第 42 卷 第 3 期　　气 象 学 报　　Vol. 42, No. 3
1984 年 8 月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Aug., 1984

微波辐射率仪和地物微波辐射率*

赵柏林　韩庆源　李慧心

（北京大学地球物理系）

提　　要

根据微波辐射传输的特性，研制了微波辐射率仪，它可以隔离外界的干扰，用以研究不同因子对于地物微波辐射率的作用。微波辐射率仪由微波辐射计、辐射室和样品箱三部分组成。本文介绍了它的测量原理；在实验中对于微波辐射率仪的可靠性、稳定性及其精度进行了检验，结果证明其性能是好的，可在地物微波辐射率测量中使用。在实验中，进行了 8.5 mm 和 3.2 cm 波段地物（水、土壤）微波辐射率的测量，并分析其结果。

一、引　　言

地物微波辐射率是一个重要的参数。当微波遥感地物、微波侦察和制导时，地物微波辐射率是其依据。在气象卫星遥感大气时，地物辐射是其背景噪音。鉴于地物微波辐射率之重要，有必要研制微波辐射率仪，用以研究地物微波辐射的特性[1]。它可以屏蔽隔离外界的干扰，以利于分析不同因子对于地物辐射率的影响；例如：土壤湿度对土壤微波辐射率的影响、油膜厚度与水面油污辐射的关系、温度对水面辐射率的影响等。

不同物质，由于其微观结构不同，具有不同的辐射率，物质的辐射率变化，将引起亮度温度的变化；而遥感是以亮度温度变化为信息的，因此开展不同物质辐射率的研究，为遥感判读提供依据，是具有重要意义的。

本文包含下面的一些内容：微波辐射率仪的结构；微波辐射率仪的测量原理；微波辐射率仪的标定；地物微波辐射率的测量。

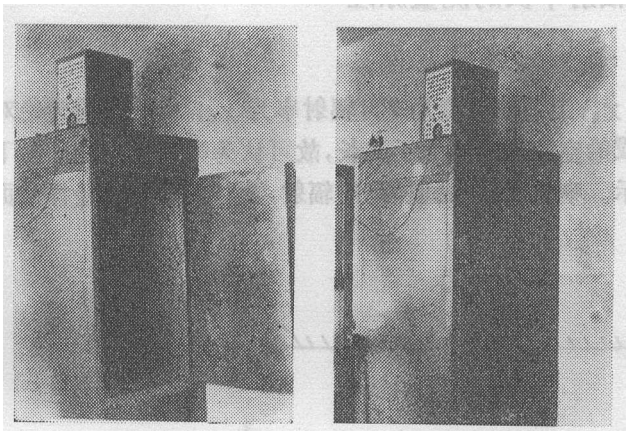
二、微 波 辐 射 率 仪

进行地物辐射率实验室内测量；从而在无外界影响下，研究地物辐射率特性。首先我们研制了微波辐射率仪，以达到能在隔离外界条件下，进行有效测量的目的。然后改变被

* 本文于 1983 年 3 月 22 日收到，1983 年 6 月 21 日收到修改稿。

测样品的状态，以观察微波辐射率的变化，分析辐射率与各因子的关系。

微波辐射率仪的外形，如图 1 所示。微波辐射率仪的结构，如图 2 所示。微波辐射率仪由三部分组成，即微波辐射计、辐射室和样品箱。



(a)　　(b)

图 1　微波辐射率仪的外形

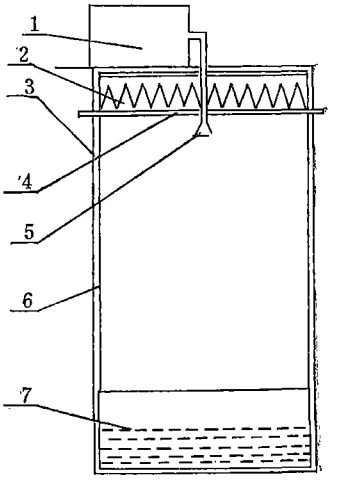


图 2　微波辐射率仪的结构
(1. 辐射计　2. 可加热参考体　3. 辐射率仪外壳　4. 反射体　5. 喇叭天线　6. 内反射壁　7. 样品箱)

