

Член-корреспондент АН СССР К. Я. КОНДРАТЬЕВ, Е. М. ШУЛЬГИНА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ЕЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе ⁽¹⁾ получено выражение для радиояркостной температуры теплового излучения поверхностного слоя почвы, измеряемой на уровне земной поверхности при пренебрежении мало существенным в микроволновом диапазоне длин волн вкладом отраженного излучения атмосферы. Вычисления в ⁽¹⁾ проводились в приближении постоянного по глубине коэффициента поглощения грунта ($\alpha = \text{const}$) и для семейства температурных профилей $T(z)$ с возможным максимумом или минимумом, плавно переходящих в постоянное асимптотическое значение на достаточно больших глубинах. Следует отметить, что такое семейство профилей охватывает практически все их многообразие, наблюдаемое в поверхностном слое почвы ⁽²⁾.

В области длин волн, для которых $\gamma/\alpha \ll 1$ (γ — эмпирический параметр температурного профиля, характеризующий экспоненциальный спад температуры на больших глубинах), радиояркостная температура может быть представлена в виде

$$T_n = [1 - R(\theta)^2] \left[T_0 + \frac{T'(0) \cos \theta}{\alpha} \left(1 - 2 \frac{\gamma \cos \theta}{\alpha} \right) \right], \quad (4)$$

где $R(\theta)$ — коэффициент отражения, T_0 — температура при $z = 0$, $T'(0)$ — температурный градиент у поверхности, θ — угол визирования (относительно вертикали).

В работе ⁽¹⁾ рассмотрена методика определения (при известном T_0) влажности почвы w , а также зависящих от нее величин R , α и параметров температурного профиля $T'(0)$ и γ путем измерений яркостной температуры на нескольких длинах волн. Вклад членов, зависящих от параметров профиля $T'(0)$ и γ , в T_n составляет лишь несколько градусов. Например, при $|T'(0)| = 700^\circ/\text{м}$, $\gamma/\alpha = 0,2$, $\alpha = 100$ 1/м поправка к T_0 равна приблизительно 4° . Хотя этот вклад выходит за пределы ошибок измерений, его величина слишком мала по сравнению с температурой T_0 , которая порядка 300° . Поэтому было бы желательно при измерениях исключить заданную температуру поверхности T_0 и ограничиться величинами, зависящими от интересующих нас параметров температурного профиля и характеристик почв. Для этого целесообразно придать интересующей нас части T_n некоторые особые свойства по сравнению с T_0 с тем, чтобы при специальном методе измерений исключить вклад T_0 .

Таким свойством может быть осцилляция во времени угла $\theta = \theta_0 + \theta$, $\cos \Omega t$, возникающая в результате плоского качания антенны около положения равновесия θ_0 с амплитудой θ . В результате этого принимаемый сигнал T_n оказывается также периодической функцией времени. Гармонический анализ этого сигнала, приводимый ниже, показывает, что амплитуда его первой фурье-гармоники не зависит от T_0 . Это позволяет использовать в качестве метода измерения сигнала его детектирование на частоте Ω и определить в дальнейшем по амплитуде первой гармоники параметры температурного профиля и характеристики почв. Естественно, что такой подход предполагает горизонтальную однородность грунта.

Если угол θ осциллирует во времени с частотой Ω , T_n может быть представлена в виде ряда Фурье

$$T_n(\cos \Omega t) = T_n^{(0)} + T_n^{(1)} \cos \Omega t + T_n^{(2)} \cos 2\Omega t + \dots$$

Постоянная составляющая $T_n^{(0)}$ и амплитуда первой гармоники могут быть вычислены по формулам

$$T_n^{(0)} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} T_n(\Omega t) dt; \quad (2)$$

$$T_n^{(1)} = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} T_n(\Omega t) \cos \Omega t dt, \quad (3)$$

где

$$T_n(\Omega t) = [1 - R^2(\Omega t)] \left[T_0 + \frac{T'(0)}{\alpha} \cos[\theta_0 + \theta_1 \cos \Omega t] \cdot \left(1 - 2 \frac{\gamma}{\alpha} \cos[\theta_0 + \theta_1 \cos \Omega t]\right) \right], \quad (4)$$

