水面油膜的微波辐射及其遥感

赵柏林　　韩庆源

（北京大学地球物理系）

面临着保护海洋环境的任务，如何监测海上油污和治理海洋污染为人们所关切．本文是从微波辐射特性出发，来研究遥感水面石油污染问题，以提高微波遥感海上油污的水平；微波辐射率和被动微波遥感是直接连系在一起的，具有实用的价值．

一、原　　理

按能量守恒定律和克奇霍夫定律，物体表面的辐射率 χ、吸收率 α 和反射率 R 之间有下面的关系：

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

在空气(1)、油层(2)和水(3)三种介质平面分层的情况下，水面油膜的反射率 R 为[1]

$$R = \frac{\rho_{12}^2 + 2\rho_{12}\rho_{23}e^{-\beta}\cos(\phi_{23} - \phi_{12} + a) + \rho_{23}^2 e^{-2\beta}}{1 + \rho_{12}^2\rho_{23}^2 e^{-2\beta} + 2\rho_{12}\rho_{23}e^{-\beta}\cos(\phi_{12} + \phi_{23} + a)}, \tag{2}$$

其中

$$\rho_{l,l+1}^2 = \frac{(\gamma_l - \gamma_{l+1})^2 + (\delta_l - \delta_{l+1})^2}{(\gamma_l + \gamma_{l+1})^2 + (\delta_l + \delta_{l+1})^2},$$

$$\operatorname{tg}\phi_{l,l+1} = \frac{2(\delta_l\delta_{l+1} - \delta_{l+1}\gamma_l)}{\gamma_l^2 + \delta_l^2 - \gamma_{l+1}^2 - \delta_{l+1}^2}, \qquad l = 1, 2.$$

而

$$a = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d, \qquad \beta = \frac{4\pi}{\lambda} x_2 d,$$

$$n_k = \left\{\frac{\varepsilon_k' - \sin^2\theta}{2}\left[\left(1 + \frac{\varepsilon_k''^2}{\varepsilon_k' - \sin^2\theta}\right)^{\frac{1}{2}} + 1\right]\right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$x_k = \left\{\frac{\varepsilon_k' - \sin^2\theta}{2}\left[\left(1 + \frac{\varepsilon_k''^2}{\varepsilon_k' - \sin^2\theta}\right)^{\frac{1}{2}} - 1\right]\right\}^{\frac{1}{2}}, \quad k = 1, 2, 3.$$

水平极化

$$\gamma_k = \frac{n_k}{n_k^2 + x_k^2}, \qquad \delta_k = \frac{-x_k}{n_k^2 + x_k^2};$$

垂直极化

$$\gamma_k = \frac{n_k\varepsilon_k' + x_k\varepsilon_k''}{\varepsilon_k'^2 + \varepsilon_k''^2}, \qquad \delta_k = \frac{-n_k\varepsilon_k'' + x_k\varepsilon_k'}{\varepsilon_k'^2 + \varepsilon_k''^2}.$$

ρ，ϕ 是微波反射率的模和相角；n，x 是复折射系数的实部和虚部；γ，δ 是微波阻抗的实部和虚部．d 是油膜的厚度．

本文 1984 年 4 月 26 日收到．

在 8mm—3cm 波段中，水中盐份对辐射率的影响是比较小的. 海水(盐度 35‰)辐射率和淡水辐射率相差 1%. 这是在我们实验误差之内，因此可用水面油膜的结果表达海上油污的特性[2].

二、水面油膜微波辐射特性的研究

1. 地物微波辐射率仪：它的结构，见图 1 中所示. 由图 1 中可见，微波辐射率仪有三部分：微波辐射计、微波辐射室和样品箱. (1)微波辐射计：采用两个微波辐射计，波长分别是 8.5mm 和 3.2 cm，前者是补偿式，后者是 Dicke 式，通过喇叭天线伸入微波辐射室. 将微波辐射室中的地物样品的辐射，经喇叭天线馈入辐射计进行测量. (2) 微波辐射室：微波辐射室上板可以更换，用全反射体(铝板)或黑体(高温). 高温黑体是由红铜板制成瓦棱形表面刷上炭黑；上顶有电热片用以制造高温. 微波辐射室的四壁为铝板制成的全反射体，按镜象原理，微波辐射室中的辐射与无限延展的上板和无限延展的样品平面间的辐射相当. 喇叭天线主瓣接收范围比样品表面积小得很多. 为了满足于远场辐射条件，微波辐射室内天线至样品表面距离要足够大. (3) 样品箱：为了便于调节样品的性质，样品箱是一个金属容器，它可以自由地移出移入；但是在测量时，样品箱和微波辐射室构成一个封闭系统.