1. 微波辐射计：采用两个波段的两个辐射计：a. 波长 8.5 mm 迪克型微波辐射计，其灵敏度为 1 K，机箱内恒温为 55℃。b. 波长 3.2 cm 迪克型微波辐射计，其灵敏度为 1K，机箱内采用局部恒温为 40℃。

2. 辐射室：上部是可加热的参考体，用红铜板制成，这是为了让温度均匀。红铜板制成瓦棱形共 12 条棱，棱顶角 36°。红铜板围成的空腔内，顺每条棱的方向各装有两片电热片，该片不与红铜板直接接触，总功率为 1.2 KW。为解决红铜板与周围框架的绝热问题，在加热箱的四周及上顶都用石棉板内衬，上顶并用玻璃纤维覆盖。为了增加黑度，在红铜板的瓦棱形表面刷上炭黑。在参考体外表面附有两个测温热电偶，配以光电检流计，能检测参考体表面温度，其精度达 0.2℃。加热后，参考体的温度可达 120℃以上。绝对反射体用 1 mm 厚的中硬度铝板制成，它可沿槽插入辐射室上部。当插入铝板时，辐射室的上顶为绝对反射体，当铝板抽出后，辐射室的上顶为可加热参考体。由下节的测量原理可知，这样的两次测量值，可以得出样品的辐射率。喇叭天线的半功率角为 10°，以期使样品表面大于天线接收的范围。喇叭天线内壁镀银，以减小损耗。

由于强度的需要，辐射室的外壳由钢板焊制。同时，为了加强四壁的反射，在四周衬以铝板，铝板围成的空间截面与下面样品箱一致。并尽量减小可能进入辐射室的外界影响。

为了使辐射室内喇叭天线至样品表面的距离足够大，以满足于远场条件，把辐射室的本体做成两米高。在它的四角安装了可调节高度的丝杠，用以调节微波辐射率仪的水平。

3．样品箱：为一个 $80\times80\times40\ cm^3$ 的金属容器，在其四壁衬以铝板。为了清洗、更换样品等的方便，做成带轮子的活动箱体。在样品箱推入辐射率仪后，箱的四侧挡上活叶铝板，以消除由空隙而进入辐射率仪的外界影响。

三、辐射率仪的测量原理

其测量原理如下：

设样品的温度为 T_s，辐射率为 χ_s；上顶的温度为 T_c，辐射率为 χ_c。由于四周为绝对反射体，其辐射率为零。而且其围成的空腔尺度远大于波长，故可认为喇叭天线处于上下两无限伸展的平面之中，如图 3 所示。喇叭天线收到样品的辐射，及对上顶辐射经样品面反射后的辐射，即 $T_b^{(1)}$ 为

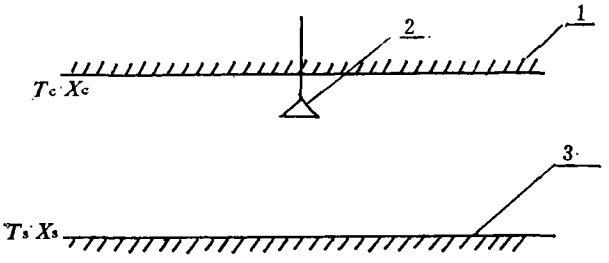


图 3 辐射率仪内简化模式图
（1．上顶 2．喇叭天线 3．样品平面）

$$T_b^{(1)}=\chi_sT_s+\chi_cT_c(1-\chi_s) \tag{1}$$

经上顶及样品面各再一次反射后的辐射，即 $T_b^{(2)}$ 为

$$T_b^{(2)}=T_b^{(1)}(1-\chi_c)(1-\chi_s) \tag{2}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

喇叭天线收到的亮度温度 T_b 为

$$\begin{aligned}T_b&=T_b^{(1)}+T_b^{(2)}+T_b^{(3)}+\cdots\cdots\\&=T_b^{(1)}[1+(1-\chi_c)(1-\chi_s)+(1-\chi_c)^2(1-\chi_s)^2+\cdots]\end{aligned} \tag{3}$$

