

多频段微波辐射计对土壤湿度的遥感和理论计算*

金亚秋 张俊荣 赵仁宇

(复旦大学电子工程系) (中国科学院长春地理研究所)

1990 年 1 月 10 日收稿

摘 要

本文采用多频段 (1.4, 5.4, 9.2, 36 GHz) 微波辐射计测量了不同湿度土壤的微波辐射亮度温度。应用非均匀温度湿度廓线的耗散介质的起伏逸散定理和 WKB 法, 进行了理论模式的数值计算, 并和实验结果取得了很好的一致。还对极重函数、非均匀廓线和其它参数作了定量的灵敏度分析。

关键词 多频段微波辐射亮度温度 土壤湿度 起伏逸散定理和 WKB 法 土壤的介电常数和温湿廓线

一、引 言

土壤的微波辐射特征是辐射计空对地遥感中最基本和最重要的问题之一。土壤含水量的遥感为农业、气象和水文等部门提供了必需的信息。同时, 土壤的热发射率和反射率也是植被、冰雪和大气遥感中必须要处理的边界问题。近 20 年来, 土壤微波辐射的遥感研究取得了不少进展^[1,2]。包括发展和应用车载、机载和星载多频段辐射计, 测量不同湿度条件下土壤的热辐射和辐射亮度温度, 测定一些波段上不同结构不同湿度的土壤的介电常数, 以及粗糙表面对亮度温度的影响等等。我国于 1977 年 10 月用中国科学院长春地理研究所微波遥感室 (原属长春物理研究所) 研制的 3cm 微波辐射计以伊尔-14 飞机作平台在新疆哈密地区进行了土壤湿度的航空遥感试验。之后又应用该室研制的多频段辐射计, 对海洋、陆地进行了 30 多次航空遥感飞行试验。并在长春净月潭遥感实验站等地, 进行了多频段、双极化和不同观察角的土壤亮度温度的测量。理论模式方面的进展包括土壤辐射亮度温度的辐射传输理论计算^[3,4], 土壤介电常数的经验解析公式及其验证^[5]和粗糙面散射理论^[6]等。

在微波波段, 水的介电常数 (可达 80) 明显地不同于干土的介电常数 (约 3—5 左右)。因此, 不同水分的土壤表现出明显不同的介电特性, 产生了微波辐射亮度温度与土壤湿度的函数变化。土壤的热发射率可从干土的 0.95 左右变化到湿土的 0.6 以下。由于昼夜和季节的变化, 以及水分的重力渗透, 土壤中具有温度和湿度的分布廓线。土壤的理论模

* 本工作得到国家自然科学基金委员会及霍英东教育基金会的资助。

参加土壤辐射亮度温度测量的还有郑洪来、郭凤莲、赵凯、胡学伟、金吉南、刘宝江和孙志宝。

式可处理成平行分层,或具有连续非均匀温度湿度廓线的半空间非散射的耗散介质。由于土壤的吸收系数大,反照率很小,由土壤粒子(约 0.15mm)或团块结构产生的体散射是可以忽略不计的。应用平行分层和半空间介质的并矢格林函数以及耗散介质的起伏逸散定理,可以计算平行分层和具有非均匀廓线的半空间土壤的辐射亮度温度。但是,在以往计算亮度温度的工作中^[4],未曾包括土壤介电常数廓线与土壤温度、湿度、土壤构造、土壤中水的介电特性等的函数关系,因而未能与实验作拟合比较。事实上,由于土壤中水的介电常数,不仅取决于温度和频率(Debye 公式),而且与土壤的构造和湿度有关。因此,不同湿度下不同结构的土壤,在各频段上的介电常数一直是一个问题。由实验可观察到,当土壤的湿度在未达到它的过渡点湿度 W_T 时,加进土壤中的水紧紧地吸附在土粒上,呈束缚态。水的介电行为象冰一样。而当土壤湿度超过 W_T 后,水恢复其液体的自由态,使土壤的介电常数有明显的增长。于是, Wang 等提出了水有双相表现的土壤介电常数的经验解析公式^[5]。