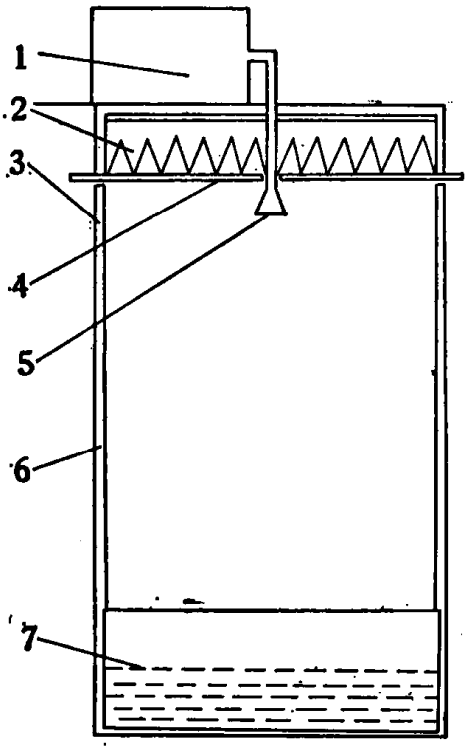


图 1　微波辐射率仪的结构

1. 辐射计；2. 可加热黑体；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

天线接收到的亮度温度 T_b 为[3]

$$T_b = [\chi_s T_s + \chi_c T_c(1-\chi_s)] \cdot [1 + (1-\chi_c) \cdot (1-\chi_s) + (1-\chi_c)^2(1-\chi_s)^2 + \cdots],$$

即

$$T_b = \frac{\chi_s T_s + \chi_c T_c(1-\chi_s)}{1-(1-\chi_c)(1-\chi_s)}, \tag{3}$$

其中 χ_s, T_s 为样品的辐射率和温度，χ_c, T_c 为上板的辐射率和温度.

为了求出样品的辐射率 χ_s，上板分别用全反射体和黑体进行两次测量，其亮度温度为 T_{b1}, T_{b2}，由(3)式，求得样品的辐射率为

$$\chi_s = 1 - \frac{T_{b1} - T_{b2}}{[(\chi_{c1}T_{c1} - \chi_{c2}T_{c2}) + (1-\chi_{c1})T_{b1} - (1-\chi_{c2})T_{b2}]}, \tag{4}$$

其中 T_{b1}, χ_{c1}, T_{c1} 是黑体上板时的亮度温度、上板的辐射率和温度；T_{b2}, χ_{c2}, T_{c2} 是全反射体上板时的亮度温度、上板的辐射率和温度.

微波辐射率仪测量是处于 $\theta = 0°$ 时的辐射率，此时水平偏振值和垂直偏振值相等.

2. 水面油膜微波辐射率的测量：为了取得多次振荡周期，用 8.5mm 微波辐射率仪测量水面油膜，油膜厚度从 0.5mm 至 9.8mm；而用 3.2cm 微波辐射率仪测量水面油膜，油膜厚度从 0.5 mm 至 1.25cm. 测量结果，见图 2、3 中所示. 柴油的介电常数是用终端短路法测量的[4,5]. 根

据(2)式计算的微波辐射率随油膜厚度变化的理论值亦示于图 2、3 之中. 用测量结果与理论曲线比较,两者符合得较好;这说明在排除外界干扰后,在 $\theta = 0°$ 的情形下,水面油膜的辐射特性可用平面分层模式来描述.

