第 42 卷 第 1 期　　气 象 学 报　　Vol. 42, No. 1
1984 年 2 月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Feb., 1984

地物微波反射率特性的研究*

赵柏林　赵文中　杜金林

（北京大学地球物理系）

提　　要

本工作对于地物微波反射率特性进行了原理和实验的研究。为此研制了微波反射率仪，讨论了近场反射过程中的微波辐射传输，对于X波段的地物微波反射率特性进行了测量，包括水、砂土、水面油污等，测量结果和理论预期是符合的。本文讨论了反射率特性及其在微波遥感中的应用。

一、引　　言

物体的反射特性表征着目标的性质，因此地物微波反射率是卫星气象、雷达气象、地物遥感、侦察与制导方面重要的信息。为了提高遥感的效能，有必要对它进行深入的研究。为此我们开展了微波反射率原理的研究，微波反射率仪的研制，地物微波反射率特性测量实验等工作，为遥感工作提供原理依据。

二、实 验 原 理

1．镜面微波反射率：按 Rayleigh 判据，当平面上起伏高度 h 为[1]

$$h \leqslant \frac{\lambda}{8\cos\theta} \tag{1}$$

（θ 为入射角，λ 为波长）

则平面可认为是镜面，按 Fresnel 原理，镜面反射率为[2,3]

$$R_s = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon'' - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon'' - \sin^2\theta}} \right|^2 \tag{2}$$

$$R_p = \left| \frac{(\varepsilon' - j\varepsilon'')\cos\theta - \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon'' - \sin^2\theta}}{(\varepsilon' - j\varepsilon'')\cos\theta + \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon'' - \sin^2\theta}} \right|^2 \tag{3}$$

其中，$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$ 为物体的相对介电常数，R_s，R_p 是 S，p 极化的反射率，S 极化是电向量与反射面平行的分量（即水平极化），p 极化是电向量与入射面平行分量（即垂直极化）。取电向量的反射系数 Γ 为

* 本文于 1982 年 3 月 18 日收到，1982 年 12 月 10 日收到修改稿。

$$\Gamma=\rho e^{-j\Phi} \tag{4}$$

（ρ 为模量，Φ 为相角）

及

$$R=|\Gamma|^2=\rho^2 \tag{5}$$

由(2—3)式有

$$R_s=\frac{(p-\cos\theta)^2+q^2}{(p+\cos\theta)^2+q^2} \tag{6}$$

$$R_p=\frac{(\varepsilon'\cos\theta-p)^2+(\varepsilon''\cos\theta-q)^2}{(\varepsilon'\cos\theta+p)^2+(\varepsilon''\cos\theta+q)^2} \tag{7}$$

及

$$\Phi_s=\mathrm{arctg}\frac{q}{p-\cos\theta}-\mathrm{arctg}\frac{q}{p+\cos\theta}+180^\circ \tag{8}$$

$$\Phi_p=\mathrm{arctg}\frac{\varepsilon''\cos\theta-q}{\varepsilon'\cos\theta-p}-\mathrm{arctg}\frac{\varepsilon''\cos\theta+q}{\varepsilon'\cos\theta+p} \tag{9}$$

（Φ_s,Φ_p 为 s,p 极化的相角）

其中，$p-jq=\sqrt{\varepsilon'-j\varepsilon''-\sin^2\theta}$，而

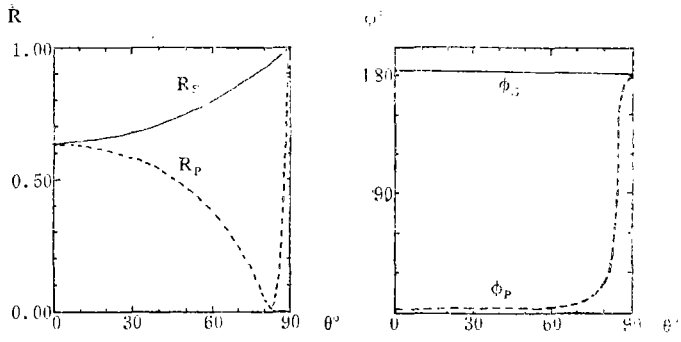
$$p=\sqrt{\frac{1}{2}[\sqrt{(\varepsilon'-\sin^2\theta)^2+\varepsilon''^2}+(\varepsilon'-\sin^2\theta)]}$$

$$q=\sqrt{\frac{1}{2}[\sqrt{(\varepsilon'-\sin^2\theta)^2+\varepsilon''^2}-(\varepsilon'-\sin^2\theta)]}$$

微波反射率是介电常数的函数。如水的介电常数 ε，按德拜(Debye)公式为[4]

$$\varepsilon=\varepsilon_\infty+\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{1+(\lambda_s/\lambda)^2}-j\frac{\lambda_s}{\lambda}\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{1+(\lambda_s/\lambda)^2} \tag{10}$$