在本文中,我们给出了用我们研制的多频段微波辐射计(1.4, 5.4, 9.2, 36 GHz)实地测量的土壤的辐射亮度温度值及其与土壤表面湿度测值的对应关系。在一定的温度和湿度分布廓线条件下,用经验解析公式计算了各频段的土壤介电常数的分布。然后,应用连续非均匀耗散介质的起伏逸散定理和求解波动方程的 WKB 法,计算了土壤的微波辐射亮度温度和湿度的定量关系。进而讨论了亮度温度积分中不同频段、不同湿度条件下权重函数的变化,不同极化、不同观察角下亮度温度的变化,以及温度湿度廓线和某些经验参数对亮度温度的灵敏度问题。我们的理论模式数值计算与实验值取得了很好的一致。

二、具有连续温度和湿度廓线的土壤亮度温度的计算

由于土壤的吸收系数远大于散射系数,体散射效应可略去不计,从而可将土壤处理成具有温度和湿度分布廓线的非均匀耗散介质。在耗散介质中,分子电荷随机热运动产生的局部电磁矩引起的介质中的起伏电磁场,向周围发出热辐射。周围的热辐射也在介质中耗散,转换成电荷的热运动。起伏的电磁矩作为麦克斯韦方程中的源项。所得到的波动方程可利用并矢格林函数求解。由起伏逸散定理^[4]、极化的辐射强度或辐射亮度温度可以表示成起伏场的谱相关函数的积分,其与耗散介中介电常数的虚部成正比。于是由介电常数和温度分布廓线可求得热发射和辐射亮度温度。

按土壤中温度和湿度的分布廓线,可将土壤处理成平行分层均匀的耗散介质。辐射亮度温度为各分层贡献的总和。若温度湿度廓线变化平缓,可略去各分层之间的界面反射,则可把土壤看成是具有连续非均匀温度湿度廓线的半空间耗散介质。求解非均匀介质中波动方程的解,而略去非均匀引起的反射,称为 WKB 法。这对于缓慢变化廓线的介质中的解是合适的。这样,我们可得到观察角为 θ 的 α 极化($\alpha = v$ 或 h)的辐射亮度温度为

$$T_{B\alpha}(\theta) = \int_{-\infty}^0 dz T(z) F_{\alpha}(z, \theta, \nu), \quad (1)$$

其中: $T(z)$ 为土壤中温度分布廓线; F_{α} 为 α 极化的权重函数,它是深度 z, θ 和频率 ν

的函数; ν, h 分别表示垂直和水平极化, 且有

$$F_h(z, \theta, \nu) = 2[1 - \gamma_h(\theta)] \frac{|g(0)|}{|g(z)|} \frac{g'(z)}{g'(0)} g''(z) e^{-2 \int_z^0 dx' g''(x')}, \quad (2a)$$

$$F_v(z, \theta, \nu) = 2[1 - \gamma_v(\theta)] \frac{f(z)}{f(0)} \frac{|g(0)|}{|g(z)|} \frac{g'(z)}{g'(0)} g''(z) e^{-2 \int_z^0 dx' g''(x')}, \quad (2b)$$

其中: $(1 - \gamma_\alpha)$ ($\alpha = h, v$) 为表面的发射率。平坦表面的反射率 γ_α 可写为

$$\gamma_h = \left| \frac{k_{0z} - g(0)}{k_{0z} + g(0)} \right|^2 \quad (3a)$$

$$\gamma_v = \left| \frac{k_{0x} \varepsilon(0) - g(0) \varepsilon_0}{k_{0x} \varepsilon(0) + g(0) \varepsilon_0} \right|^2 \quad (3b)$$

若表面为粗糙面, 则须对(3a), (3b)式作修正。(2a), (2b)式中的 g' 和 g'' 分别为函数 g 的实部和虚部, $g(z)$ 和 $f(z)$ 可写为

$$g^2(z) = k_0^2 \frac{\varepsilon(z)}{\varepsilon_0} - k_{0x}^2, \quad (4a)$$

$$f(z) = \frac{|g(z)|^2 + k_{0x}^2}{|\varepsilon(z)/\varepsilon_0|}. \quad (4b)$$

这里的 $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$, $\omega = 2\pi\nu$, $k_{0x} = k_0 \sin \theta$, $k_{0z} = k_0 \cos \theta$ 。由色散关系可见, $g(z)$ 即是垂直方向上的波数 $k_z^2(\theta, z)$ 。而 $f(z)$ 是由垂直极化带来的一个因子。

