

---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

---

**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ  
СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В ЛЕСНЫХ РАЙОНАХ**

© 2012 г. А. А. Чухланцев\*, А. М. Шутко

*Фрязинский филиал Учреждения Российской академии наук Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской области*

\*E-mail: chukhlantsev@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 02.06.2011 г.

Проведен сравнительный анализ погрешностей определения яркостной температуры и влажности почвы, возникающих при использовании той или иной конфигурации СВЧ-радиометрических измерений (на одной длине волны с привлечением априорной информации, на двух длинах волн или двух поляризациях, на двух поляризациях и нескольких углах наблюдения) в лесных районах. Показано, что картирование влажности почвы с абсолютной погрешностью  $0.04 \text{ г/см}^3$  (программная цель проекта SMOS) может быть выполнено при наличии растительного покрова, в том числе и леса, при наблюдении в L-диапазоне в надир и привлечении априорной информации о растительном покрове. При невысоких значениях влагосодержания растительного покрова на единицу площади  $W \leq 1-1.5 \text{ кг/м}^3$  многоконфигурационные измерения также могут обеспечить приемлемую точность определения влажности почвы. При этом одновременно проводится оценка средней по пятну диаграммы направленности антенны оптической толщины (влагосодержания) растительности. Для больших значений влагосодержания растительности, в частности в лесных районах, погрешность многоконфигурационных измерений становится существенно больше требуемой.

**Ключевые слова:** микроволновая радиометрия, влажность почвы, лесные районы

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается повышенный интерес к исследованиям микроволнового излучения земной поверхности и разработке методик определения геофизических характеристик по данным дистанционного СВЧ-радиометрического зондирования. Этот интерес стимулирован запуском космического аппарата SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) (Kerr et al., 2010), а также установкой радиометрического комплекса L-диапазона ALRS (Advanced L-band Radiometric System) на российском сегменте МКС и запуском радиометрической системы L-диапазона на малом российском спутнике (Tishchenko et al., 2010). Одной из основных задач указанных космических систем является измерение влажности поверхностного слоя почвы в региональном и глобальном масштабах для последующего использования полученных данных в климатических и биосферных моделях. Основы дистанционного СВЧ-радиометрического метода определения влажности почвы заложены в 70–80-х годах прошлого века (Арманд и др., 1977; Шутко, 1986). В связи с высокой эффективностью метода в Советском Союзе даже были созданы самолетные службы мониторинга влажности почв территорий (Шутко, 1986). Использование СВЧ-радиометрического метода при зондировании из космоса требует некоторой

реvisions разработанных ранее методик, хотя опыт такого зондирования в России и имеется (Башаринов и др., 1974). Особый интерес представляет анализ применения метода для зондирования лесных районов, так как лесные экосистемы являются одним из важнейших объектов климатических и биосферных моделей.

Возможности определения влажности почвы СВЧ-радиометрическим методом под растительным покровом рассмотрены в работе Кирдяшева и др. (1979). Погрешности определения яркостной температуры и влажности почвы под растительностью по данным СВЧ-радиометрических измерений оценивались Шутко (1986), Чухланцевым и Шутко (1988) и ряде других работ, обзор которых дал Chukhlantsev (2006). Рассматривались измерения с различной конфигурацией — на одной длине волны, на двух длинах волн или двух поляризациях, а также многоконфигурационные измерения — на двух поляризациях и нескольких углах наблюдения. Яркостная температура системы почва–растительность зависит от влажности и типа почвы, степени ее шероховатости, температуры почвы и растительности, типа и влагосодержания растительного покрова. Если число измерительных каналов невелико, то для определения влажности почвы некоторые параметры приходится задавать априорно с использованием

вспомогательной информации. Увеличение количества измерительных каналов позволяет, в принципе, увеличить число определяемых геофизических параметров и сократить число априорно задаваемых параметров. Однако с увеличением числа измерительных каналов растет и погрешность определения, например, влажности почвы, и эта погрешность может стать больше, чем погрешность за счет неточности априорного задания параметров при использовании меньшего числа измерительных каналов. В опубликованных в последнее время работах многоконфигурационные измерения применяются для определения влажности почвы лесных экосистем. В связи с этим целесообразно провести сравнительный анализ погрешностей определения яркостной температуры и влажности почвы, возникающих при использовании того или иного способа измерений, что является целью данной работы.

### ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

В работе Кирдяшева и др. (1979) предложена трехкомпонентная модель для яркостной температуры  $T_b$  почвы при наличии растительного покрова на выбранной поляризации

$$T_b = (1 - r - t)T_v + \kappa_s T_s t + (1 - r - t)T_v(1 - \kappa_s)t, \quad (1)$$

где  $T_s$ ,  $T_v$  – температура почвы и растительности соответственно;  $\kappa_s$  – коэффициент излучения почвы;  $r$  и  $t$  – коэффициент отражения и коэффициент пропускания растительного слоя соответственно. Первый член в правой части характеризует излучение растительного слоя, второй – излучение почвы, ослабленное растительностью, третий – излучение растительности, отраженное от почвы и ослабленное растительным слоем. В приближении однократного рассеяния (Чухланцев, 1981; Mo et al., 1982)  $r = \omega(1 - e^{-\tau})$ ,  $t = e^{-\tau}$ , где  $\omega$  – альbedo единичного рассеивающего объема,  $\tau$  – оптическая толщина растительного слоя

$$T_b = (1 - \omega)(1 - e^{-\tau})T_v + \kappa_s T_s e^{-\tau} + (1 - \omega)(1 - e^{-\tau}) \times T_v(1 - \kappa_s)e^{-\tau}. \quad (2)$$

Данная модель известна как  $\omega - \tau$  модель (Chanzy, Wigneron, 2000). Если в этой модели в качестве  $\omega$  использовать не альbedo единичного объема среды, а коэффициент отражения оптически толстого растительного слоя  $r_0$ , то данная модель становится точной при больших значениях  $\tau$ . Точность данной модели рассматривалась в ряде работ, например Винокуровой и др. (1991), и здесь не обсуждается. На  $\omega - \tau$  модели базируется один из модулей так называемой L-MEB (L-band microwave emission of the biosphere) модели (Wigneron

et al., 2007), являющейся основой для интерпретации данных системы SMOS (Kerr et al., 2007). Если  $T_s \approx T_v$ , то  $\omega - \tau$  модель приводится к виду (Чухланцев, Шутко, 1988)

$$T_b = T_{bs}\beta + T'(1 - \beta), \quad (3)$$

где  $T_{bs}$  – яркостная температура почвы;  $T' = (1 - r_0)T$ ,  $\beta = e^{-2\tau}$  – коэффициент передачи растительного слоя. Данный вид модели и будет в дальнейшем использоваться для анализа погрешности определения яркостной температуры почвы (а по ней – влажности) по данным дистанционных СВЧ радиометрических измерений.

### ИЗМЕРЕНИЯ НА ОДНОЙ ДЛИНЕ ВОЛНЫ

При СВЧ радиометрических измерениях, проводимых на одной длине волны, оценка для яркостной температуры почвы  $T_{bs}$  под растительностью следует из выражения (3)

$$T_{bs} = T' - \frac{T' - T_b}{\beta}. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), оценка  $T_{bs}$  требует априорного задания параметров  $T'$  и  $\beta$ . Коэффициент передачи определяется в основном типом растительного покрова и его влагосодержанием на единицу площади (Кирдяшев и др., 1979). Обращение яркостной температуры почвы во влажность почвы требует также априорного задания типа и шероховатости почвы. Однако поскольку целью данной работы является оценка влияния лесной растительности на определение влажности почвы, погрешности, возникающие за счет неточности задания типа и степени шероховатости почвы, не рассматриваются. Производные выражения (4) по  $T'$ ,  $T' - T_b$  и  $\beta$  характеризуют степень влияния неточности задания указанных параметров на величину оцениваемого значения  $T_{bs}$

$$\Delta T_{bs|T'} = \frac{\partial T_{bs}}{\partial T'} \Delta T' = \Delta T', \quad (5)$$

$$\Delta T_{bs|T'-T_b} = -\frac{\partial T_{bs}}{\partial (T' - T_b)} \Delta (T' - T_b) = -\frac{\Delta (T' - T_b)}{\beta}, \quad (6)$$

$$\Delta T_{bs|\beta} = \frac{\partial T_{bs}}{\partial \beta} \Delta \beta = \frac{T' - T_{bs}}{\beta} \Delta \beta. \quad (7)$$

Результаты расчета  $\Delta T_{bs}$  вследствие неточности задания параметров  $T'$ ,  $T' - T_b$  и  $\beta$  приведены Шутко (1986) и Чухланцевым, Шутко (1988). Показано, что основным источником погрешности определения яркостной температуры почвы является неточность задания коэффициента передачи. При  $\beta = 0.4-1$  и  $\Delta \beta \leq 0.1$  погрешность опре-

Эффективные значения коэффициента передачи для леса различной сомкнутости при наблюдении в надир

$\xi$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
$\beta_\xi$	0.15	0.235	0.32	0.405	0.49	0.575	0.66
$\beta_\xi$	0.25	0.325	0.4	0.475	0.55	0.625	0.7

деления яркостной температуры почвы при  $T' - T_{bs} = 80$  К (сильно увлажненная почва) не превышает 10–20 К, что приводит к абсолютной погрешности определения влажности почвы 0.03–0.06 г/см<sup>3</sup>. (Заметим, что целевой установкой проекта SMOS является измерение влажности почвы с абсолютной погрешностью 0.04 г/см<sup>3</sup>). Для умеренно влажной почвы значение  $T' - T_{bs}$  уменьшается и соответственно уменьшается погрешность оценки яркостной температуры и влажности почвы за счет неточности задания коэффициента передачи  $\beta$ . Однако при  $\beta < 0.3$ –0.4 погрешность определения  $T_{bs}$  резко возрастает, что делает проблематичным определение влажности почвы на данной длине волны под такого вида растительностью.