其中，$\varepsilon_\infty,\varepsilon_s,\lambda_s$ 为常数。在 $\lambda=3.2$ cm 时，温度 $t=30$℃，水的复介电常数 $\varepsilon_{水}$ 为 $66.71-j24.97$。由(6)—(9)式，可以求得 R_s,R_p,Φ_s,Φ_p 之值，有如图 1 中所示。



(a) 反射率　　(b) 相角

图 1 水的反射率与入射角的关系
（$\lambda=3.2$ cm，$t=30$℃，$\varepsilon_{水}=66.71-j24.97$）

2．近场中微波反射率测量：在实验室内测量微波反射率是用微波反射率仪，它是有源发射，以待测面为靶，测量其反射性能。测量时用两种方法：直接法和比较法。

直接法是根据样品微波反射过程中的微波传输方程，直接测量其反射率。其公式为[5]

$$R_\xi=\frac{P_{\xi r}}{P_0\eta_\xi(\theta)\cos^2\theta} \tag{11}$$

其中，$\xi=S$ 或 ρ，表示极化状态。$P_{\xi r}$ 是 ξ 极化状态下，由发射天线对反射面照射，接收天线收到的反射功率。P_0 是同样实验条件下理想反射面正入射时接收天线接收到的反射功率。$\eta_\xi(\theta)$是倾斜入射时的相对修正。而[5]

$$P_0=\frac{P_tG_t\pi d_c^4AB}{64\ L^2L_1^2\lambda^2}\Psi_\xi(0) \tag{12}$$

$$\eta_\xi(\theta)=\frac{\Psi_\xi(\theta)}{\Psi_\xi(0)} \tag{13}$$

这里 P_t 为发射天线发射的功率，G_t为发射天线的增益，d_c 为圆形待测面的直径，A，B 分别为接收喇叭天线的口径尺寸，L 为发射天线相位中心与待测面中心的距离，L_1 为待测面中心与接收天线喇叭口面中心的距离。$\Psi_\xi(\theta)$是入射角为 θ 时因近场反射面相位差引起增益减小、反射面照射不均匀引起增益减小及天线口面对待测面反射辐射的效率等因子的订正系数。$\Psi_\xi(\theta)$，$\eta_\xi(\theta)$ 的数值示例有如图 2 。

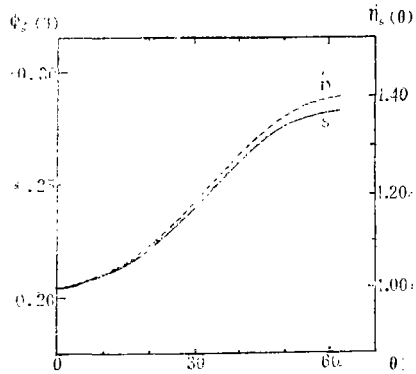


图 2　$\Psi_\xi(\theta)$，$\eta_\xi(\theta)$ 与入射角 θ 的关系
($\lambda=3.2$ cm　$P_t=34$ mw　$G_t=80$　$A=13.5$ cm　$B=9.0$ cm　$d_c=28.6$ cm　$L=1605$mm　$L_1=1545$ mm)

比较法测量反射率是

$$R_\xi=R_0\frac{P_{\xi r}}{P_{r0}} \tag{14}$$

其中，R_0 是已知的物体表面的反射率，P_{r0} 是同样实验条件下以已知反射率的表面为反射面时接收天线接收到的反射辐射的功率。通常用导电良好的金属板作为标准反射面，这时 $R_0=1$。

在测量中，要用直接法和比较法两者彼此校正，以保证实验记录准确无误。

3．复介电常数的测量[6]：在选择测量物质介电常数方法时，要考虑地物的介电性质。波导终端短路法，适合测量损耗小的物质，如岩石、土壤、岩石、石油等，也可以用于损耗大的物质，如水等。地物大部分属于上述两种情况。波导终端短路法的装备有如图 3 。它是用比较有样品和无样品的驻波波形来测算样品的复介电常数。它的要点是：首先，由驻波比及驻波比极小值位置计算归一化输入阻抗、以及样品厚度和测出的波导充气部分的波导波长来计算介质波导的传播常数；最后，由充介质波导的传播常数、自由空间的 TEM 波长和波导截止波长来计算样品的介电常数。例如，在 $\lambda=3.2$ cm，$t=30$℃，波导终端短路法测得复介电常数 $\varepsilon_水=66.7-j\ 25.0$，用(10)式计算值为 $\varepsilon_水=65.61-j\ 25.77$。