给定频率 ν 和温度 $T(z)$, 水的介电常数 $\varepsilon_w(z)$ 即可由修正的 Debye 公式^[7]计算。在初始时向干土中加入水分, 大部分水分子紧紧地粘附在泥土上, 其介电行为类同于冰的介电常数 ε_i 。在微波频段, ε_i 可取为常数。我们取 $\varepsilon_i = (3.2 + i0.1)\varepsilon_0$ 。在达到和超过过渡点湿度 W_T 时, 水恢复其自由液体状态, 取 Debye 公式的计算值。过渡点湿度 W_T 的数值一般在 0.17—0.33 之间。沙土的 W_T 之所以比粘土的 W_T 低, 是因为沙土中的水容易达到自由液体状态。由文献[5]可知, 土壤介电常数的经验解析公式为:

当 $W(z) < W_T$ 时,

$$\varepsilon(z) = W(z)\varepsilon_x(z) + [P - W(z)]\varepsilon_s + (1 - P)\varepsilon_r \quad (5a)$$

$$\varepsilon_x(z) = \varepsilon_i + [\varepsilon_w(z) - \varepsilon_i] \frac{W(z)}{W_T} \beta \quad (5b)$$

而当 $W(z) \geq W_T$ 时,

$$\varepsilon(z) = W(z)\varepsilon_x(z) + [W(z) - W_T]\varepsilon_w(z) + [P - W(z)]\varepsilon_s + (1 - P)\varepsilon_r \quad (6a)$$

$$\varepsilon_x(z) = \varepsilon_i + [\varepsilon_w(z) - \varepsilon_i]\beta \quad (6b)$$

这里的 $W(z)$ 为深度 z 处的湿度; P 为土壤的积孔率, 如同文献[5], 我们取 $P = 0.5$ 。 ε_s , $\varepsilon_w(z)$, ε_r 和 ε_i 分别为空气、水、石和冰的介电常数。我们取 $\varepsilon_s = \varepsilon_0$, $\varepsilon_r = (5 + i0.1)\varepsilon_0$, $\varepsilon_w(z)$ 由修正的 Debye 公式在给定的 $T(z)$ 和频率 ν 条件下计算。可以看出, ε_x 是初始时吸收水的介电常数, 它在 ε_w 和 ε_i 中间取的值取决于 W_T 和 β 的选取。 W_T 和 β 作为可选取的参数, 与土壤的结构有关。在我们的计算中, 取 $W_T = 0.2$, $\beta = 0.25$ 。此外, 在低频时, $\varepsilon(z)$ 还要加上由于电导率的虚部 $i\alpha W^2(z)$ ^[8], α 在 0 至 26 之间。在我们的计算中, α 贡献并不大, 因此一律取 $\alpha = 0$ 。在给定的表面温度 $T(0)$ 和表面湿度

$W(0)$ 及其分布廓线 $T(z), W(z)$ 的条件下,由(5)–(6)式计算介电常数廓线 $\epsilon(z)$ 。然后将 $\epsilon(z)$ 代入 (4a,4b) 和 (3a,3b) 式。由此可计算权重函数 $F_a(\theta, z, \nu)$ 和辐射亮度温度 $T_{Ba}(\theta)$ 。所得到的 $T_{Ba}(\theta)$ 与表面湿度 $W(0)$ 的函数关系,用来与实验测量值作对比。

三、实验数据的比较和讨论

我们用中国科学院长春地理研究所研制的四种频段 (1.4, 5.4, 9.2, 36 GHz) 的微波辐射计对裸露的褐土壤进行了不同表面湿度 $W(0)$ 条件下微波辐射亮度温度的测量。

