

В.Л. Миронов, П.П. Бобров

Микроволновое радиометрическое зондирование почв*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск
Омский государственный педагогический университет*

Поступила в редакцию 6.08.2007 г.

Изложены физические основы микроволнового радиометрического метода дистанционного изучения почв, приведен обзор способов определения эффективной температуры, оценки поверхностных неровностей, учета влияния атмосферы. Показаны возможности радиометрического метода для оценки гидрофизических характеристик почв.

Микроволновые методы дистанционного зондирования (активные, радиолокационные, и пассивные, радиометрические) начинают все более широко использоваться для исследования свойств подстилающей поверхности, для определения потоков тепла и влаги между поверхностью почвы и атмосферой. Микроволновые методы являются всепогодными. В диапазоне частот 1–10 ГГц атмосфера практически прозрачна для электромагнитных волн, поэтому влияние атмосферы необходимо учитывать лишь на самых верхних частотах этого диапазона. Основой радиометрического метода является зависимость собственно радиотеплового излучения подстилающей поверхности от ее диэлектрических свойств.

В микроволновом диапазоне с высокой точностью можно использовать длинноволновое приближение формулы Планка (закон Рэлея–Джинса) для яркости излучения $B(f, T)$ абсолютно черного тела:

$$B(f, T) = \frac{2f^2}{c^2} kT,$$

где T — термодинамическая температура тела; f — частота; k — постоянная Больцмана; c — скорость света в вакууме.

Яркость нечерных тел можно представить в виде

$$B'(f_0, T) = eB(f_0, T) = B(f_0, T_B),$$

где e — коэффициент излучения (для всех реальных тел он меньше единицы); T_B — яркостная температура. Отсюда следует: $T_B = eT$. Если излучающая среда является неизотермической, т.е. температура изменяется с глубиной, то последнее выражение останется справедливым в следующей записи: $T_B = eT_{ef}$, где T_{ef} — эффективная температура. Коэффициент излучения зависит от частоты и поляризации принимаемого излучения, а также от направления луча относительно нормали к поверхности θ (угла зондирования). В соответствии с законом Кирхгофа

$$e_p = 1 - R_S(\theta, p),$$

где $R_S(\theta, p)$ — коэффициент отражения плоской волны (по мощности); p — индекс поляризации (V или H соответственно для вертикальной или горизонтальной поляризации).

Излучение нечерных тел дополнительно к собственному излучению имеет составляющую отраженного излучения, которая для подстилающей поверхности определяется яркостной температурой неба T_{Bsky} :

$$T_{Bp} = [1 - R_S(\theta, p)]T_e + R_S(\theta, p)T_{Bsky}.$$

Яркостная температура неба обусловлена реликтовым излучением с температурой 3 К, излучением галактик и излучением атмосферы и составляет в дециметровом диапазоне ~ 4 –8 К.

Свойства поверхности определяют коэффициентом отражения, и для его нахождения через измеряемую яркостную температуру важно правильно определить эффективную температуру излучающей среды. Определение эффективной температуры T_e особенно необходимо при исследованиях на низких частотах, когда в пределах излучающего слоя, составляющего 0,1–0,2 длины волны, температура может изменяться существенно. Простая формула для T_e приведена в работе [1]:

$$T_e = T_\infty + (T_S - T_\infty)C,$$

где T_∞ — температура на глубине 50 см; T_S — температура на глубине 0–5 см; C — параметр, зависящий от влажности почвы и от частоты. В работе [2]

$$C = (W_S/W_0)^b,$$

где W_S — влажность в поверхностном слое 0–3 см; W_0 и b — параметры, зависящие от характеристик почвы. Для частоты 1,4 ГГц эти параметры найдены путем сравнения экспериментальных результатов с расчетными: $W_0 = 0,377$, $b = 0,262$. При этом ошибка в яркостной температуре составляет около 1,4 К.

Однако не всегда при дистанционном зондировании имеется возможность определения температуры в слоях 0–3 см и на глубине 50 см. Чаще возможным является определение только температуры поверхности почвы с помощью ИК-радиометра. При малых градиентах влажности и малой глубине зондирования (т.е. на высоких частотах) можно принимать $T_e = T_s$. Однако во многих случаях это может приводить к значительным погрешностям. Так, в [3] на основе анализа многолетних данных, полученных на частоте 6,6 ГГц с помощью радиометра SMMR, установленного на спутнике Nimbus, найдено, что в 90% случаев дневные значения эффективной температуры на 12,5 К ниже значений поверхностной температуры, а ночные соответственно выше на 5 К. Это связано с наличием температурных градиентов в поверхностном слое, особенно значительных в дневное время.