三、微波反射率仪

为了测量微波反射率，我们研制了微波反射率仪，它的结构有如图 4，它的外形有如

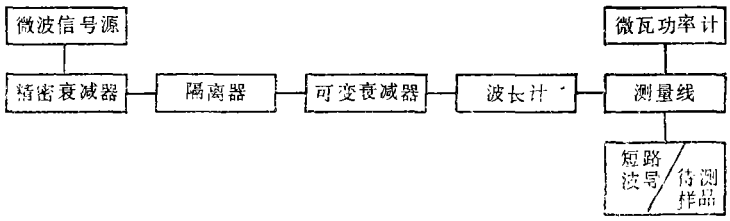


图 3 波导终端短路法测量介电常数

图 5 。

1. 无反射吸收背景：只有背景的反射小到可以忽略，才能认为接收反射功率全部来自待测面，为了使背景的反射功率小于待测面反射功率的 1%，要求背景的反射率小于 0.001。我们使尖劈型吸收材料，频率在 4.6—40 GC 之间，其吸收衰减为 35 db，反射率小于 0.05%；入射角大于 55°时反射率开始明显增加(55°时约为 0.3%，60°时近于 1%)。在待测样品容器和尖劈方阵之间，填充吸收碎块，相当于半波尺度大小，它起着吸收和漫射的作用。在实验中使入射角小于 60°。对于无反射背景大小的要求，设天线波瓣宽度为 2ϕ，实验时最大的入射角为 θ_M，天线位相中心与无反射吸收背景被照射中心的距离为 L，假设微波吸收材料水平面布置，如图 6 。T 代表发射天线，R 代表接收天线。当天线旁瓣很小时，微波吸收材料只要能复盖天线主瓣照射区就够了。取最大入射角时，略大于 2 倍主瓣半功率波瓣角复盖的面积。在实验 $\lambda=3.2$ cm 波段时，$\phi=19°$（天线半功率波瓣半宽度为 8.5°），$\theta_M=60°$，$L=1605$ mm，无反射背景的大小是长度为 2768 mm，宽度为 1105 mm。

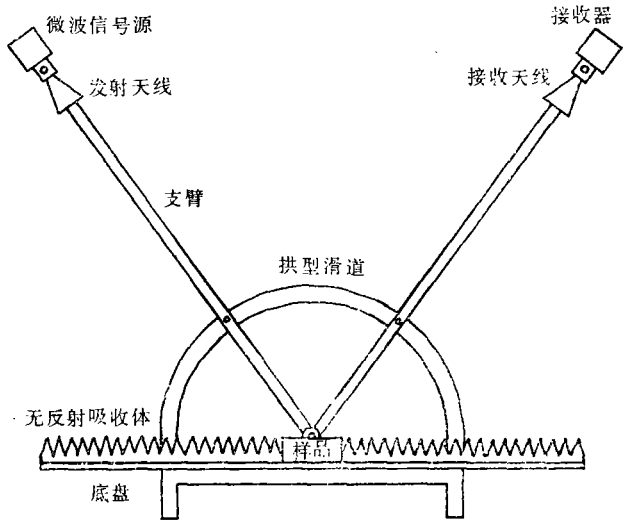
2. 天线：天线要求旁瓣小、增益大，但是天线重量不能太大。在波瓣宽度的最大允许值下，保证测试支架和测试环境对测量无影响，即满足无反射吸收背景的要求。本实验采用角锥喇叭天线，$\lambda=3.2$ cm 波段方向图，有如图 7，8。从图中可以看出，主轴附近 H 主面和 E 主面的方向图是对称的。半功率波瓣半宽度为 8.5°，H 主面有旁瓣，E 主面有几个很小的旁瓣；它的主瓣零点间半宽度约为 19°；第一旁瓣约为 −11 db，在 25°附近；第二旁瓣约为 −17 db，在 57°附近；第三旁瓣约为 −20 db，在 71°附近。根据方向图的分析要防止主瓣直接耦合，最大可测的入射角为 $90°-\phi_0=71°$。同时要使旁瓣不直接耦合，取耦合系数在 −25 db 以下，对于 E 面（P 极化）最大可测的入射角为 60°，对于 H 面（S 极化）最大可测的入射角为 65°。

