 1, 2*, находится начало записи об интересующем ID DGG. Для найденного значения ID DGG считывают и сохраняют все блоки данных о T_B . Как указано в *табл. 1*, число таких блоков будет определяться значением BT_Data_Counter. По значениям двух битов в младших разрядах числа Flags определяется тип поляризации. В результате этих операций для участка с интересующим ID DGG формируется массив RESULT. В его столбцах приведены значения величин, описанных в *табл. 2*, а также имеется столбец со значениями моментов времени, в которые были проведены измерения T_B .

Формула (1) для пересчёта данных из X- и Y-поляризаций в H- и V-поляризяции соответственно предполагает использование данных, полученных под одинаковыми θ . Напомним, что порядок следования режимов приёма MIRAS следующий (с учётом пояснения о понятии вида поляризации для MIRAS):

$$(X)_1 \rightarrow (X + XY)_2 \rightarrow (Y)_3 \rightarrow (Y + XY)_4 \rightarrow (X)_5 \rightarrow (X + XY)_6 \rightarrow (Y)_7 \rightarrow (Y + XY)_8 \rightarrow (X)_9 \dots$$
 и т. д.

Время, отводимое на каждый режим работы, составляет 1,2 с. За это время спутник смещается по орбите и в EAF-FOV попадают новые участки поверхности. Участок поверхности с интересующим ID DGG оказывается в новой области снимка, которой соответствует другой угол зондирования. Нахождение значений T_{Bp} на X-, Y- и XY-поляризациях для всех θ (всех моментов времени), приведённых в массиве RESULT, осуществляется в результате интерполяции данных T_B . Для этого данные $T_B(\theta)$ на соответствующей поляризации объединяются попарно. Например, для приведённой выше последовательности режимов съёмки на X-поляризации объединяются значения $(X)_2$ и $(X)_5$, $(X)_6$ и $(X)_9$ и т. д. Значения T_B на X-поляризации в 3-й и 4-й, 7-й и 8-й моменты времени находятся в предположении о линейном изменении T_B со 2-го по 5-й и с 6-го по 9-й и моменты времени.

На рис. 4 приведён результат пересчёта данных по формуле (1). Как можно видеть из приведённых данных, наибольшие отличия между значениями T_{BX} и T_{BH} , T_{BY} и T_{BV} наблюдаются при приёме излучения в направлении, перпендикулярном направлению полёта. При этом расхождения между значениями Т_в до и после процедуры пересчёта могут значительно превышать заявленную кураторами программы SMOS погрешность измерения радиояркостной температуры. Проведённые ранее исследования показали перспективность совместного использования радиометрических данных SMOS, полученных под несколькими θ , для изучения состояния поверхности почв (Бобров, Миронов, Ященко, 2013; Bobrov, Mironov, Kosolapova, 2012). Отличия в разрешении снимков в диапазоне $\theta = 30^{\circ} \div 55^{\circ}$ не превышают приемлемого уровня. Было установлено, что если диапазон значений θ в $T_{R_n}(\theta)$ заключён в пределах $30^\circ \div 55^\circ$ и интересующий ID DGG находится в AF-FOV для всех θ , то отличия в ω невелики, а их значения близки к 0° или 180°. В этом случае изменение площади территории footprint в указанных пределах θ будет минимальным. Однако даже в этом случае данные, полученные при близких значениях θ , могут заметно отличаться друг от друга, возможно, из-за большой погрешности измерения яркостной температуры в режиме H + HV по сравнению с режимом H.