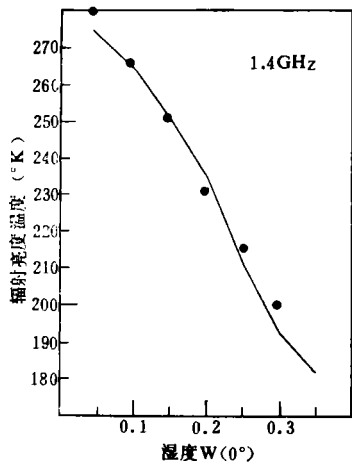


图 1 1.4GHz 的辐射亮度温度和土壤表面湿度的关系

Fig. 1 Brightness temperature vs surface wetness of soil at 1.4 GHz

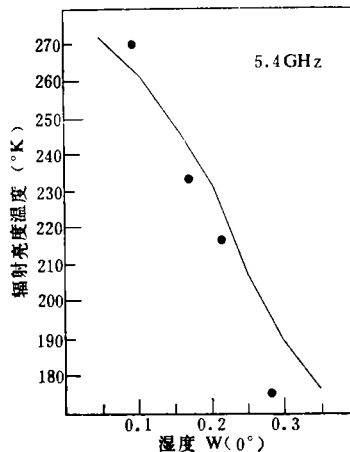


图 2 5.4GHz 的辐射亮度温度和土壤表面湿度的关系

Fig.2 Brightness temperature vs surface wetness of soil at 5.4GHz

观察角为 0° , 地表表面平坦, 表面温度为 296K。用人工泼水后, 在地表浅层取样测定土壤表面湿度 $W(0)$, 同时测量辐射亮度温度。实验数据如图 1—4 中黑点所示。由于水的重力渗透, 我们假定土壤中的湿度廓线如图 5 所示。且设土壤深处湿度为 0.15, 湿度指数递减深度为 50cm。这样, 湿度廓线的解析式可写成:

$$W(z) = W(0) + [0.15 - W(0)](1 - e^{-z/50}), \text{ 当 } W(0) \leq 0.15 \quad (7a)$$

$$W(z) = 0.15 + [W(0) - 0.15]e^{-z/50}, \text{ 当 } W(0) > 0.15 \quad (7b)$$

并假定三种不同的温度廓线 $T(z)$ 如图 6 所示, 且有

$$(1) T(z) = 296 - 10(1 - e^{-z/50}), \text{ K} \quad (8a)$$

$$(3) T(z) = 296 + 10(1 - e^{-z/50}), \text{ K} \quad (8b)$$

以及廓线(2): $T(z) = 296\text{K}$ 。由于我们是在早上测量亮度温度, 所以我们选定温度廓线(3)来与实验数据进行拟合比较。之后对不同的温度廓线和湿度廓线作了灵敏度试验。图 1—4 中的实线是理论计算结果, 它与实验数据吻合得很好。