Воспользуемся тем обстоятельством, что в достаточно широкой области углов ($0 < \theta \leq \pi/4$) коэффициент отражения $R(\theta)$ может считаться не зависящим от угла θ (3). Это позволяет выполнить интегрирование в (2) и (3), что приводит к следующим выражениям для постоянной составляющей и амплитуды первой гармоники

$$T_n^{(1)} = -2(1 - R^2) \frac{T'(0)}{\alpha} \left[\sin \theta_0 \cdot J_1(\theta_1) - \frac{\gamma}{\alpha} \sin 2\theta_0 \cdot J_1(2\theta_1) \right]; \quad (5)$$

$$T_n^{(0)} = (1 - R^2) \left[T_0 + \frac{T'(0)}{\alpha} \cos \theta_0 \cdot J_0(\theta_1) - \frac{\gamma}{\alpha} \frac{T'(0)}{\alpha} [1 + \cos 2\theta_0 \cdot J_0(2\theta_1)] \right], \quad (6)$$

где $J_0(x)$ и $J_1(x)$ — функции Бесселя.

Как отмечалось выше, поправки к T_0 составляют не более 2–3% ее величины, поэтому формулу (6) можно представить в виде

$$T_n^{(0)} \approx (1 - R^2) T_0. \quad (7)$$

Покажем теперь, что измеряя постоянную составляющую и амплитуду первой гармоники радиояростной температуры на трех длинах волн, для которых выполняется условие $\gamma/\alpha \ll 1$, можно определить влажность w , параметры температурного профиля $T'(0)$, γ и характеристики поглощения α , R .

Имея систему уравнений (5) для трех длин волн и решив ее относительно коэффициентов поглощения, приходим к уравнению

$$\alpha_3^2 k_{12}(\alpha_1 - \alpha_2) + \alpha_2^2 k_{13}(\alpha_2 - \alpha_1) + \alpha_1^2 k_{12} k_{13}(\alpha_2 - \alpha_3) = 0, \quad (8)$$

где

$$k_{1i} = \frac{T_{n1}^{(1)}}{T_{n1}^{(0)}} \frac{(1 - R_i^2)}{(1 - R_1^2)}, \quad i = 2, 3,$$

или, используя (7),

$$k_{1i} = \frac{T_{n1}^{(1)}}{T_{n1}^{(0)}} \frac{T_{ni}^{(0)}}{T_{n1}^{(0)}}, \quad i = 2, 3.$$

Измеряя отношения соответствующих гармоник на разных длинах волн и используя зависимости α_i от влажности $\alpha_i = \alpha_i(w)$ (4), из уравнения (8) определяем влажность w , а затем и сами значения коэффициентов поглощения. Промежуточные уравнения, содержащие величины k_{1i} и γ , позволяют вычислить γ . Заметим, что эти величины определяются в результате измерений отношений гармоник, которые могут быть выполне-

ны, в частности, при $\theta_0 = 0$. Отношения гармоник могут быть измерены с большей точностью, чем сами гармоники, имеющие порядок нескольких градусов. В дальнейшем, измеряя сами гармоники $T_{\gamma}^{(0)}$ и $T_{\gamma}^{(1)}$, можно из (7) и (5) определить величины R и $T'(0)$.

Итак, по измеренным амплитудам нулевой и первой гармоник радиояростной температуры при трех длинах волн, для которых $\gamma/a \ll 1$, при условии задания T_0 (эта величина может быть найдена по данным измерений инфракрасного теплового излучения) и зависимости $\alpha = \alpha_i(w)$ на этих длинах волн, можно определить влажность почвы и температурный градиент у поверхности, коэффициент отражения поверхности и экспоненциальный фактор температурного профиля. Асимптотическое значение температуры на соответствующей глубине можно получить по данным измерений радиояростной температуры на длинах волн, для которых $\gamma/a \gg 1$ (4).

Рассматриваемая дифференциальная методика определения характеристик поверхностного слоя почвы обладает преимуществами по сравнению с предложенной ранее (4), поскольку измеряются лишь величины, содержащие неизвестные параметры температурного профиля, что повышает точность определения последних.

Главная геофизическая обсерватория
им. А. И. Воейкова
Ленинград

Поступило
7 X 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. Я. Кондратьев, Ю. М. Тимофеев, Е. М. Шульгина, ДАН, 194, № 6 (1970). ² А. М. Шутко, Тр. Гидрометеорологич. центра СССР, в. 50, 103 (1969). ³ Л. Т. Тучков, Естественные шумовые излучения в радиоканалах, М., 1968. ⁴ Ю. И. Лещинский, В. М. Анаанских, Г. Н. Лебедева, Тр. Московск. физ.-технич. инст., в 10 (1962).