В случае облачной атмосферы спутниковые ИК-измерения являются неосуществимыми. Для определения эффективной температуры в таком случае в [4] предложена модель расчета T_e , в которой используются данные о температуре воздуха в приповерхностных слоях (при высокой влажности почвы) или значения яркостной температуры на частоте 10,7 ГГц (в сухой период). Ошибка в определении эффективной температуры на частотах L - и S -диапазонов не превышает 5 К для гладкой почвы и возрастает до 10 К в случае шероховатой поверхности.

Другой проблемой, возникающей при дистанционном определении свойств подстилающей поверхности, является корректный учет шероховатостей, приводящих к повышению коэффициента излучения. Существуют два подхода к решению этой задачи. При заданных параметрах поверхностных неровностей возможен расчет коэффициента отражения путем интегрирования коэффициента рассеяния при бистатической локации по верхнему полупространству [4–6]. При решении обратных задач радиометрии чаще используют полумпирические модели. В одной из таких моделей [1, 7] коэффициент отражения на поляризации p записывается как

$$R_S(\theta, p) = [(1 - Q)R_S^*(\theta, p) + QR_S^*(\theta, q)] \exp(-h \cos^N \theta),$$

где q – индекс поляризации, ортогональной относительно поляризации p ; $R_S^*(\theta, p$ или $q)$ – френелевский коэффициент отражения от гладкой поверхности. Параметры шероховатости Q , h и N подбирают для лучшего совпадения с результатами эксперимента. Физически параметр Q описывает энергообмен между ортогональными поляризациями (V и H), вызываемый поверхностными шероховатостями. При измерениях на одной частоте и двух поляризациях подобрать три параметра Q , h , N и диэлектрическую проницаемость почвы невозможно, поэтому при таких измерениях модель упрощают и полагают, что $Q = 0$.

Первоначально [1] предлагалось выбирать $N = 2$, однако авторы [8] показали, что при изме-

нении угла зондирования от 10 до 60° на частотах 1,4, 5 и 10,7 ГГц лучше выбирать $N = 0$.

В работе [2] показано, что при наличии данных о влажности почвы в поверхностном слое лучшие результаты дает представление параметра h в виде

$$h = A(W_S)^B(\sigma/l)^C,$$

где σ – среднеквадратическое отклонение высот поверхностной шероховатости; l – радиус корреляции. Для частоты 1,4 ГГц получены следующие значения констант: $A = 0,5761$, $B = -0,3475$, $C = 0,4230$. Учет поверхностных шероховатостей при измерениях с наземных установок позволяет получить погрешность измерения влажности почвы на глубине 2 см от 2,9 до 6 %.

Коэффициент отражения от гладкой поверхности вычисляется по формулам Френеля с учетом зависимости диэлектрической проницаемости почв от влажности. Эти зависимости для разных почв различны и определяются главным образом количеством связанной воды. Для определения диэлектрической проницаемости почв используют модели смеси [9, 10]. Установлено, что диэлектрическая проницаемость почв зависит не только от гранулометрического состава, но и от содержания гумуса [11, 12].

Серьезной проблемой исследования поверхности Земли из космоса является низкая разрешающая способность радиометрических систем, однако в перспективе задача повышения разрешающей способности может быть решена как методами синтеза апертуры, так и совместной обработкой изображений с использованием радиолокационных и оптических изображений более высокого разрешения.

Поскольку основной характеристикой почвы, определяемой дистанционным радиометрическим методом, является влажность, то все методы исследования гидрофизических свойств почв основаны на долговременных многочастотных измерениях коэффициента излучения. Изучая распределение температуры и влажности по глубине, можно определить водно-воздушный режим почв и, следовательно, оценить их качество в агрономическом смысле. Засоление почв приводит к уменьшению коэффициента излучения в дециметровом диапазоне, а также к замедлению испарения и уменьшению скорости изменения коэффициента излучения, которое может быть зафиксировано измерениями в сантиметровом диапазоне [13, 14]. В почвах, существенно различающихся содержанием гумуса, процессы испарения также идут с различной скоростью. При этом различаются градиенты влажности, возникающие в поверхностных слоях почв, и динамика коэффициента излучения на разных частотах [15–17]. Различия в гидрофизических характеристиках проявляются также в процессах промерзания и оттаивания [18, 19].