Рис. 4. Массивы $T_{B_p}(\theta)$ для одного ID DGG, относящегося к территории юга Омской области для двух серий измерений: $\omega \approx 180^{\circ}$ для всего диапазона θ (a), и $\omega \approx 90^{\circ}$ (б). 1, 2 – исходные данные на X- и Y-поляризациях соответственно; 3, 4 – данные на H- и V-поляризациях, найденные с помощью выражения (1)

Данные, извлечённые из файла SMOS Level 1С и прошедшие преобразование из X- и Y- поляризаций в H- и V-поляризации соответственно, могут содержать ошибки. Причиной этого являются либо промышленные радиопомехи, либо аппаратно-программные сбои при формировании снимков. Идентифицировать такие данные о T_B можно либо по значениям бит в одном из разрядов Flags: 7-м, 14-м, 15-м или 16-м (см. *табл. 3*), либо по виду $T_{B_P}(\theta)$. Для подобных зависимостей характерны резкие выбросы и провалы значений T_B на зависимостях $T_{B_P}(\theta)$. В одних случаях значения T_B могут либо превышать значения термодинамической температуры поверхности (более 320 K), либо иметь значения, близкие к T_B открытой воды (*puc. 5a*), в других – иметь значения, не превышающие значения T_B естественных земных покровов (*puc. 56*).



Рис. 5. Зависимость $T_{B_p}(\theta)$ для одного из пикселей радиометрического снимка; а) $T_{B_p}(\theta)$ с аномальными значениями T_B ; б) $T_{B_p}(\theta)$ со значениями, не превышающими значения T_B естественных земных покровов. 1 – отобранные с помощью алгоритма значения T_{BH} ; 2 – аномальные значения T_{BH} ; 3 – значения T_{BH} , лежащие вне диапазона $\theta = 30^{\circ} \div 55^{\circ}$. R^2 – квадрат коэффициента корреляции

Для обнаружения и удаления ошибочных данных мы выполняли следующие действия:

– определение уравнения аппроксимирующего полинома второй степени для $T_{Bn}(\theta)$ в диапазоне $\theta = 30^{\circ} \div 55^{\circ}$;

удаление значений T_{вр}, для которых разница со значениями T_{вр}, рассчитанными с помощью полученного уравнения, наибольшая;

 повторение предыдущих операций в случае, если значение квадрата коэффициента корреляции меньше 0,8.

Примером результата выполнения этих действий могут служить данные, приведённые на *рис. 5б.* Корректность описываемого алгоритма была проверена нами ранее (Бобров, Миронов, Ященко, 2012).

Таким образом, можно утверждать, что предварительная обработка данных SMOS Level 1С требует выполнения ряда обязательных процедур. В случае, если они не будут

выполнены, результаты, полученные в ходе обработки радиометрических данных, могут носить ошибочный характер, в частности, значения Т_в на горизонтальной поляризации будут превышать значения на вертикальной для всех данных при $\omega = 90^{\circ}$ или $\omega = 270^{\circ}$. В реальности подобный эффект превышения T_{вн} над T_{ву} наблюдается лишь для периодически неровной поверхности или поверхности с ярко выраженной анизотропией (Бобров, Миронов, Ященко, 2013). Описанная технология обработки данных использовалась нами при выполнении ряда исследований, результаты которых опубликованы в работах (Бобров, Миронов, Ященко, 2012; Yashchenko, Bobrov, 2016)

Заключение

Рассмотрены особенности функционирования 2D радиометра-интерферометра MIRAS спутника SMOS: съемка угловых зависимостей радиояркостной температуры $T_{B_{R}}(\theta)$ территории вокруг каждого узла координатной проекции ISEA 4H9 Grid производится при разных значениях азимутального угла и разных размерах территории footprint; излучение, принимаемое спутником, представлено на двух ортогональных поляризациях, плоскости которых не совпадают с плоскостями горизонтальной и вертикальной поляризаций относительно поверхности Земли. Показано, что анализ данных, приводимых в файле SMOS Level 1С, в отличие от данных других спутниковых радиометров, невозможен без первичной подготовительной обработки. В работе приведена методика обработки данных и «очистки» от ошибочных значений. В первую очередь требуется проведение пересчёта данных о T_P из X- и Y-поляризаций (относительно плоскости антенны) в H- и V-поляризации (относительно поверхности Земли). Также необходимо провести процедуры фильтрации аномальных данных и сглаживания угловых зависимостей $T_{_{Bn}}(\theta)$. Выполнение этих действий позволяет получить данные, наиболее близкие к собственным значениям $T_{\scriptscriptstyle B}$ соответствующего участка поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ (проект 5.9513.2017/БЧ).