则

$$T_b=\frac{\chi_sT_s+\chi_cT_c(1-\chi_s)}{1-(1-\chi_c)(1-\chi_s)} \tag{4}$$

用绝对反射体或参考体为上顶进行两次测量，由此可以得到样品的辐射率 χ_s，即

$$\chi_s=1-\frac{T_{b1}-T_{b2}}{[(\chi_{c1}T_{c1}-\chi_{c2}T_{c2})+(1-\chi_{c1})T_{b1}-(1-\chi_{c2})T_{b2}]} \tag{5}$$

其中，T_{b1},T_{c1},χ_{c1} 是上顶为参考体时微波辐射计测得的亮度温度、上顶的温度和辐射率；T_{b2},T_{c2},χ_{c2} 是上顶为绝对反射体时微波辐射计测得的亮度温度、上顶的温度和辐射率。

由(4)式可以看出，当上顶为绝对反射体，即 $\chi_{c2}=0$，而 $T_{b2}=T_s$，此时测得的亮度温度和样品的温度相等，而与样品的材料无关。

四、辐射率仪的定标

在隔绝外界的辐射率仪中，上顶为加热参考体，下底铺上铝板，则由(4)式，喇叭天线接收到的亮度温度 T_b，由于 $\chi_s=0$，故有

$$T_b=T_c \tag{6}$$

即此时的亮度温度等于上顶温度，而与上顶的材料及辐射率无关。上顶的温度可用热电偶及光电检流计精确地测出，而辐射计接收到的能量，以输出电压 V_b 在数字电压表上显示。这样，由于每一个 T_b，其值等于上顶温度 T_c，都对应一个 V_b 值；不断改变上顶的温度 T_c，就可以得到若干组 T_b 和 V_b 的对应值，经统计回归，可以得到 T_b 和 V_b 之间的关系。

1．辐射率的测量中，铝板辐射率的影响

按[2]中的数据，铝的电导率 σ 值为

$$\sigma=3.43\times10^{7}\text{ohm}\cdot\text{s/m} \tag{7}$$

相对介电常数 ε_r 为

$$\varepsilon_r=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}-j\frac{\sigma\lambda}{2\pi c\varepsilon_0}=\varepsilon'-j\varepsilon'' \tag{8}$$

式中，$\varepsilon_0=8.85419\times10^{-12}\text{c}\cdot\text{v}^{-1}\text{m}^{-1}$，$c=3\times10^{8}\text{m/s}$。于是

$$\varepsilon_r=\varepsilon'-j\,60\,\lambda\sigma \tag{9}$$

对于金属体 $\varepsilon'=1$。[3]

由 Fresnel 公式，当 0°天顶角向下观测时，下垫面的反射率 R 为[4]

$$R=\frac{(p-1)^2+q^2}{(p+1)^2+q^2} \tag{10}$$

其中，

$$p=\left\{\frac{1}{2}\left[(\varepsilon'^2+\varepsilon''^2)^{\frac{1}{2}}+\varepsilon'\right]\right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$q=\left\{\frac{1}{2}\left[(\varepsilon'^2+\varepsilon''^2)^{\frac{1}{2}}-\varepsilon'\right]\right\}^{\frac{1}{2}}$$

辐射率 χ、吸收率 α 和反射率 R 之间的关系为

$$\chi=\alpha=1-R \tag{11}$$

由此求得在 8.5 mm 波段铝的辐射率 $\chi=6.76\times10^{-4}$，而在 3.2 cm 波段铝的辐射率 $\chi=3.48\times10^{-4}$。

表 1　用铝板辐射率为零引起亮度温度的误差

波　长	上顶温度 T_c(K)	300	320	340	360	380	400
8.5 mm	亮度温度差 ΔT_b(K)	−0.0075	−0.0225	−0.0376	−0.0526	−0.0676	−0.0826
3.2 cm	亮度温度差 ΔT_b(K)	−0.0086	−0.0146	−0.0266	−0.0386	−0.0626	−0.0746

在 8.5 mm 波段，下垫面为铝板，设 $T_s=290$ K，用(4)式计算亮度温度 T_b，铝板辐射率分别为 0 与 6.76×10^{-4} 时引起亮度温度差 ΔT_b 值(见表 1)。同样，在 3.2 cm 波段，下垫面为铝板，铝板辐射率分别为 0 与 3.48×10^{-4} 时引起亮度温度差 ΔT_b 值，亦示于表 1 之中。