К настоящему времени накоплен значительный статистический материал по значениям оптической толщины и коэффициента передачи лесной растительности в L-диапазоне (длина волны 21 см) при наблюдении в надир. В работе Кирдяшева и др. (1979) найдено, что величина коэффициента передачи полога густого хвойного леса на данной длине волны не превышает 0.25. В работе (Vichev et al., 1995) исследовалась сезонная динамика коэффициента пропускания  $t$  крон различных деревьев. В летний период при наличии листвы для дуба, клена и липы получено значение  $t = 0.46$ –0.5, что дает для коэффициента передачи  $\beta = t^2$  значение 0.21–0.25. В работе (Grant et al., 2007) для соснового леса высотой 22 м получено значение оптической толщины растительного слоя при наблюдении в надир  $\tau = 0.62 \pm 0.08$ , что дает для коэффициента передачи значение 0.29. В работе (Grant et al., 2008) получены значения  $\tau = 0.30$ ; 0.60 и 0.66 для хвойного (соснового) леса возрастом 5, 26 и 32 года соответственно. Эти значения оптической толщины дают значения  $\beta = 0.55$ ; 0.3 и 0.28 соответственно. Для березового и дубового леса возрастом 40–80 лет с высотой кроны 24 м получены значения  $\tau = 0.66$ –0.98, соответствующие значениям  $\beta = 0.28$ –0.14 (Guglielmetti et al., 2008). Для густых эвкалиптовых лесов Австралии в (Grant, 2009) получены значения  $\tau = 0.66$ –0.76, соответствующие значениям  $\beta = 0.28$ –0.22.

Из сказанного выше следует, что применение СВЧ-радиометрического метода для определения влажности почвы под пологом густого леса проблематично вследствие малых значений коэффи-

циента передачи. Кроме того, лесная подстилка оказывает экранирующее влияние на излучение почвы, будучи неким согласующим слоем (Grant et al., 2007; Guglielmetti et al., 2008), что приводит к значениям  $\beta$  (подстилка + полог леса), близким к нулю. Именно поэтому участки такого густого леса используются в качестве природного репера с яркостной температурой, близкой к  $T'$ , для калибровки самолетных радиометров, имеющих высокое пространственное разрешение.

Когда пространственное разрешение радиометрической съемки невысокое (единицы километров для самолетной съемки и десятки километров для спутниковой съемки), то в элемент разрешения попадают участки леса с различной степенью сомкнутости и участки открытой почвы. Если обозначить относительную площадь покрытия почвы лесом величиной  $\xi$ , то яркостная температура элемента разрешения равна (Кирдяшев и др., 1979; Чухланцев, 1981)

$$T_b = (1 - \xi)T_{bs} + \xi[T_{bs}\beta + T'(1 - \beta)] = T_{bs}\beta_\xi + T'(1 - \beta_\xi), \quad (8)$$

$$\beta_\xi = 1 - \xi(1 - \beta), \quad (9)$$

где  $\beta_\xi$  является эффективным коэффициентом передачи несомкнутого леса. В выражении (8) предполагается, что влажность почвы под лесом близка к влажности залежи, что правомерно для лесных зон, например, Нечерноземья (Зайдельман, 1985). Значения  $\beta_\xi$  в зависимости от величины  $\xi$  приведены в таблице для  $\beta = 0.15$  и  $\beta = 0.25$ . Как из нее следует, уже при сомкнутости 0.7–0.8  $\beta_\xi \geq 0.4$  и СВЧ-радиометрические измерения на одной длине волны 21 см могут успешно применяться для картирования влажности почв таких лесных территорий.

Убедительные примеры определения влажности почвы лесных территорий по данным самолетных радиометрических измерений на длине волны 21 см при наблюдении в надир приведены Мильшиным и др. (1999) и Мильшиным, Гранковым (2000). Мильшиным и др. (1999) проведено картирование влажности почвы на лесной территории Тверской области площадью 540 км<sup>2</sup>, с пространственным разрешением 2 км. Сомкнутость леса определялась с помощью фотосъемки и по топографической карте М 1 : 200000. Установлено, что сомкнутость  $\xi_k$ , определенная по топографической карте, связана с сомкнутостью  $\xi_\phi$ , опреде-

ленной по фотопланам с помощью палетки, регрессионной зависимостью  $\xi_{\Phi} = 0.09 + 0.946\xi_{\kappa}$  с коэффициентом корреляции 0.94. Из этого сделан важный вывод о возможности использования топографических карт для определения сомкнутости леса при невысоких пространственных разрешениях съемки. Величина сомкнутости полого по данным фотосъемки варьировала в пределах 0.3–0.7 при среднем значении около 0.55. По данным сопоставления яркостной температуры открытой почвы и леса Мильшиным и др. (1999) определены значения эффективного коэффициента передачи, которые оказались равны 0.59–0.8, что близко к значениям, приведенным в таблице для указанной сомкнутости полого. При найденных относительно больших значениях эффективного коэффициента передачи задание среднего значения  $\beta_{\xi} \approx 0.7$  привело к погрешности оценки влажности почвы за счет неточности задания  $\beta_{\xi}$ , не превышающей 0.06 г/см<sup>3</sup>. Улучшение пространственного разрешения (Мильшин и др., 1999; Мильшин, Гранков, 2000) ведет к расширению диапазона изменения эффективного коэффициента передачи и смещению среднего значения в сторону уменьшения  $\beta_{\xi}$ .