由于土壤的耗散特性, 不同频段的渗透深度是不同的。从(1)式可看到, 温度的分布

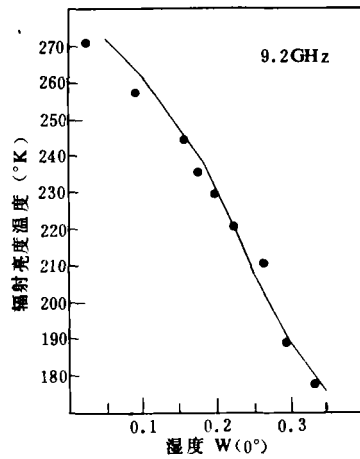


图 3 9.2GHz 的辐射亮度温度和土壤表面湿度的关系

Fig. 3 Brightness temperature vs surface wetness of soil at 9.2 GHz

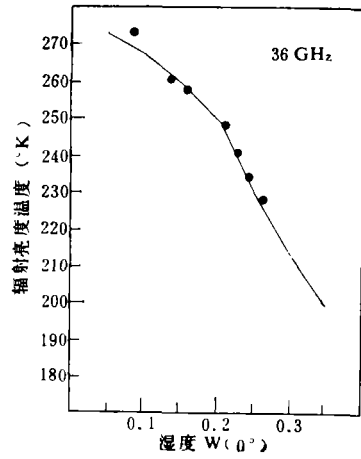


图 4 36GHz 的辐射亮度温度和土壤表面湿度的关系

Fig. 4 Brightness temperature vs surface wetness of soil at 36 GHz

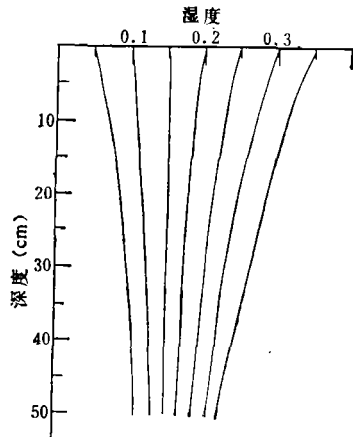


图 5 土壤中的湿度廓线

Fig.5 Wetness profile in soil

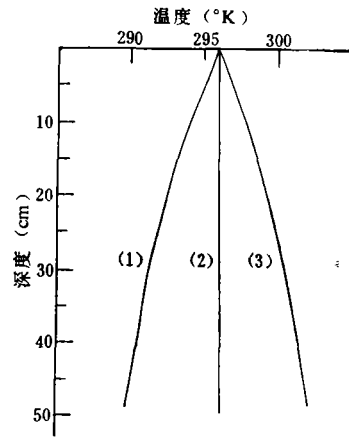


图 6 土壤中的温度廓线

Fig.6 Temperature profile in soil

要乘上权重函数 F_a 。 F_a 的变化可以告诉我们在各频段不同湿度的条件下，不同深度的土壤热辐射对观察到的辐射亮度温度的贡献。图 7—8 给出了 4 种频段在 $\theta = 0^\circ$ 、温度廓线为(3)(如(8b)式所示)时，不同湿度下权重函数随深度的变化。其中 $W_{0.1}$ 是标记表面湿度 $W(0) = 0.1$ ，如此等等。可以看出，1.4GHz 的权重函数覆盖了相当大的深度，即低频的 1.4GHz 热辐射包括了深层土壤的贡献。随着湿度和频率的增高，权重函数将趋近表面层。象图 8 中 9.2GHz 的权重函数在几厘米内就减小了一个数量级，而 36 GHz 的热辐射则完全来自于浅层表面的贡献。