由表 1 可见，在 8.5 mm 和 3.2 cm 波段，用铝板辐射率 $\chi=0$ 或反射率 $R=1$ 的近似，引起亮度温度的误差是很小的，可以略去不计。

2. 上顶参考体辐射率的测量

由(5)式可知，要测出样品的辐射率 χ_s，需要上顶参考体辐射率 χ_{c1} 作为已知量。在这里讨论如何标定上顶参考体辐射率 χ_{c1}。

在这里将铝板($\chi_{c2}=0$)和水(χ_s)的辐射率作为已知量。以水为样品，上板分别用参考体和反射体(铝板)进行测量。此时(5)式为

$$\chi_s=1-\frac{T_{b1}-T_{b2}}{\chi_{c1}T_{c1}+(1-\chi_{c1})T_{b1}-T_{b2}} \tag{12}$$

即

$$\chi_{c1}=\frac{\chi_s}{1-\chi_s}\times\frac{T_{b1}-T_{b2}}{T_{c1}-T_{b1}} \tag{13}$$

或

$$Y=\frac{1}{A}\chi_{c1}x \tag{14}$$

其中，

$$A=\frac{\chi_s}{1-\chi_s},\quad Y=T_{b1}-T_{b2},\quad x=T_{c1}-T_{b1}。$$

测出若干组 Y 和 x 的值，由此可回归得出系数 χ_{c1} 值。

在本实验中所用的高温参考体，在其温度变化范围内，其辐射率几乎与温度无关。在 8.5 mm 波段，$\chi_{c1}=0.90$；在 3.2 cm 波段，$\chi_{c1}=0.61$。

3. 辐射计增益缓变的测量

在测量过程的时间较长时，辐射计增益将有不可忽视的缓变，对测量结果影响较大。这里讨论如何消除它的影响。

首先进行标定，并将亮度温度 T_b 与输出电压 V_b 间的关系，统计回归为一条直线：

$$T_b=kV_b+b \tag{15}$$

其中 k,b 为常数。

将上顶为反射体测量时，其 $\chi_{c2}=0$，$T_{b2}=T_s$。将上顶为参考体测量时，其 T_{c1},χ_{c1} 是上顶温度和辐射率，亮度温度 $T_{b1}=kV_b+b$。由(5)式有

$$\chi_s=1-\frac{kV_b+b-T_s}{\chi_{c1}T_{c1}+(1-\chi_{c1})\,(kV_{b1}+b)-T_s} \tag{16}$$

其中，样品温度 T_s 用其他方法测量，如温度计测量其精度为 0.1℃。所谓增益的变化，即 k 的变化。

下面是对 8.5 mm 和 3.2 cm 波段两个辐射计的标定结果。表 2 和表 3 给出 10 次标定的数值。从标定实验资料拟合(15)式的相关系数 $\gamma=0.9979$—0.9999。各次实验增益 k 与平均增益之间，可有 3—4%的变化。因此在每次实验前后都要进行标定才能消除增益变化的误差。

表 2　8.5 mm 辐射计标定的结果

($T_b = kV_b + b$)

序　　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
增　益 k(°/mv)	1.23	1.24	1.23	1.27	1.25	1.32	1.30	1.28	1.33	1.27
相关系数 γ	0.9998	0.9999	0.9985	0.9992	0.9999	0.9997	0.9996	0.9979	0.9995	0.9998

表 3　3.2 cm 辐射计标定的结果

($T_b = kV_b + b$)

序　　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
增　益 k(°/mv)	0.084	0.0928	0.0876	0.0899	0.0872	0.0831	0.0835	0.0921	0.0818	0.0883
相关系数 γ	0.9999	0.9999	0.9998	0.9997	0.9996	0.9985	0.9995	0.9996	0.9999	0.9991