Интересно отметить, что в пределах полигона длиной порядка 60 км и шириной порядка 9 км температура леса по данным ИК-измерений изменялась в пределах 16–22°C (Мильшин и др., 1999). Эти данные определяют диапазон возможных погрешностей определения яркостной температуры почвы за счет неточности задания  $T'$ .

В настоящее время СВЧ радиометрические измерения на одной длине волны широко используются для определения влажности почвы (Chukhlantsev, 2006). При этом используется наблюдение именно в надир, так как такое наблюдение обеспечивает наибольшее значение эффективного коэффициента передачи. При наклонном визировании эффективный коэффициент передачи становится существенно меньше за счет увеличения оптической длины растительного слоя и увеличения эффективной сомкнутости полого (просветы малых размеров при наклонном визировании закрываются пологом). Рассмотренный метод определения влажности почвы лесных территорий будет, по-видимому, использоваться и при обработке данных упомянутых выше российских космических радиометрических систем L-диапазона, так как эти системы используют наблюдение на одной длине волны в надир.

## ИЗМЕРЕНИЯ НА ДВУХ ДЛИНАХ ВОЛН

Необходимость задания априорной информации о коэффициенте передачи растительности при одночастотных измерениях может быть устранена путем проведения спектральных изме-

рений (Чухланцев, Шутко, 1988). Яркостная температура почвы при этом определяется из (3) по данным измерений  $T_b$  на двух длинах волн (для определенности  $\beta_2 < \beta_1$ ):

$$T_{bs} = T' - \frac{(T' - T_{b1})^{\frac{\theta}{\theta-1}}}{(T' - T_{b2})^{\frac{1}{\theta-1}}}; \quad (10)$$

при двухчастотных измерениях может быть также получена оценка  $\beta_1$ :

$$\beta_1 = \frac{(T' - T_{b2})^{\frac{1}{\theta-1}}}{(T' - T_{b1})}, \quad (11)$$

где  $\theta = \tau_2/\tau_1$ ,  $T' = T'_1 \approx T'_2$ , индексы 1 и 2 относятся к измерениям на длине волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно. Выражение (10) получено в предположении, что  $T_{bs} = T_{bs2} \approx T_{bs1}$ , которое реализуется для сухой и сильно увлажненной почвы, а также в случае близкого к однородному увлажнению почвы по глубине, наблюдаемому для почвы под растительностью.

Погрешности оценки  $T_{bs}$  есть

$$\Delta T_{bs|T'} = \frac{\partial T_{bs}}{\partial T'} \Delta T' = \Delta T', \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{bs|T'-T_{b1}} &= -\frac{\partial T_{bs}}{\partial (T' - T_{b1})} \Delta (T' - T_{b1}) = \\ &= -\frac{\theta}{\theta-1} \frac{\Delta (T' - T_{b1})}{\beta_1}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{bs|T'-T_{b2}} &= -\frac{\partial T_{bs}}{\partial (T' - T_{b2})} \Delta (T' - T_{b2}) = \\ &= \frac{1}{\theta-1} \frac{\Delta (T' - T_{b2})}{\beta_2}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Delta T_{bs|\theta} = \frac{\partial T_{bs}}{\partial \theta} \Delta \theta = -\frac{T' - T_{bs}}{\theta-1} \ln \beta_2 \frac{\Delta \theta}{\theta}. \quad (15)$$

Сопоставление погрешностей оценки  $T_{bs}$ , возникающих при двух частотных измерениях, с погрешностями одночастотных измерений показывает, что проведение двухчастотных измерений имеет смысл, когда дополнительно возникающие погрешности (14) и (15) не превышают погрешность за счет неточности задания коэффициента передачи  $\beta_1$  (7). Даже не принимая во внимание погрешность за счет неточности задания  $\theta$  (15), получим оценку коэффициента  $\beta_2$ , при котором проведение двухчастотных измерений становится нецелесообразным

$$\frac{T' - T_{bs}}{\beta_1} \Delta \beta_1 \leq \frac{1}{\theta-1} \frac{\Delta (T' - T_{b2})}{\beta_2} \quad (16)$$

$$\text{и } \beta_2 \leq \frac{1}{\theta - 1} \frac{\Delta(T^v - T_{b2})}{T^v - T_{bs}} \frac{\beta_1}{\Delta\beta_1}. \quad (17)$$