根据前一段的讨论知道入射角小于 60°时，尖劈型微波吸收材料的性能良好，因此天线的选择是合理的。入射角小于 60°的测量结果是可用的。

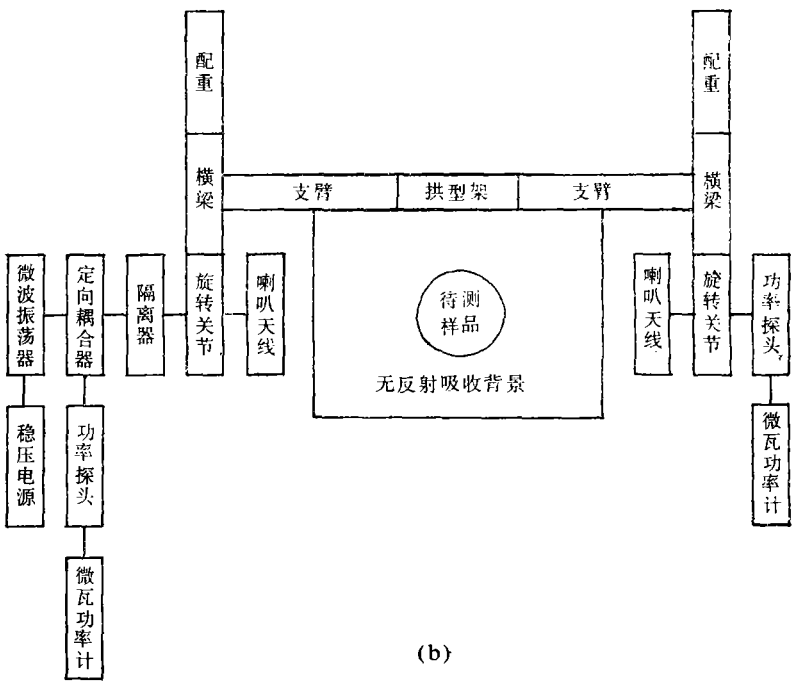
3. 微波信号源：微波信号源置于长臂的顶端，入射角在测量过程中不断改变，因此要求微波信号源体轻防震。其次要有足够的发射功率，使之待测面反射辐射远大于热辐射。按 Rayleigh-Jeans 公式，热辐射功率 P 为

$$P=\frac{2\pi kT}{\lambda^2}\Delta f \tag{15}$$

其中，k 为 Boltzman 常数，T 为绝对温度，Δf 为频带宽度。设 $T=300$ K，$\Delta f=100$

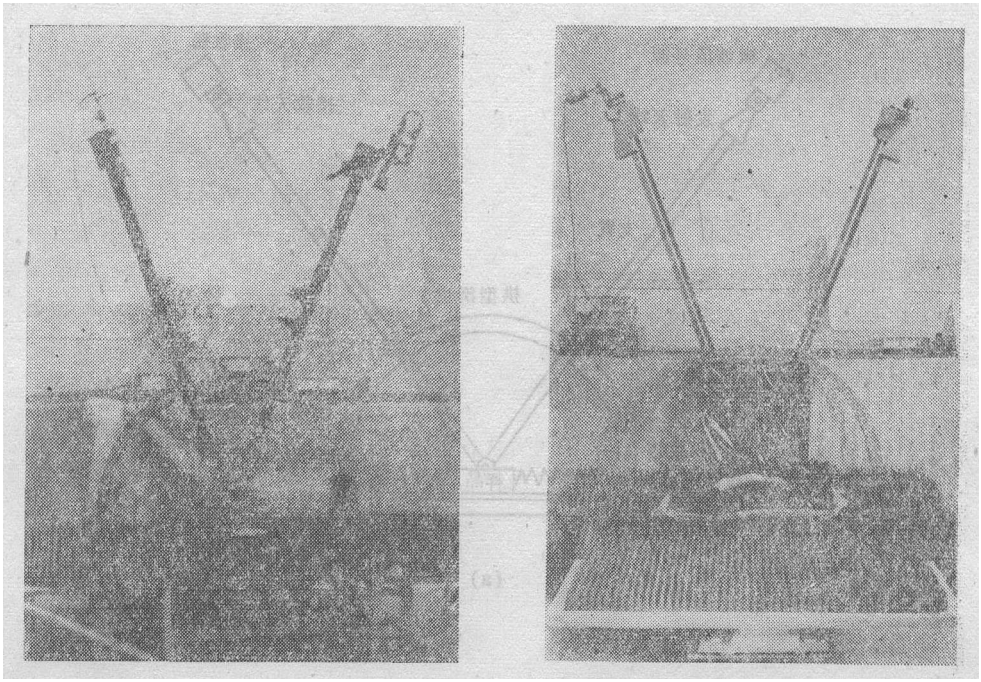


(a)



(b)