因此可以预计，温度和湿度廓线的变化主要对于较低频率的辐射亮度温度有明显的

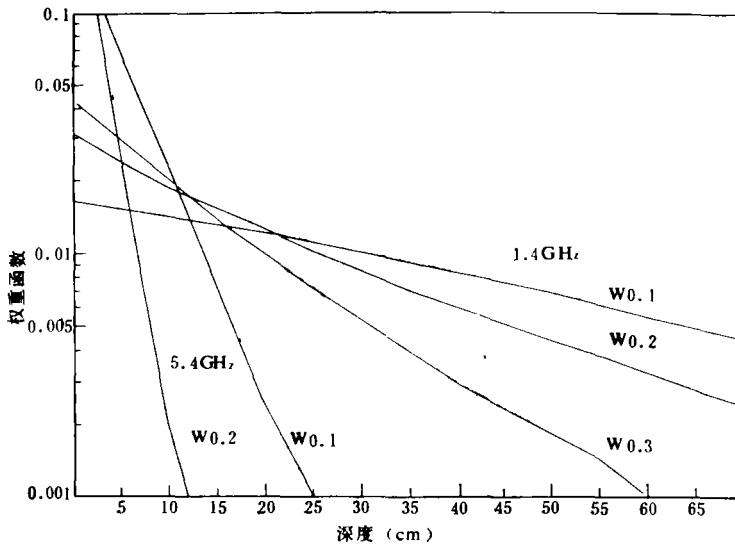


图7 1.4和5.4GHz的权重函数

Fig. 7 Weighting functions for different wetness at 1.4 and 5.4GHz

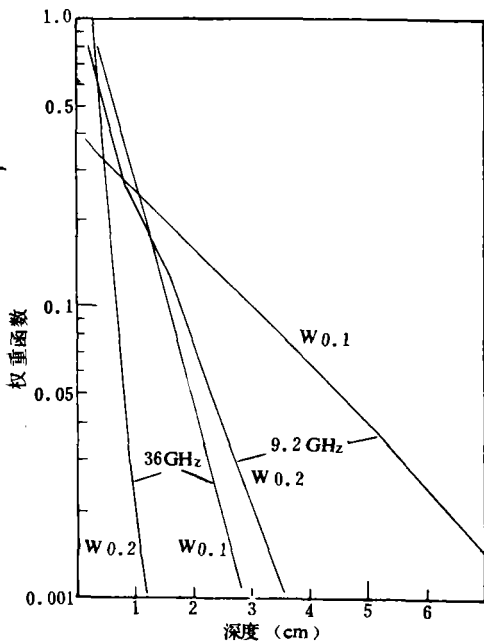


图8 9.2和36GHz的权重函数

Fig. 8 Weighting functions for different wetness at 9.2 and 36 GHz

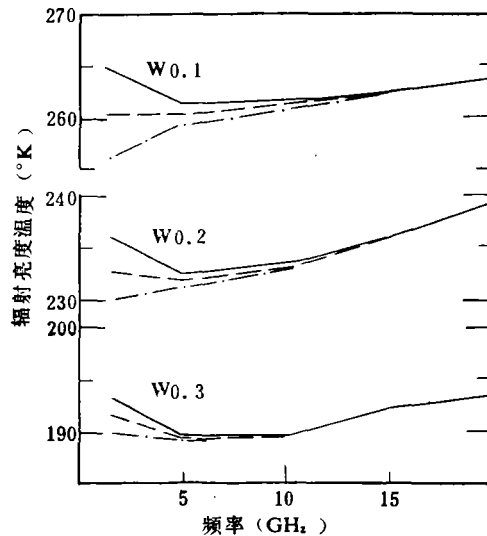


图9 不同温度廓线下的辐射亮度温度

Fig.9 Brightness temperature for different temperature profiles vs frequency

影响。在图9中给出了三种不同温度廓线的辐射亮度温度和频率的关系。其中实线对应于递增的温度廓线 [(8b)式], 虚线对应于常数廓线, 而点划线则对应于递减的温度廓线 [(8a)式]。可以看出, 温度廓线的影响主要在 10GHz 以下的频段上。对湿度分布廓线

[(7a),(7b) 式]作参数改变,也得到类似的结论。在图 10 中给出了在 9.2GHz 下不同湿度时垂直和水平极化辐射亮度温度随观察角 θ 的变化。不同视角的辐射亮度温度有很大的不同。垂直极化的辐射亮度温度总是高于水平极化的亮度温度。各种 θ 角的权重函数大小数值会不同,但它在不同温湿廓线条件下的变化趋势则与 $\theta = 0^\circ$ 时的表现是类同的。

由(5),(6)式可知, W_T 和 β 的选取决定了多相混和的土壤介电常数 $\epsilon(z)$ 中水的介电特性,它们与土壤的结构有关。我们选用 $W_T = 0.2, \beta = 0.25$ 。为比较 W_T 和 β 对亮度温度的灵敏度,我们取 $W_T = 0.25, \beta = 0.25$,得到了图 11 中虚线所示的结果;取 $W_T = 0.2, \beta = 0.3$,则得到了图 11 中点划线表示的结果。可以看到,在过渡点湿度 W_T 附近的湿度上,三者之间的差别比较大。在超过过渡点 W_T 后, β 的影响会减小。因此,土壤的过渡点湿度 W_T 是相当灵敏的参数, W_T 两侧不同湿度的土壤可有明显不同的亮度温度。因此,对 W_T 作进一步的实验研究和数据积累,确定其精确的数值,是十分必要的。

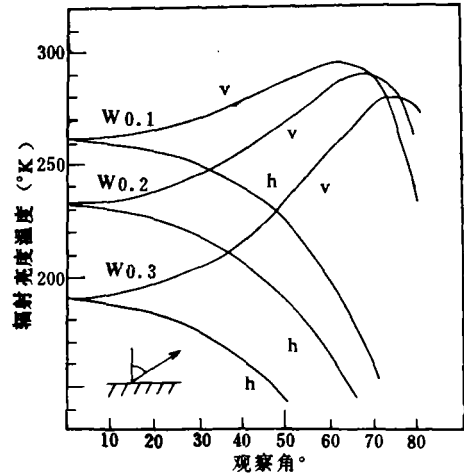


图 10 9.2GHz 不同观察角的辐射亮度温度
Fig. 10 Brightness temperature vs observation angle for different wetness at 9.2 GHz