Полагая  $\frac{1}{\theta - 1} \approx 1$ ,  $\Delta(T^v - T_{b2}) \approx 4 \text{ К}$ ,  $T^v - T_{bs} = 80 \text{ К}$  и  $\frac{\Delta\beta_1}{\beta_1} = 0.1$  (что дает близкую к максимальной оценку  $\beta_2$  в выражении (17)), получаем, что применение двухчастотных измерений становится неэффективным уже при  $\beta_2 \leq 0.5$ . В реальности критическое значение  $\beta_2$  еще выше. Поскольку для растительных покровов значение коэффициента передачи на данной длине волны определяется влажностью растительности на единицу площади  $W$  (Кирдяшев и др., 1979), можно оценить, до каких значений  $W$  проведение двухчастотных измерений имеет смысл. Например, в С-диапазоне  $\tau \approx 0.3W$  (Chukhlantsev, 2006), что ограничивает применение двухчастотного метода (измерение в L- и С-диапазоне) при влажосодержании растительности большего  $1-1.2 \text{ кг/м}^2$ . При малых значениях коэффициента  $\beta_2$  использование двухчастотных измерений приводит к погрешностям в определении влажности почвы, превышающим погрешности одночастотных измерений (Liu et al., 2002).

Возможность определения влажности почвы под лесным пологом по данным радиометрических измерений в высокочастотной части СВЧ-диапазона определяется лишь просветами в пологе, поскольку коэффициент передачи густого леса на высоких частотах близок к нулю. Из таблицы следует, что двухчастотные измерения в принципе могут использоваться и для лесных территорий, но с сомкнутостью леса, не превышающей  $0.3-0.4$ .

### ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

При измерении яркостной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях из (3) получаем

$$T_b^h = T_{bs}^h \beta^h + T^h s(1 - \beta^h), \quad (18)$$

$$T_b^v = T_{bs}^v \beta^v + T^v (1 - \beta^v), \quad (19)$$

где индексы  $h$  и  $v$  относятся к измерению на горизонтальной и вертикальной поляризациях соответственно. Для оценки погрешностей, возникающих при поляризационных измерениях, положим  $\beta^h \approx \beta^v \approx \beta$  (хотя на вертикальной поляризации ослабление в кроне, как правило, больше и алгоритмы оценки влажности почвы под пологом должны это учитывать) и  $T^h \approx T^v \approx T^v$ . Тогда

$$\beta = \frac{T_b^v - T_b^h}{T_{bs}^v - T_{bs}^h} = \frac{T_b^v - T_b^h}{PD}, \quad PD = T_{bs}^v - T_{bs}^h, \quad (20)$$

$$T_{bs}^h = T^v - \frac{T^v - T_b^h}{\beta} = T^v - \frac{T^v - T_b^h}{T_b^v - T_b^h} PD, \quad (21)$$

где  $PD$  — поляризационная разность между яркостной температурой открытой почвы на вертикальной и горизонтальной поляризациях.

Погрешности оценки  $T_{bs}^h$  есть

$$\Delta T_{bs}^h|_{T^v} = \frac{\partial T_{bs}^h}{\partial T^v} \Delta T^v = \Delta T^v, \quad (22)$$

$$\Delta T_{bs}^h|_{T^v - T_b^h} = -\frac{\partial T_{bs}^h}{\partial (T^v - T_b^h)} \Delta(T^v - T_b^h) = -\frac{\Delta(T^v - T_b^h)}{\beta}, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{bs}^h|_{T_b^v - T_b^h} &= \frac{\partial T_{bs}^h}{\partial (T_b^v - T_b^h)} \Delta(T_b^v - T_b^h) = \\ &= \frac{T^v - T_b^h}{\beta} \frac{\Delta(T_b^v - T_b^h)}{PD}. \end{aligned} \quad (24)$$

Из сопоставления (5)–(7) с (22)–(24) видно, что поляризационные измерения имеют преимущество перед одночастотными, если погрешность (24) меньше или сравнима с (7). Если в (7) принять  $\Delta\beta \approx 0.1$ , то поляризационные измерения эффективны при  $\frac{\Delta(T_b^v - T_b^h)}{PD} \leq 0.1$ . Для выполнения это-

го условия при  $\Delta(T_b^v - T_b^h) \approx 4 \text{ К}$  (данное значение обусловлено погрешностями абсолютной калибровки яркостной температуры и погрешностью самой радиационной модели: среднеквадратичное отклонение расчетных значений яркостной температуры от измеренных составляет для леса  $3-4 \text{ К}$  (Grant et al., 2008)), необходимо, чтобы поляризационная разность была не менее  $40 \text{ К}$ . Такое значение поляризационной разности достигается при углах наблюдения, больших, чем  $35-40^\circ$  (Чухланцев и др., 2004). Однако как при одночастотных, так и при поляризационных измерениях необходимо, чтобы значение коэффициента передачи было достаточно большим ( $\beta > 0.3-0.4$ ). Как уже отмечалось выше, эти значения могут быть достигнуты при наблюдении в надир леса с сомкнутостью  $0.7-0.8$ . Если же наблюдение ведется под углом, скажем  $45^\circ$ , то значение  $\beta_{45^\circ} \approx (\beta_{nadir})^{\sqrt{2}}$ , т.е.  $\beta_{45^\circ} \approx 0.4$ , когда  $\beta_{nadir} \approx 0.52$ , что достигается при сомкнутости леса  $0.5-0.6$ . Кроме того, сама сомкнутость леса при наблюдении под углом увеличивается (для грубой оценки для угла наблюдения  $45^\circ$  можно считать, что площадь просветов уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз, т.е. сомкнутость увеличивается в 1.4 раза). Таким образом, применение поляризационного метода измерений влажности в лесных районах ограничивается лесами с сомкнутостью  $\xi \leq 0.4$ . Близкий к этому вывод сделан (Grant, 2009) по результатам самолетных радиометрических измерений влажности почвы