Таким образом, радиометрическое зондирование почв позволяет не только определять динамику влажности в поверхностном слое, но и оценивать качество почв сельскохозяйственного назначения.

1. Choudhury B.J., Schmagge T.J., Mo T. A parameterization of effective soil temperature for microwave emission // J. Geophys. Res. C. 1982. V. 87. N 2. P. 1301–1304.
2. Wigneron J.P., Laquerre L., Kerr Y.H. A simple parameterization of the L-band microwave emission from rough agricultural soil // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2001. V. 39. N 8. P. 1697–1707.
3. Van de Griend A.A. The effective thermodynamic temperature of the emitting surface at 6.6 GHz and consequences for soil moisture monitoring from space // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2001. V. 39. N 8. P. 1673–1679.
4. Li Q., Tsang L., Shi J.C., Chan C.H. Application of physics-based two-grid method and sparse matrix canonical grid method for numerical simulations of emissivities of soils with rough surfaces // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2000. V. 38. N 4. P. 1635–1643.
5. Wu T.D., Chen K.S., Shi J., Fung A.K. A transition model for the reflection coefficient in surface scattering // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2001. V. 39. N 9. P. 2040–2050.
6. Shi J., Chen K.S., Li Q., Jackson T.J., O'Neill P.E., Tsang L. A parameterized surface reflectivity model and estimation of bare-surface soil moisture with L-band radiometer // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2002. V. 40. N 12. P. 2674–2686.
7. Chanzy A., Raju S., Wigneron J.P. Estimating soil microwave effective temperature at L and C bands // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1997. V. 35. N 3. P. 570–580.
8. Wang J.R., O'Neill P.E., Jackson R.D. Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture and surface roughness // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1993. V. 21. N 1. P. 44–50.
9. Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., Komarov S.A., Kleshchenko V.N. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2004. V. 42. N 4. P. 773–785.
10. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: Dielectric mixing models // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1985. V. 23. N 1. P. 35–44.
11. Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Галлеев О.В., Мандрыгина В.Н. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1–20 ГГц // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 5. С. 28–34.
12. Mironov V.L., Bobrov P.P. Soil Dielectric Spectroscopic Parameters Dependence On Humus Content // Proc. of IGARSS'2003. Toulouse, France. 2003. V. II. P. 1106–1108.
13. Бобров П.П. Влияние различий в структуре засоленных и незасоленных почв на собственное СВЧ-излучение // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 5. С. 83–87.
14. Бобров П.П. Исследование испарения, влажности и структуры поверхностного слоя почв дистанционными микроволновыми методами // Почвоведение. 2000. № 5. С. 574–578.
15. Бобров П.П., Галлеев О.В. Динамика радиояркостной температуры почв с различным содержанием гумуса // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 4. С. 66–72.
16. Бобров П.П., Ивченко О.А., Кривальцевич С.В. Исследование почвенной структуры методом двухчастотной микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 2. С. 82–88.
17. Mironov V.L., Bobrov P.P., Ivchenko O.A., Krivaltsevitsh S.V., Jaschenko A.S. Dynamic radiobrightness for drying soils as a function of humus content // Proc. of IGARSS'2005. Seoul, Korea. 2005. V. II. P. 1127–1130.
18. Бобров П.П., Кривальцевич С.В., Миронов В.Л., Яценко А.С. Влияние толщины промерзшего почвенного слоя на собственное радиотепловое излучение в диапазоне длин волн 3,6–11 см // Изв. вузов. Физ. 2006. № 9. С. 5–10.
19. Mironov V.L., Bobrov P.P., Zhiron P.V., Krivaltsevitsh S.V., Jaschenko A.S., De Roo R.D. Radiobrightness dynamics of freezing/thawing processes for different soils // Proc. of IGARSS'2006. Denver, Colorado. USA. 2006. V. 6. P. 3015–3018.

V.L. Mironov, P.P. Bobrov. Microwave radiometric remote sensing of soils.

Physical bases are outlined regarding radio thermal remote sensing of soils. A number of techniques to determine effective temperature and roughness for the upper layer of soil are reviewed, along with the method used to account for the influence of the atmosphere. There are demonstrated potential possibilities for determining the hydrophysical characteristics of soils with the use of radio thermal remote sensing.