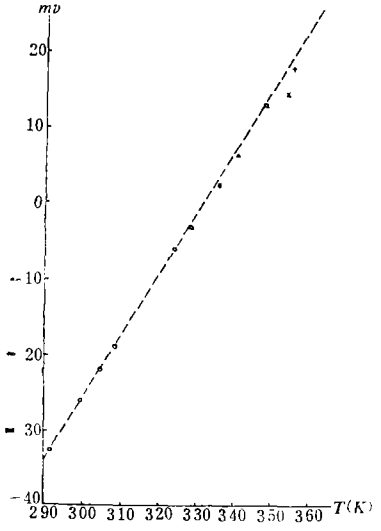


图 4　8.5 mm 辐射计标定曲线及长时间工作情况

○ 标定用的点　△ 工作后两小时
△ 工作后两个半小时　□ 工作后三小时
■ 工作后三个半小时　+ 工作后四小时
× 工作后四个半小时　✱ 工作后五小时

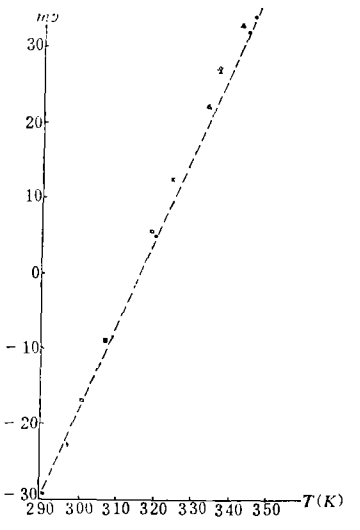


图 5　3.2 cm 辐射标定曲线及长时间工作情况

图例同图 4

若实验工作时间太长，亦要增加标定，以消除误差。图 4,5 分别给出 8.5 mm 和 3.2 cm 辐射计长时间工作的情况。从图中可见，实验工作加长后，点子渐渐偏离开始标定的曲线。所以若进行长时间的观测，中间应增加标定，以消除增益变化的影响。

五、微波辐射率仪的测量

1．水的辐射率：在这里测量不同温度下，水面辐射率。

水是极性分子，具有固有的电矩；在外场作用下，固有电矩有转向同外场平行的趋势。水的介电常数随温度变化很大。在微波段，水的介电常数 ε_w，由 Debye 公式表达如下[5]：

$$\varepsilon_w=\varepsilon_\infty+\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{1+(\lambda_s/\lambda)^2}-j\left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{1+(\lambda_s/\lambda)^2}-j\frac{2\sigma_s\lambda}{c} \tag{17}$$

式中，ε_s 为静电介电常数，ε_∞ 为光学介电常数，λ_s 为驰豫波长，λ 为波长，σ_s 为水的电导率，c 为光速。ε_s，λ_s，σ_s 与温度和盐度的关系，如图 6—8 中所示[5]。

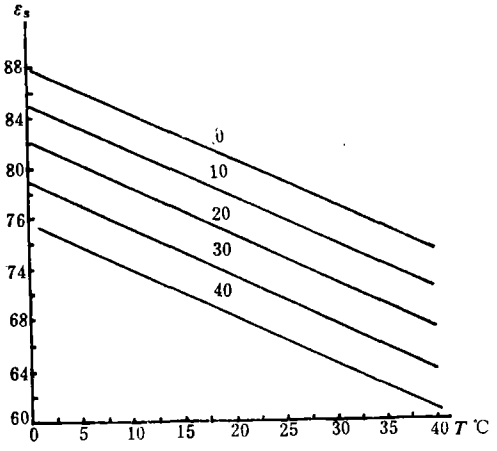


图 6 静电介电常数 ε_s 与温度和含盐量的关系

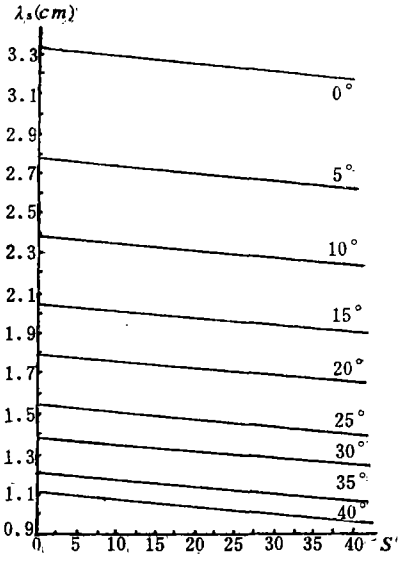


图 7 驰豫波长 λ_s 与温度和含盐量的关系(横坐标为‰)