на территории с различной сомкнутостью леса. Погрешность определения влажности почвы существенно возрастала уже при сомкнутости 0.4–0.5 и достигала 0.1 г/см<sup>3</sup>, а затем несколько снижалась при больших сомкнутостях. Таким образом, погрешность при поляризационных измерениях оказывается хуже, чем при одночастотных измерениях с априорным заданием коэффициента передачи (Мишельин и др., 1999).

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГО- КОНФИГУРАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

При числе измерительных каналов, равном одному или двум, значение яркостной температуры почвы можно выразить через измеренные яркостные температуры в каналах в явном виде. Это позволяет достаточно просто провести анализ погрешностей, наглядно показать основные их источники и очертить границы применимости рассмотренных методов измерений, что и сделано выше. Однако в настоящее время развиваются многоконфигурационные методы измерения (Wigner et al., 2007), направленные на учет при измерениях не только экранирующего влияния растительности, но и коэффициента отражения  $r_0$ , степени шероховатости почвы, температуры почвы и пр. Измерения при этом проводятся на нескольких, например трех, углах, на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Прямое обращение радиационной модели, позволяющее выразить значения влажности почвы через измеренные значения яркостной температуры в каналах, при таком подходе весьма затруднительно. Поэтому обращение радиационной модели (2) проводится (Wigner et al., 2007) путем минимизации стоимостной функции  $CF$

$$CF = \sum_i \left( \frac{T_{b,i} - T_{b,i}^{cal}}{\sigma_i} \right)^2 + \sum_j \left( \frac{P_j^{ini} - P_j^{retr}}{\sigma_j} \right)^2, \quad (25)$$

где  $T_{b,i}$  – измеренное значение яркостной температуры в  $i$ -ом измерительном канале;  $T_{b,i}^{cal}$  – расчетное значение яркостной температуры в  $i$ -ом измерительном канале;  $P_j^{ini}$  – некоторое начальное значение  $j$ -го параметра модели, выбираемое из априорных данных;  $P_j^{retr}$  – восстанавливаемое значение  $j$ -го параметра модели;  $\sigma_i$  – стандартное отклонение (погрешность измерения) яркостной температуры в канале;  $\sigma_j$  – величина, характеризующая ограничение, накладываемое на восстанавливаемое значение параметра. Большое значение  $\sigma_j$  снимает ограничения на  $P_j^{retr}$ , малое значение  $\sigma_j$  фактически “привязывает”  $P_j^{retr}$  к априорному значению  $P_j^{ini}$ .

Недостатком описанного выше подхода, на наш взгляд, является одинаковая значимость измерений во всех каналах при определении какого-либо конкретного параметра. Из общей теории (Тихонов, Арсенин, 1979) ясно, что при таком подходе введение в измерительную конфигурацию измерительного канала, в котором чувствительность к изменению параметра, например влажности почвы, очень мало, приведет к большим погрешностям в определении этого параметра. При наличии ограничений эти погрешности лимитируются заданными величиной  $\sigma_j$  пределами изменения параметра, а без ограничений – могут быть сколь угодно большими.

При многоконфигурационных измерениях анализ погрешностей метода измерений становится не таким наглядным, как анализ, проведенный выше. Процедура оценки погрешностей состоит в данном случае в задании параметров прямой модели (2) (обычно задается влажность почвы и ее температура, параметр шероховатости, оптическая толщина и альbedo растительности) и расчете яркостных температур в каналах. Затем расчетные значения яркостных температур “зашумливаются”, и по таким образом полученным “измеренным” значениям яркостных температур проводится восстановление параметров модели. Сопоставление восстановленных параметров модели с первоначально заданными значениями дает оценку погрешности восстановления. Следует все же отметить, что, поскольку основой многоконфигурационных измерений являются поляризационные измерения, выводы предыдущего раздела остаются в силе и для рассматриваемого случая. Добавление измерительных каналов может лишь ухудшить ситуацию с точностью определения влажности почвы. Реалистичный анализ погрешностей восстановления параметров почвы и растительности по данным многоконфигурационных измерений проведен в работах (Piles, 2010; Piles et al., 2010). В них отмечается, что без учета ограничений, накладываемых на измеряемые параметры, ошибки восстановления параметров из данных радиометрических измерений действительно становятся весьма большими. Введение ограничений на измеряемые параметры позволяет существенно снизить эти погрешности. Однако уже при  $\tau = 0.24$  ( $\beta = 0.6$ ) абсолютная погрешность определения влажности почвы при измерениях на двух поляризациях и нескольких углах достигает 0.11–0.13 г/см<sup>3</sup> (Piles, 2010; Piles et al., 2010). Данная погрешность значительно больше той, которая могла бы быть получена для одночастотных измерений в надир при априорном задании коэффициента передачи. Поскольку в L-диапазоне  $\tau \approx 0.1W$  (Chukhlantsev, 2006), применение многоконфигурационных измерений ограничивается значениями  $W \leq 1-1.5$  кг/м<sup>3</sup>. Таким образом,