图 4　微波反射率仪的结构



(a) 8 mm (b) 3.2 cm

图 5 微波反射率仪的外形

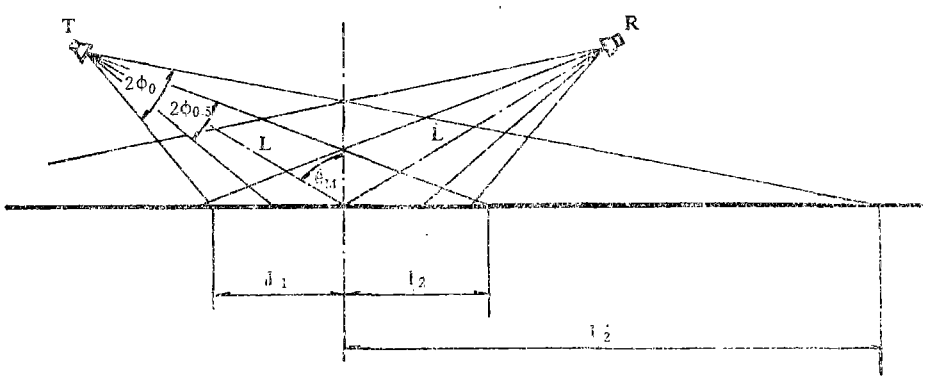


图 6 天线主瓣复盖示意图

MC，则

$$P=2.5\times10^{-13}\mathrm{W\ cm^{-2}} \tag{16}$$

假设天线全部发射功率在主瓣照射区内平均分配，要使反射辐射功率大于热辐射功率 1000 倍，需要满足下式

$$\frac{P_t R}{\pi(L\,\mathrm{tg}\,\phi_0)^2}>1000P \tag{17}$$

取 $R=0.1$，$L=1605$ mm，$\phi_0=19°$，可以得到发射功率为

$$P_t>0.024\ \mathrm{mw} \tag{18}$$

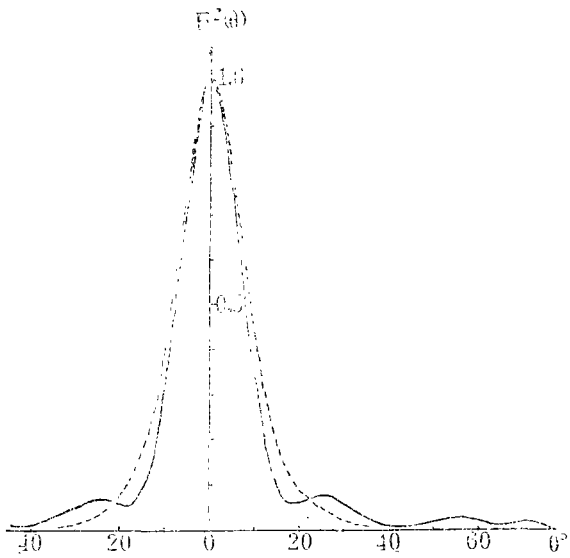


图 7　发射天线方向性图
----H面　——E面

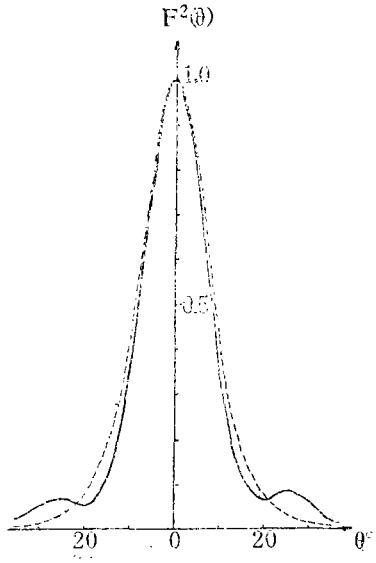


图 8　接收天线方向性图
----H面　——E面

因此使用毫瓦量级的信号源是满足要求的，并且略去热辐射的影响是合理的。

为了在实验中保持发射功率不变，以便互相比较，进行标定，对发射功率要予以监视。

在天线和微波信号源之间加隔离器以保证不使待测面反射辐射影响发射功率的稳定性。

4．支臂长度：支臂长度的最小值由天线的远场条件决定。根据通常的$\frac{\lambda}{16}$程差条件可以得出[7]：

$$L_{\min}=\frac{2D^2}{\lambda} \tag{19}$$

其中，D为天线口面的最大尺寸。根据实验所用的喇叭天线数据 $D^2=A^2+B^2$，$A=13.5$ cm，$B=9.0$ cm，$\lambda=3.2$ cm 得到 $L_{\min}=1645$ mm。因受到机械的限制，我们选取臂长接近此值，$L=1605$ mm。

5．待测面口径：当正入射时，从发射天线相位中心到接收天线相位中心，光路经待测面边缘与经待测面中心的相位差 δ_0 为[3]

$$\delta_0=\frac{\pi d_c^2}{2L\lambda} \tag{20}$$

（d_c 为待测面口径）

当 $\delta_0=\pi$ 时，增益为极大。此时

$$d_{\max}=\sqrt{2L\lambda} \tag{21}$$

根据实验数据 $L=1605$ mm，$\lambda=3.2$ cm，$d_{\max}=32.0$ cm。为了防止倾斜入射引起波形畸变，取待测面直径 d_c 小于 $d_{\max}$，即 $d_c=28.6$ cm。

6．机械要求

1）横梁：为了使天线波束远离测试支架，在支臂上装一个横梁。横梁的一端安装发射器或接收器，为了保持平衡减小扭力，在横梁另一端必须加上配重。否则测量时入射角的改变将引起严重的变形。横梁的长度应当满足天线口面中心至拱形架的距离$\geqslant L\ \mathrm{tg}\ \phi_0$（$=553$ mm）。