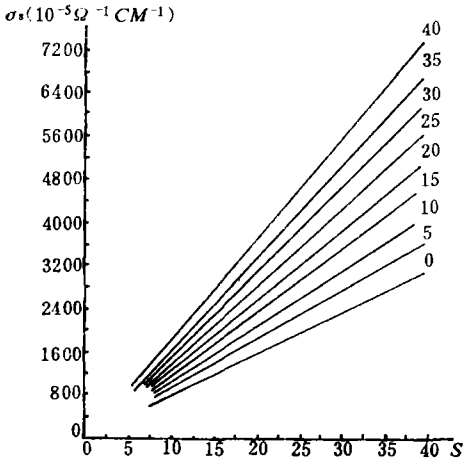


图 8 静电电导率 σ_s 与温度和含盐量的关系(横坐标为‰)

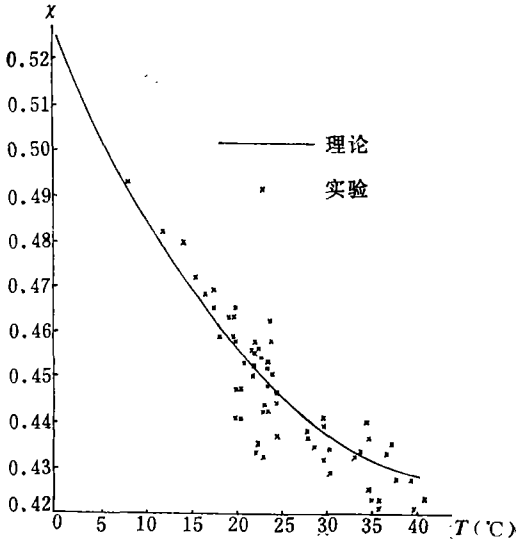


图 9 水的辐射率与温度的关系(8.5 mm)

在微波辐射率仪内进行了不同温度水面辐射率的测量，并用(10)(11)(17)式计算其理论值，见图 9 中所示。由于测量的时间是在夏季，低温水不易获得，故低温段的数据较少，但也可以看出辐射率随水温变化的趋势，实验值和理论值是一致的。