для лесных районов использование многоконфигурационных измерений не снимает необходимости задания априорной информации о пропускании СВЧ-излучения растительным покровом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Одночастотные наблюдения в L-диапазоне в надир с привлечением априорных данных о характере растительного покрова являются надежным инструментом определения влажности почв на больших территориях, включая лесные районы. Именно такой метод картирования влажности почвы предполагается использовать при обработке данных российских космических аппаратов с радиометрами L-диапазона на борту.

2. Программной целью проекта SMOS является картирование влажности почвы с абсолютной погрешностью 0.04 г/см<sup>3</sup>. Указанная цель может быть достигнута при наблюдении открытой почвы. При наличии растительного покрова, в том числе и леса, указанная точность может быть в принципе достигнута в проекте при наблюдении в надир и привлечении априорной информации о растительном покрове. При невысоком влагосодержании растительного покрова ( $W \leq 1-1.5$  кг/м<sup>3</sup>) многоконфигурационные измерения также могут обеспечить приемлемую точность определения влажности почвы. При этом снимается необходимость априорного задания коэффициента передачи растительного покрова и одновременно проводится оценка средней по пятну диаграммы направленности оптической толщины (влагосодержания) растительности. Для больших значений влагосодержания растительности, в частности в лесных районах, погрешность многоконфигурационных измерений становится существенно больше требуемой.

3. Проведенный в работе анализ показывает, что определение влажности почвы с требуемой точностью в лесных районах по данным лишь только СВЧ-радиометрических измерений (сколько бы измерительных каналов не использовалось — один или несколько) без привлечения дополнительной информации невозможно. Эта информация может быть получена с использованием дистанционных данных, полученных другими сенсорами — оптическими и радиолокационными. Работы по использованию данных оптической и РЛ-съемки при определении влажности почв СВЧ-радиометрическим методом уже ведутся (например, Piles, 2010). Обзор полученных результатов и анализ возможностей использования данных, полученных другими сенсорами, для повышения точности определения влажности почвы требует отдельного рассмотрения.

4. Другой программной установкой проекта SMOS является картирование влагосодержания растительности с абсолютной погрешностью

0.2 кг/м<sup>2</sup>. Авторам на основании более чем 30-летнего опыта СВЧ-радиометрии растительных покровов представляется сомнительной возможность достижения указанной цели. Достижение такой точности возможно при наблюдении с самолета рисовых посевов, для которых подстилающей поверхностью является вода (Чухланцев, Шутко, 1987). Однако для измерений из космоса при условии, когда размер элемента разрешения составляет 35–50 км и в элемент разрешения входят разнородные участки земной поверхности, достижение требуемой точности вряд ли возможно. Кроме того, для такого большого элемента разрешения не совсем понятно, к чему в данном элементе относить полученные данные о влагосодержании.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арманд Н.А., Башаринов А.Е., Шутко А.М. Исследование природной среды радиофизическими методами // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 6. С. 809.
- Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
- Винокурова С.И., Смирнов М.Т., Чухланцев А.А. Радиационная модель системы рассеивающий слой—шероховатая поверхность в СВЧ диапазоне // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1991. № 4. С. 472–476.
- Зайдельман Ф.Р. Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Генетические, агрономические и мелиоративные аспекты. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 327 с.
- Кирдяшев К.П., Чухланцев А.А., Шутко А.М. СВЧ излучение земной поверхности при наличии растительного покрова // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 2. С. 256–264.
- Милюшин А.А., Гранков А.Г. Некоторые результаты экспериментальных исследований радиотеплового излучения леса в L-диапазоне // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 3. С. 50–57.
- Милюшин А.А., Гранков А.Г., Мишанин В.Г. Картирование температурно-влажностного режима лесных систем по данным самолетной фотосъемки, ИК-измерений и СВЧ-радиометрических измерений в L-диапазоне // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 5. С. 88–96.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. Изд. 2-е. 228 с.
- Чухланцев А.А. СВЧ излучение растительных покровов. Дисс....канд. техн. наук. М.: МФТИ, 1981. 172 с.
- Чухланцев А.А., Шутко А.М. Об учете влияния растительности при дистанционном СВЧ-радиометрическом зондировании земных покровов // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 2. С. 67–72.
- Чухланцев А.А., Шутко А.М. Применение СВЧ-радиометрического метода для определения биометрических характеристик растительного покрова // Исслед. Земли из космоса. 1987. № 5. С. 42–48.
- Чухланцев А.А., Шутко А.М., Чухланцев А.А. Моделирование поляризационных характеристик СВЧ излучения влажных почв // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2004. № 11. С. 67–80.