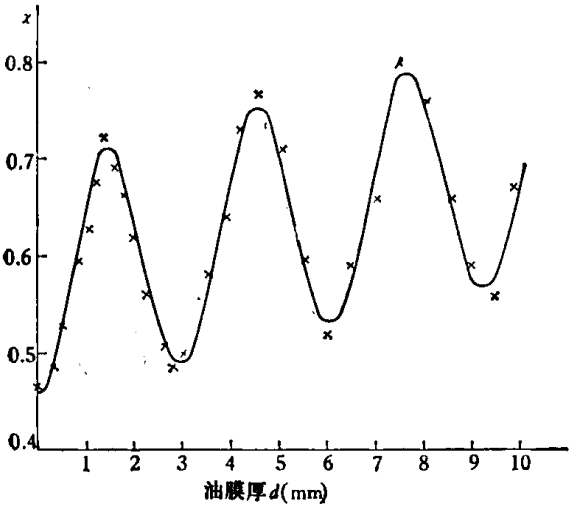


图 2 辐射率与水面油膜厚度的关系
($8.5mm$, $\theta = 0°$, $t = 20℃$)
——理论值; ×实测值

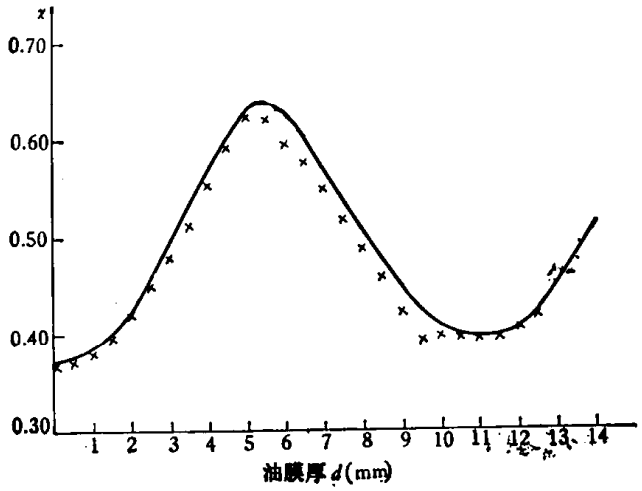


图 3 辐射率与水面油膜厚度的关系
($3.2cm$; $\theta = 0°$, $t = 20℃$)
——理论值; ×实测值

三、模拟自然状态海面油污的遥感

油和水的介电常数差异很大,水面蒙有油膜后辐射率显著不同,在较大倾角和水平极化观测的时候更为突出,故而易于用微波遥感的方法鉴别.油膜在海上的作用有两种效应: 一种是宁静效应,即它能减小波浪引起的海面粗糙度,特别是高频成份,如浪花、小尺度波、碎浪等等,因而减小海面的粗糙度. 另一种是提高辐射率的效应,油的辐射率高于水的辐射率,水面油膜亮度温度也要高一些. 在探测中[6,7],风浪较大时,在有油膜覆盖的海域,水平偏振的亮度温度略低于四周海面,垂直偏振亮度温度略高于四周海面. 对于约有 0.01mm 厚的油膜,水平极化和垂直极化已有明显的不同响应. 在风浪小时,油膜增加亮度温度的效应特别明显,用它可以探测海面油污的状况.

为了检验微波遥感的效果,进行露天的模拟实验,所用的容器是一个箱体 ($180 \times 180 \times 40cm^3$), 内中盛有淡水,水上蒙有不同厚度的油膜,用 $\lambda = 8.5mm$ 的微波辐射计,监测水面油膜的辐射. 实验场地选在开阔的楼顶平台上进行的. 选择晴朗而风小的天气, 分别对水平极化和垂直极化的亮度温度观测. 观测角度为 45°. 水面油膜厚度范围为 0—4.8mm, 以 0.1mm (或 0.2mm) 间隔测量,水温在开始实验时为 23℃, 结束时为 28℃. 在观测时, 记录风速的大小,在风速小时 (1—3m/s), 对于水面粗糙度没有什么影响; 在有阵风时, 从记录中可以看出, 阵风影响虽大, 但可以被判别出来,不纳入观测信息. 在实验的同时,要观测天空背景辐射的亮度温度. 在露天下,微波辐射计观测到水面油膜的亮度温度 T_b 为

$$T_b = \chi T_w + RT_s = \chi T_w + (1 - \chi)T_s, \qquad (5)$$

其中, χ 为水面油膜的辐射率, R 为水面油膜的反射率, T_w 为水面油膜的温度, T_s 为天空的亮度温度. 水面油膜的亮度温度和辐射率随油膜厚度变化的实验结果, 见图 4、5 中所示. 从图中可见,实验值和理论值是一致的. 从实验结果上看,温度变化的影响是不大的, 当水温变