2）拱形架：是固定支臂的支架，也是确定入射和接收角度的定位读数盘，必须坚固稳定、不变形。

四、地物微波反射率

我们作了 3.2 cm 波段水面、干砂及水面油膜微波反射率特性实验。配合于此实验进行了复介电常数的测量。并根据 Fresnel 镜面反射率原理进行计算比较其结果。实验反复进行取其平均值。水面的反射率实验结果示于图 9。图 9 中分别代表了水面温度为 10°C，20°C和 30°C的情况，其结果显示出与理论预期的一致性，并反映了在 $\lambda=3.2$ cm 波段，水温对于反射率的影响是很小的。

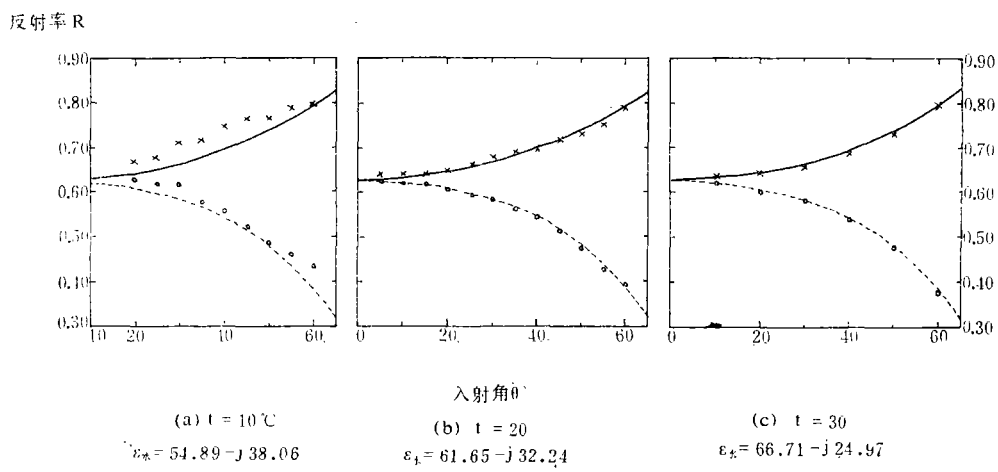


图 9 水面反射率随入射角的变化

S 极化——理论值 × 实验值
P 极化----理论值 ∘ 实验值

干砂的反射率实验结果示于图 10。砂子是河砂，经过自然干燥而成。本实验室内测得其介电常数为 $\varepsilon_{砂}=3.04-j\ 0.058$。干砂介电常数随温度变化不大，因此温度对微波反射率的影响也不明显。

柴油在本实验室内测量其介电常数为 $\varepsilon_{油}=2.06-j\ 0.021$，它随温度变化不大。图 11—12中给出水面蒙有油膜时的反射率与入射角的关系。并给出不同油膜厚度时的反射率特性。其温度为 20°C。图 13—14 是温度为 30°C时水面油膜的反射率特性。

从图 11—14 中可见：

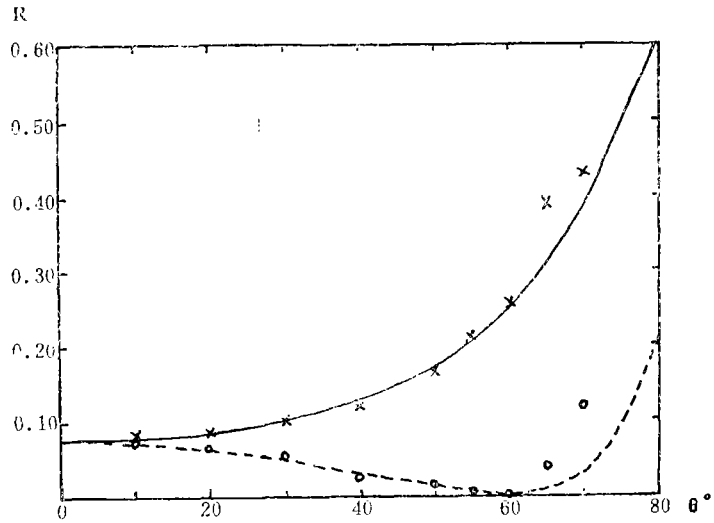


图 10　干砂光滑平面的反射率

S 极化——　P 极化----理论值　× 实验值　○ 实验值

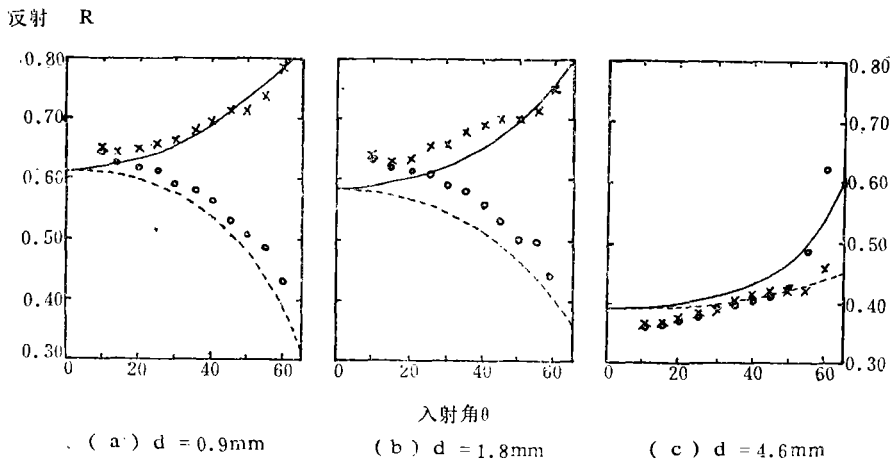


图 11　水面油膜反射率随入射角的变化($t=20℃$)