Литература

^{1.} Бобров П.П., Миронов В.Л., А.С. Ященко А.С. Алгоритм восстановления влажности почв по радиояркостной температуре, измеренной спутником SMOS и его сравнение со штатным алгоритмом SMOS // Известия ВУЗов: Физика. 2012. Т. 55. № 8/3. С. 145-148.

<sup>Стия ВУ 30В: ФИЗИКА. 2012. Т. 55. № 8/3. С. 145–148.
2. Бобров П.П., Миронов В.Л., Ященко А.С. Зависимость радиояркостной температуры, измеренной космическим аппаратом SMOS, от азимутального угла зондирования // Вестник СибГАУ. 2013. № 5 (51). С. 12–15.
3. Bobrov P.P., Mironov V.L., Kosolapova L.G., Yashchenko A.S. Comparison of two retrieval soil moisture algorithms on SMOS data // Proceedings of IGARSS'12. Munich. Germany. 2012. P. 1131–1134.
4. Entekhabi D., Njoku E., O'Neill P., Kellogg K.H., Crow W.T., Edelstein W.N., Entin J.K., Goodman S.D., Jackson T.J., Johnson J., Kimball J., Piepmeier J.R., Koster R.D., Martin N., McDonald K.C., Moghaddam M., Moran S., Reichle R., Shi J.C., Spencer M.W., Thurman S.W., Tsang L., Zyl J. The soil moisture active passive (SMAP) mission // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 98. No. 5. P. 704–716.
5. Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J. Escorihuela M -J. Font J. Reul N.</sup>

Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., Font J., Reul N., Gruhier C., Enache Juglea S., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 98. 5. No. 5. P. 666–687.

- Lannoy G.J., Reichle R.H., Peng J., Kerr Y.H., Castro R., Kim E.J., Liu Q. Converting Between SMOS and SMAP Level-1Brightness Temperature Observations Over Nonfrozen Land // IEEE Geoscience and Remote Sensing 6 Letters. 2015. Vol. 12. No. 9. P. 1908–1912.
- Martin-Neira M., Ribo S., Martin-Polegre A.J. Polarimetric mode of MIRAS // IEEE Transactions on Geoscience 7. and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. No. 8. P. 1755–1768. McMullan K.D., Brown M.A., Martin-Neira M., Rits W., Ekholm S., Marti J., Lemanczyk J. SMOS: The Payload
- 8 // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46. No. 3. P. 594-605.
- 9 Talone M., Portabella M., Martínez J., González-Gambau V. About the Optimal Grid for SMOS Level 1C and Level 2 Products // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2015. Vol. 12. No. 8. P. 1630-1634.
- 10. Yashchenko A.S., Bobrov P.P. Impact of the Soil Moisture Distribution in the Top Layer on the Accuracy Moisture Retrieval by Microwave Radiometer Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2016. Vol. 54. No. 9. P. 5239-5246.

The specifics of SMOS Level 1C data processing for remote sensing tasks

A.S. Yashchenko, P.P. Bobrov

Omsk State Pedagogical University, Omsk 644099, Russia *E-mail: x rays1@mail.ru*

This paper discusses the general principles of operation of 2-D interferometric MIRAS radiometer (1.4 GHz) mounted on board of the SMOS satellite. The objective of the SMOS mission is remote retrieval of soil moisture and ocean salinity. MIRAS measures brightness temperature at viewing angles from 10° to 65°, its spatial resolution is higher in comparison to counterparts. The soil moisture data are delivered in SMOS Level 2 file. The radiometric data used in remote retrieval of soil moisture are in SMOS Level 1C file. There are difficulties in interpretation of remote sensing data caused by specific features of the MIRAS radiometer. The first is the dependence of the data pixel size on azimuth angle of sensing. The second is the mismatch of two orthogonal polarization planes (H and V) of the radiation received by MIRAS with the radiation polarization planes at the Earth's surface. The paper describes the procedures of measurement at different sensing angles and formation of a radiometric image. The structure of the SMOS Level 1C file and the method of data extraction from the file are considered. This paper also describes the recommendations for data processing of this file. Examples of common errors in the Level 1C file are presented.