- Шутко А.М.* СВЧ радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
- Chanzy A., Wigneron J.-P.* Microwave emission from soil and vegetation // Radiative transfer models for microwave radiometry / Ed. Ch. Maetzler. Bern: 2000. P. 89–102.
- Chukhlantsev A.A.* Microwave radiometry of vegetation canopies. Dordrecht: Springer, 2006. 287 p.
- Grant J.* Measurement and modelling of L-band forest emission for future soil moisture retrieval from SMOS signatures. PhD thesis. Amsterdam: Vrije Universiteit, 2009. 115 p.
- Grant J.P., Saleh K., Wigneron J.-P. et al.* Calibration of the L-MEB model over a coniferous and a deciduous forest // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2008. V. 46. № 3. P. 808–818.
- Grant J.P., Wigneron J.-P., Van de Griend A.A. et al.* A field experiment on microwave forest radiometry: L-band signal behaviour for varying conditions of surface wetness // Rem. Sens. Environ. 2007. V. 109. № 1. P. 10–19.
- Kerr Y.H., Waldteufel P., Richaume P., Ferrazzoli P., and Wigneron J. P.* SMOS level 2 processor soil moisture algorithm theoretical basis document (ATBD). Toulouse, France: CESBIO, 2007. [www.cesbio.ups-tlse.fr/data\\_all/SMOS-doc/atbd/SM\\_ATBD\\_3-a.pdf](http://www.cesbio.ups-tlse.fr/data_all/SMOS-doc/atbd/SM_ATBD_3-a.pdf)
- Kerr Y. H., Waldteufel P., Wigneron J.P. et al.* The SMOS Mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle // Proc. IEEE. 2010. V. 98. № 5. P. 666–687.
- Liu S.F., Liou Y.A., Wang W.J., Wigneron J.P., and Lee J.B.* Retrieval of crop biomass and soil moisture from measured 1.4 and 10.65 GHz brightness temperatures // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2002. V. 40. № 6. P. 1260–1268.
- Mo T., Choudhury B.J., Schmugge T.J., Wang J.R., and Jackson T.J.* A model for microwave emission from vegetation-covered fields // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 11229–11237.
- Piles M.* Multiscale soil moisture retrievals from microwave remote sensing observations, Ph.D. Thesis. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2010. 148 p. [http://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2009/11/Thesis\\_M\\_Piles.pdf](http://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2009/11/Thesis_M_Piles.pdf)
- Piles M., Vall-llossera M., Camps A., Talone M., and Monerri A.* Analysis of a least-squares soil moisture retrieval algorithm from L-band passive observations // Remote Sens. 2010. V. 2. P. 352–374. doi:10.3390/2010352. <http://www.mdpi.com/2072-4292/2/1/352/pdf>
- Tishchenko Yu., Savorskiy V., Smirnov M., Ablyazov V., Khaldin A.* Prospective space missions with L-band microwave radiometric systems // Eds. Wagner W., Székely, B. ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS. Vienna, Austria.: 2010. V. XXXVIII, Pt. 7B. P. 592–595.
- Vichev B., Krasteva E., Kostov K.* Study of seasonal evolution of tree emission using zenith-looking microwave radiometers // Proc. IGARSS'95. Firenze, Italy, 1995. V. 2. P. 981–983.
- Wigneron J.P., Kerr Y., Waldteufel P. et al.* L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields // Rem. Sens. Environ. 2007. V. 107. № 4. P. 639–655.

## Some Aspects of Microwave Radiometry of Soil Moisture in Forested Areas

A. A. Chukhlantsev, A. M. Shutko

*Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fрязино, Moscow region*

Errors of soil brightness temperature and soil moisture retrieval from microwave radiometric measurements in forested areas are analyzed for different configurations of measurements (single frequency measurements, two frequency measurements or single frequency measurements at two polarizations, measurements at two polarizations and several angles of observation). It is shown that mapping the soil moisture with an accuracy of  $0.04 \text{ g/sm}^3$  (that is the aim of SMOS project) can be performed with L-band nadir observations and involvement of *a priori* information on the vegetation cover. Under not big values of vegetation water content per unit area  $W \leq 1-1.5 \text{ kg/m}^3$ , multi-configuration measurements can also provide an acceptable accuracy of soil moisture retrieval. Simultaneously, the average vegetation water content in the antenna footprint is retrieved. For greater values of vegetation water content, particularly, in forested areas, the errors of multi-configuration measurements are sufficiently greater than required ones.

**Keywords:** microwave radiometry, soil moisture, forested areas