S 极化——　P 极化----理论值　× 实验值　○ 实验值

1．油膜厚度较小和入射角较小时，水面油膜反射率与入射角的关系和水面反射率与入射角的关系曲线非常相似，只是有油膜的水面反射率较小。

2．油膜厚度在$\dfrac{\lambda}{4|\sqrt{\varepsilon_{油}}|}$附近，$P$ 极化的反射率大于 S 极化的反射率。

3．在油膜厚度稍大于和稍小于 $\dfrac{\lambda}{4|\sqrt{\varepsilon_{油}}|}$ 的某处 S 极化和 P 极化的反射率相等。

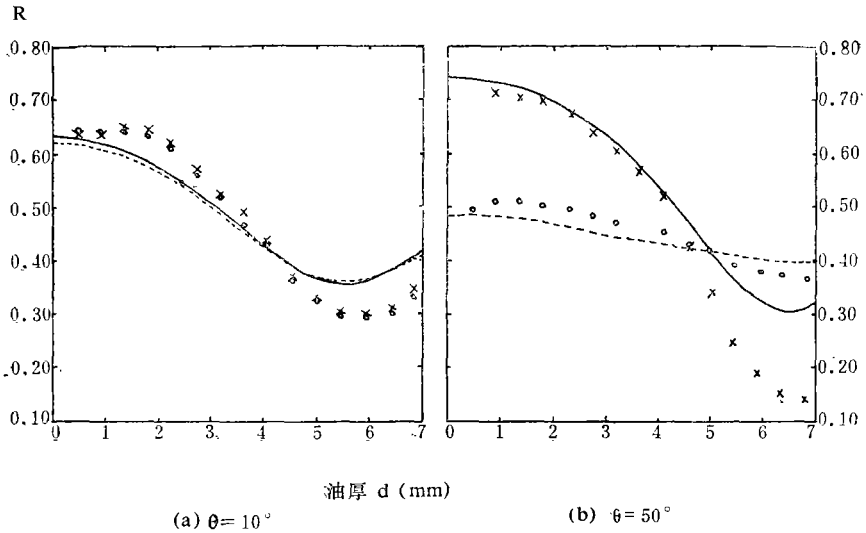


图 12 水面油膜反射率随厚度的变化(t=20℃)

S 极化——理论值 × 实验值
P 极化----理论值 ∘ 实验值

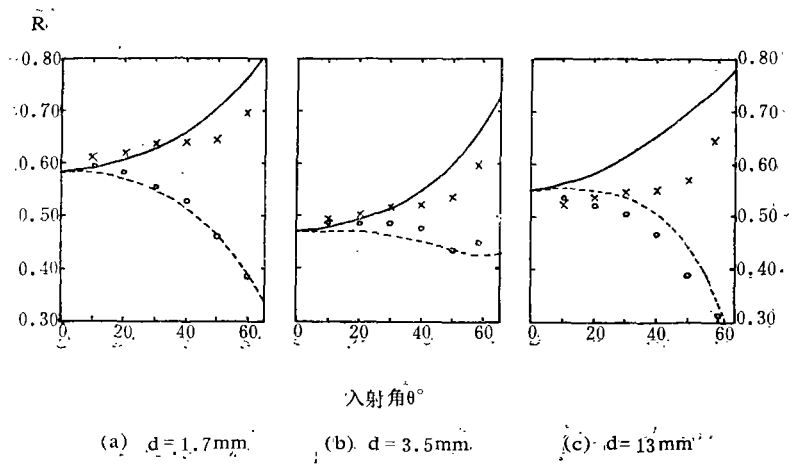


图 13 水面油膜反射率随入射角的变化(t=30℃)