Keywords: Microwave radiometry, SMOS ESA mission, soil moisture.

Accepted: 16.05.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-78-91

References

- Bobrov P.P., Mironov V.L., Yashchenko A.S., Algoritm vosstanovleniya vlazhnosti pochv po radiovarkostnoi 1. temperature, izmerennoi sputnikom SMOS i ego sravnenie so shtatnym algoritmom SMOS (The soil moisture retrieval algorithm by SMOS satellite's radio brightness temperature and his comparison with the SMOS Level 2
- algorithm), *Izvestiya Vuzov. Fizika*, 2012, Vol. 55, No. 8/3, pp. 145–148. Bobrov P.P., Mironov V.L., Yashchenko A.S., Zavisimost' radioyarkostnoi temperatury, izmerennoi sputnikom SMOS, ot azimutalnogo ugla zondirovaniya (Dependence of radiobrightness temperature measured by the SMOS 2
- 3.
- SMOS, of azimutainogo ugia zondirovaniya (Dependence of radioorignmess temperature measured by the SMOS satellite on the azimuth angel), *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 5 (51), pp. 12–15. Bobrov P.P., Mironov V.L., Kosolapova L.G., Yashchenko A.S., Comparison of two retrieval soil moisture algorithms on SMOS data, *Proc. IGARSS'2012*, Munich, 2012, pp. 1131–1134. Entekhabi D., Njoku E., O'Neill P., Kellogg K.H., Crow W.T., Edelstein W.N., Entin J.K., Goodman S.D., Jackson T.J., Johnson J., Kimball J., Piepmeier J.R., Koster R.D., Martin N., McDonald K.C., Moghaddam M., Moran S., Reichle R., Shi J.C., Spencer M.W., Thurman S.W., Tsang L., Zyl J., The soil moisture active passive (SMAP) mission, *Proc. IEEE*, 2010, Vol. 98, No. 5, pp. 704–716. 4.

- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., Font J., Reul N., Gruhier C., Enache Juglea S., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S., The SMOS mission: 5. New tool for monitoring key elements of the global water cycle, Proc. IEEE, 2010, Vol. 98, No. 5, pp. 666-687.
- New tool for monitoring key elements of the global water cycle, *Proc. TEEE*, 2010, Vol. 98, No. 5, pp. 666–687. Lannoy G.J., Reichle R.H., Peng J., Kerr Y.H., Castro R., Kim E.J., Liu Q., Converting Between SMOS and SMAP Level-1Brightness Temperature Observations Over Nonfrozen Land, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 12, No. 9, pp. 1908–1912. Martin-Neira M., Ribo S., Martin-Polegre A.J., Polarimetric mode of MIRAS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, Vol. 40, No. 8, pp. 1755–1768. 6.
- 7.
- McMullan K.D., Brown M.A., Martin-Neira M., Rits W., Ekholm S., Marti J., Lemanczyk J., SMOS: The Payload, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 3, pp. 594–605. 8.
- 9. Talone M., Portabella M., Martínez J., González-Gambau V., About the Optimal Grid for SMOS Level 1C and Level 2 Products, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 12, No. 8, pp. 1630–1634. Yashchenko A.S., Bobrov P.P., Impact of the Soil Moisture Distribution in the Top Layer on the Accuracy Moisture
- 10. Retrieval by Microwave Radiometer Data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, Vol. 54, No. 9, pp. 5239–5246.