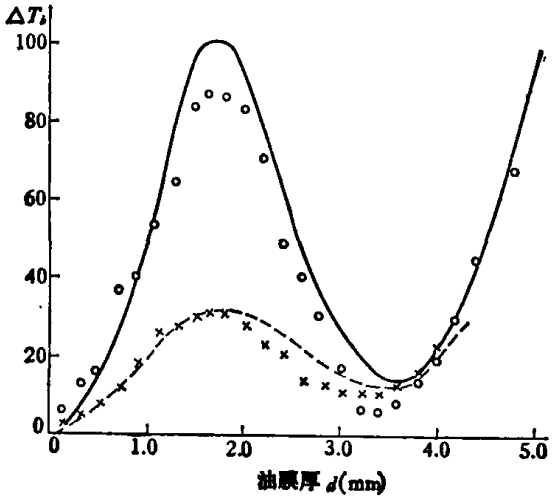


图 4　油膜和水面亮度温度差 ΔT_b 与油膜厚度 d 的关系
(8.5mm, $\theta = 45°$)
水平极化 —— 理论值; ○ 实测值
垂直极化 ---- 理论值; × 实测值

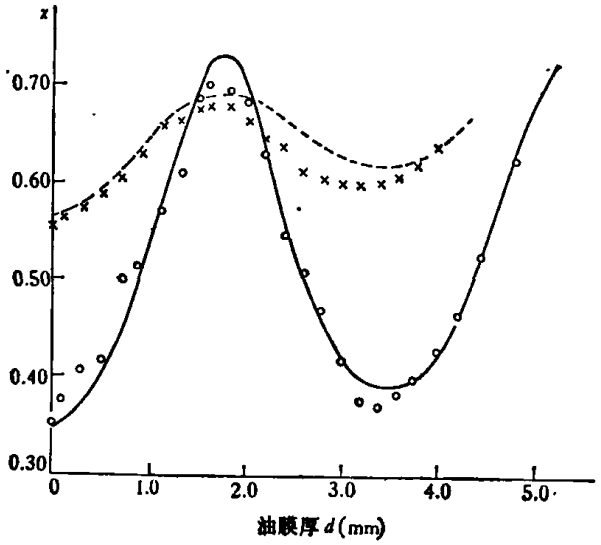


图 5　辐射率和油膜厚度的关系
(8.5mm, $\theta = 45°$)
水平极化 —— 理论值; ○ 实测值
垂直极化 ---- 理论值; × 实测值

化 5℃ (由 23℃ 变为 28℃),其辐射率仅下降约 0.005.

由于辐射在油膜中的反射和干涉的作用,使水面油膜的辐射率随着油厚呈振荡现象;因此在观测时要选择适当的波长和倾角，以便充分利用第一个极大值的范围. 在海面油膜厚度多为≤ 2mm[1], 从(2)式,辐射率随油厚振荡波长约为 $\frac{\lambda}{2|\sqrt{\varepsilon_{油}}|}$,以振荡半波长等于 2mm 为条件,得到最佳波长约为 1.2cm. 近年来,使用此波长附近的频段 (如 19.34Gc, 22Gc, 31Gc) 遥感海上油污,并取得成效[6-9].

四、结 束 语

利用微波辐射遥感可以检测油污的出现，在水面和油膜之间有鲜明的对比. 微波辐射率强烈地随着油膜厚度增大而增大，用微波辐射计检测水面油膜厚度是良好的方法 (例如，在 $\lambda = 8.5$mm, $\theta = 45°$,水平极化的条件下,当油膜厚度变化 0—1.6mm 时,亮度温度变化为 0—86°K). 为了检测海上油膜 (≤ 2mm), 可用 $\lambda \sim 1.2$cm 附近的频段，此时可有较高的分辨率而又可避免辐射率振荡的干扰.

参 考 文 献

[1] Богородский В. В. и др., *Труды ГГО*, **371** (1976), 22—36.
[2] 赵柏林、赵文中、杜金林,中国科学, A辑,1983, 3:283—291.
[3] Мелентьев В. В., Рабинович Ю. И., *Труды ГГО*, **291**(1972), 3—8.
[4] 赵柏林、赵文中、杜金林,科学通报, **27**(1982), 22: 1379—1382.
[5] 韩庆源、赵柏林,北京大学学报(自然科学), 1984, 1: 57—67.
[6] Naval Research Laboratory, The Determination of Oil Slick Thickness by Means of Multifrequency Passive Microwave Techniques, 1973, AD 771376.
[7] Edgerton, A. T., Trexler, D. T., Radiometric Detection of Oil Slicks, 1970, AD 702402.
[8] Troy, Jr. B. E., Holinger, J. P., The Measurement of Oil Spill Volume by a Passive Microwave Imager, 1977, ADA041821.
[9] Crowell, W. F. et al., *IEEE Trans.*, GE-21 (1983), 2—15.