S 极化——理论值 × 实验值
P 极化----理论值 ∘ 实验值

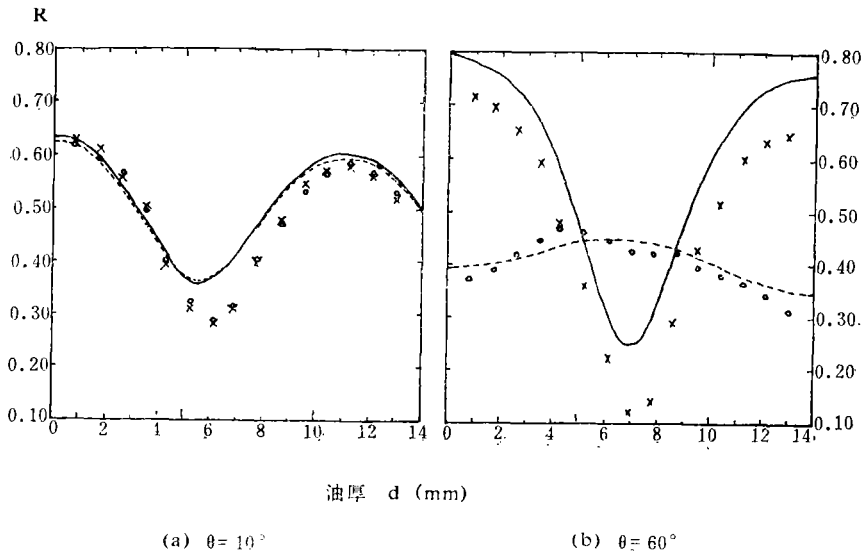


图 14　水面油膜反射率随厚度的变化($t=30$℃)

S 极化——理论值　× 实验值
P 极化----　○ 实验值

4．入射角为 50°—60°附近，P 极化的反射率几乎与油厚无关。这时 S 极化的反射率随油厚变化却很大。

5．在油膜厚度较小和入射角较小时，实验值和理论值曲线符合得较好。当油膜厚度比较大和入射角较大时，虽然实验值的绝对值和理论曲线偏离较大，但反射率与油厚的变化趋势，以及 S 极化和 P 极化的反射率的相互关系，实验值和理论值仍然是一致的。

6．水面油膜的反射率随油厚的变化呈现周期性的特点。入射角较小时周期约为 $\frac{\lambda}{2|\sqrt{\varepsilon_{油}}|}$。入射角较大时，周期也变大。

7．随着油厚增加，反射率的变化是振荡的，但总的趋势是随油膜厚度增加而振荡幅度减小。

实验误差：误差的来源有三部分：测量介电常数，近场至远场的订正和测量反射率。根据我们的实验，微波反射率的误差，当入射角不太大时($\theta<60°$)，对于水面和砂面而言，误差<5%；对于水面油膜而言，误差<10%。当入射角较大时($\theta>60°$)，特别是油膜厚度较厚时，误差较大。例如入射角 $\theta=60°$时，$\lambda=3.2$ cm，油膜厚度为 $d=7$ mm，反射率测量值比真实值要小，误差<20%。这是由于角度较大时，由于小样品夹层的边缘效应有系统误差，使反射率观测值比理论值偏小，周期观测值比理论值偏大。介电常数测量值引起反射率理论值的误差，对于水面和砂面，误差<2%；对于油面，误差<3%。

五、结　　语

从实验结果来看，实测已知物质的反射率与由复介电常数计算出来的结果是比较符

合的。这说明微波反射率仪是实际可用的。从求解反射率过程来看，这里采用终端短路法测量复介电常数也是切实可行的。

从实验中得出水面、砂面和水面油污的反射率特性，在主动微波遥感(如雷达)中，有实际参考价值。

从能量平衡观点，微波辐射率 χ 与反射率 R 间有 $\chi=1-R$ 的关系。由上述的微波反射特性，可以推测微波辐射的特性，而地物的微波辐射特性是被动微波遥感所必需，这方面的研究以期能够提高遥感的效能。

参 考 文 献

[1] Reeves R. G., A. Anson and D. Landon, Manual of remote sensing, 1, 75—107, American Society Photogrammetry, 1975.
[2] Stratton J. A., Electromagnetic theory, 482—496, McGraw Hill-Book Company Inc, 1941.
[3] Long M. W., Radar reflectivity of land and sea, 99, Lexington Books D. C. Heath and Company, 1975.
[4] Башаринов А. Е., А. С. Гурвич, С. Т. Егоров, Радиоизлучение земли как планеты, 9—29, «Наука» 1974.
[5] 赵文中：地物微波反射率研究：1. 小样品镜面微波反射率测量过程中的微波传输特性，北京大学硕士论文，1981。
[6] 周一清，微波测量技术，国防工业出版社，286—329，1964。
[7] M. J. 斯科尔尼克，雷达手册，6—1—38，国防工业出版社，1978。

STUDY ON CHARACTERISTICS OF MICROWAVE REFLECTIVITY OF NATURAL GROUND TRUTH

Zhao Bolin, Zhao Wenzhong, Du Jinlin

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

The characteristics of microwave reflectivity are studied theoretically and experimentally. Microwave reflectometer is constructed. Microwave radiation transfer of reflection in the process of near field is studied. Microwave reflectivity of natural ground truth in X-band, for example, water, sand and oil slick on water surface is measured. The experimental results are in agree with the theoretical prediction. The characteristics and the application in microwave remote sensing are discussed.