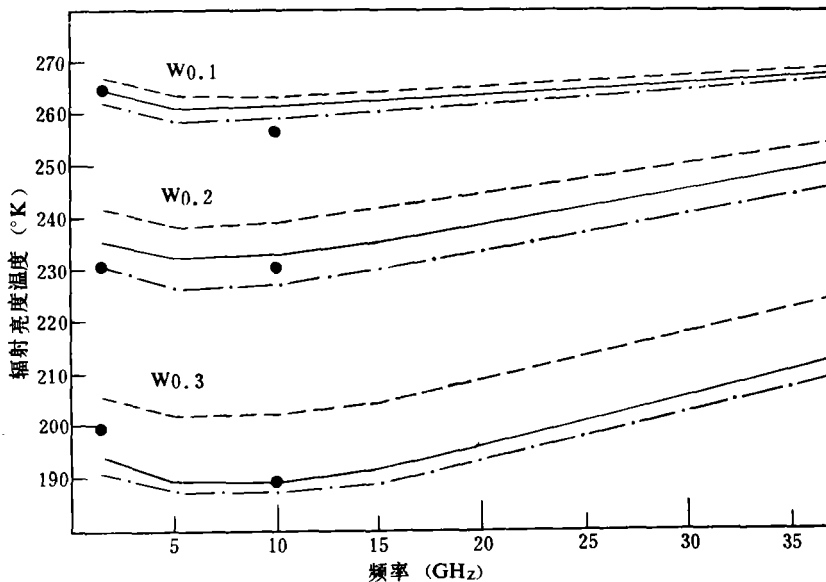


图 11 不同的 W_T 和 β 时的辐射亮度温度
Fig. 11 Brightness temperature vs frequencies for different parameters of W_T and β

四、结 论

我们用 4 种频段的微波辐射计测量了土壤的微波辐射亮度温度和土壤表面湿度的关系。采用多相混合的土壤介电常数的经验解析公式和非均匀温度湿度廓线半空间耗散介质的起伏逸散定理及 WKB 法, 计算了不同频段的辐射亮度温度, 建立了辐射亮度温度和土壤湿度的定量函数关系。理论计算结果和我们的实验数据取得了很好的一致。同时, 我们还研究了不同频段不同湿度下权重函数在不同深度上的大小。这对应于对辐射亮度温度起主要贡献的区域范围。我们研究了温度和湿度廓线对辐射亮度温度的影响, 不同极化不同视角的亮度温度的变化, 以及土壤介电常数中待定参数 W_T 和 β 的选取对辐射亮度温度灵敏度的影响。在频率和湿度较低时, 温度和湿度廓线才有明显的影响, 此时权重函数覆盖了较大的深度, 决定于土壤中水的双相特性的过渡点湿度 W_T 和参数 β 的取值, 当土壤表面湿度在 W_T 的左右时, 对辐射亮度温度的影响是相当灵敏的。

参 考 文 献

- [1] T. J. Schmugge, T. J. Jackson and H. L. McKim, Water Resources Research, 16, 961, 1980.
- [2] F. T. Ulaby, R. K. Moore and A. K. Fung, Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. 3, Addison-Wesley, 1985.
- [3] T. T. Wilheit, IEEE Trans. on Geosci. & Rem. Sens., GE-16, 138, 1978.
- [4] L. Tsang, E. Njoku and J. A. Kong, J. Appli. Phys., 46, 5127, 1975.
- [5] J. R. Wang and T. J. Schmugge, IEEE Trans. on Geosci. & Rem. Sens., GE-18 288, 1980.
- [6] A. K. Fung and M. F. Chen, Radio Science, 16, 289, 1981.
- [7] M. N. O. Sadiku, Applied Optics, 24, 572, 1985.

REMOTE SENSING OF SOIL MOISTURE BY MULTI-FREQUENCY MICROWAVE RADIOMETER AND NUMERICAL CALCULATION*

Jin Yaqiu

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai)

Zhang Junrong and Zhao Renyu

(Changchun Institute of Geography, Academia Sinica, Changchun)

Abstract

Since 1977 microwave brightness temperature of wet soil have been measured by multi-frequency (1.4, 5.4, 9.2 and 36 GHz) radiometer designed by Changchun Institute of Geography, Academia Sinica. The relationship between dualpolarized brightness temperature and soil moisture has been experimentally obtained. In numerical simulation, wet soil was modeled as stratified, half-space dissipated media. By using the dyadic Green's function of stratified media and the fluctuation-dissipation theorem, thermal radiance from such media may be calculated. However, in the previous approaches of the fluctuation dissipation and radiative transfer, the functional dependence of practical soil dielectric profile with soil temperature, wetness, soil structure and so on were lacking. By employing the empirical formulation of multi-phase mixture for soil dielectric profile, and applying the fluctuation dissipation approach in WKB method, we developed a numerical model to simulate the brightness temperature versus soil surface wetness, frequency, observation angle, etc.. Our numerical results are shown to agree well with multi-frequency data measured in our Jing Yu Tang Remote Sensing Site. We also discuss in this paper the contribution from weighting function in radiative transfer at different depth for multi-frequency, and the effects due to wetness and temperature profiles, polarization, and observation angle. It does show quantitatively the functional dependence of brightness temperature on these conditions. Sensitivity of some parameters, such as wetness transition which is closely related with soil structure, is also tested.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China, and Fok Ying Tung Education Foundation.