2．土壤的辐射率：这里测量不同湿度砂土的辐射率。

土壤介电常数的实部 ε' 和虚部 ε'' 都是随着土壤湿度增加而加大的[6]。土壤湿度加大时，反射率增加，辐射率减小。

在微波辐射率仪中测量不同湿度砂土表面的辐射率；8.5 mm 和 3.2 cm 波段砂土微波辐射率随湿度的变化，见图 10,11 中所示。实验值和理论值是一致的。

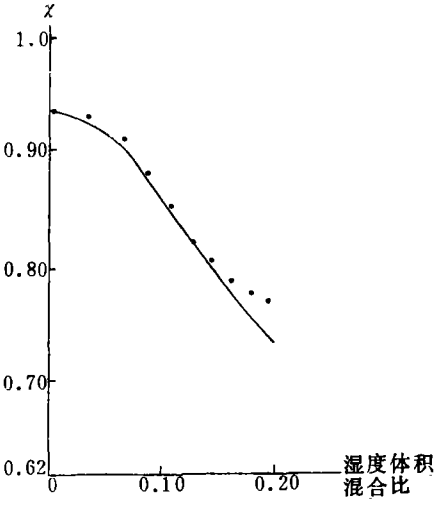


图 10　8.5 mm 波段砂土辐射率和湿度的关系

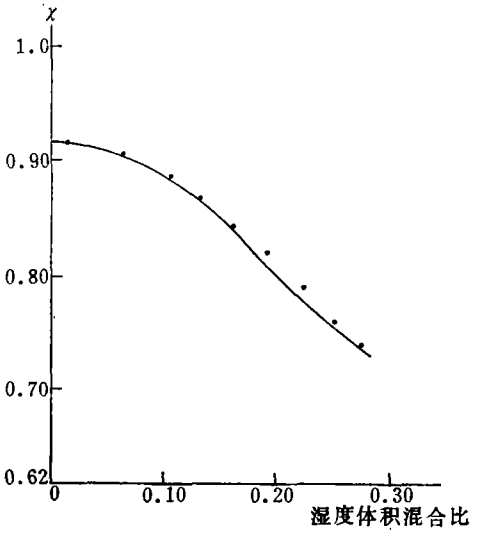


图 11　3.2 cm 波段砂土辐射率和湿度的关系

六、讨　　论

这里讨论微波辐射率仪引起误差的因素及其影响。在应用微波辐射率仪进行测量时，其误差由(5)式可得：

$$\frac{\Delta\chi_s}{\chi_s}=\Delta\chi_{c1}\left(\frac{T_{c1}-T_{b1}}{A'}+\frac{T_{c1}-T_{b1}}{B'}\right)+\Delta\chi_{c2}\left(\frac{T_{c2}-T_{b2}}{A'}+\frac{T_{c2}-T_{b2}}{B'}\right)$$
$$+\Delta T_{c1}\left(\frac{\chi_{c1}}{A'}+\frac{\chi_{c1}}{B'}\right)+\Delta T_{c2}\left(\frac{\chi_{c2}}{A'}+\frac{\chi_{c2}}{B'}\right)$$
$$+\Delta T_{b1}\left[\frac{\chi_{c1}}{A'}+\frac{(1+\chi_{c1})}{B'}\right]+\Delta T_{b2}\left[\frac{\chi_{c2}}{A'}+\frac{(1+\chi_{c2})}{B'}\right]$$

其中，

$$A'=\chi_{c1}(T_{c1}-T_{b1})-\chi_{c2}(T_{c2}-T_{b2})$$
$$B'=\chi_{c1}T_{c1}-\chi_{c2}T_{c2}+(1-\chi_{c1})T_{b1}-(1-\chi_{c2})T_{b2}$$

以水的测量为例，8.5 mm 波段两次测量是 $T_{c1}=368$ K，$T_{c2}=296$ K，及 $T_{b1}=334$ K，$T_{b2}=293$ K，$\chi_{c1}=0.90$，$\chi_{c2}=0.007$，在此情况下，$\chi_s=0.447$，此时 $\frac{\Delta\chi_s}{\chi_s}=0.060$。

在实际测量中，可用大量的实验值进行平均，以使测量精度提高。

为了隔离外界干扰，研究不同因子对于地物微波辐射率的作用；根据微波辐射传输特性，研制的微波辐射率仪的性能是良好的，并在地物微波辐射特性研究中取得有益的结果。

参 考 文 献

[1] Мелентев В. В., Ю. И. Рабинович, Методы Лабораторных измерений излучательных свойств в сантиметровом диапазоне, Труды ГГО 291, 3—8, 1972.
[2] Harvey A. E., Microwave Engineering, Academic Press Inc., 249, 1963.
[3] Stratton J. A., Electromagnetic Theory, New York, McGraw-Hill Book Co., 321—327, 1941.
[4] Axelsson S., O. Edvardsson, Microwave radiometry and its potential application to earth resource surface, Saab-Scania Report RL-O-3-R15, 1971.
[5] Башаринов А. Е., А. С. Гурвич, С. Т. Егоров, Радиоизлучение земли Как Планеты, «Наука» М., 9—29, 1974.
[6] Wang J. R., T. J. Schmugge, A. Chang, R. W. Newton, An empirical model for the complex dielectric permittivity of soil as a function of water content, IEEE Trans. GE-18, 288—295, 1980.

MICROWAVE EMISSIVITY MEASURING METER AND MICROWAVE EMISSIVITY OF THE SUBSTANCE COMPOSED EARTH SURFACE

Zhao Bolin, Han Qingyuan, Li Huixin

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

By the characteristics of microwave radiation transfer, a microwave emissivity measuring meter is constructed. This equipment may be used to study the factors which have influence on microwave emissivity of the substance composed earth surface in an isolation condition. The microwave emissivity measuring meter consists of three parts radiometer, radiation chamber and sample box. In this paper, the principle of measurement, the reliability and accuracy of experiment and the stability of instrument were studied in lab. The results show that the characteristics of microwave emissivity measuring meter were satisfied. It is suitable for measuring the microwave emissivity of the substance composed earth surface. In this paper, the experimental results of microwave ($\lambda=8.5$ mm and $\lambda=3.2$ cm) emissivity of water and sand were shown and discussed.