

# 无源微波遥感海上石油污染的研究<sup>1</sup>

雷震东 王 雷 钟仕荣

(华中理工大学电子与信息工程系 武汉 430074)

**摘 要** 本文应用空气、油膜和海水组合体模型计算和分析了有效发射率随油膜厚度、工作频率和入射角变化的关系,提出了无源微波遥感海上石油污染的优选方案并成功地进行了航空微波遥感试验。

**关键词** 微波遥感,有效发射率,石油污染

**中图分类号** TP79

## 1 引 言

随着全球海运贸易和海上石油开采的日益发展,海洋已受到不同程度的石油污染。频繁的石油污染将超过海洋的自身净化能力,从而会对海洋生物的生长、繁殖和人类生活造成巨大的危害。因此,及时发现和监测油溢是海洋环境保护工作的当务之急,也是组织清理和采取法律措施的关键环节。无源微波遥感(微波辐射测量)技术不但具有全天候、全天时工作能力,并对海上石油污染程度具有独特的大面积、快速和定量检测的能力。由于被石油污染海面的微波辐射特性与清洁海面不同(表现为辐射亮温不同),污染海面油膜厚度的不同其辐射亮温也不同,故利用高精度微波辐射计可以遥感探测出这些差别<sup>[1,2]</sup>,达到遥感海上石油污染的目的。本文在深入分析空气、油膜和海水组合体的有效发射率随油膜厚度、工作频率和入射角变化关系的基础上,提出了无源微波遥感海上石油污染状况的优选方案,设计并研制成高精度机载微波辐射计系统,成功地进行了航空遥感海上石油污染的试验。

## 2 理 论

一般情况下,流散分布在海面上的油膜厚度约为微米至毫米数量级,微波的海水穿透深度也仅有数毫米,故可假定空气、油膜和海水的组合体是一种物理温度均匀分布的三层媒质,如图 1 所示。它们的微波辐射亮度温度  $T_B$ (简称亮温)等于此复合媒质的有效发射率  $e(\theta, p)$  与其物理温度  $T_0$  的乘积,

$$T_B(\theta, p) = e(\theta, p)T_0, \quad (1)$$

式中  $\theta$  为入射角,  $p$  为极化方式。根据分层媒质理论的分析<sup>[1]</sup>,

$$e(\theta, p) = 1 - \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2/L_2^2 + 2\sqrt{\Gamma_1\Gamma_2} \cos(2\beta_2'd + \phi_1 - \phi_2)/L_2}{1 + \Gamma_1\Gamma_2/L_2^2 + 2\sqrt{\Gamma_1\Gamma_2} \cos(2\beta_2'd - \phi_1 - \phi_2)/L_2} \quad (2)$$

<sup>1</sup> 1994-11-12 收到, 1995-04-04 定稿

式中  $\Gamma_1 = |R_1|^2, \Gamma_2 = |R_2|^2$ ,

$$R_1 = |R_1| \exp(j\phi_1), \quad R_1 = \begin{cases} \frac{\eta_1 \cos \theta_1 - \eta_2 \cos \theta_2}{\eta_2 \cos \theta_2 + \eta_1 \cos \theta_1} & (\text{垂直极化}), \\ \frac{\eta_2 \sec \theta_2 - \eta_1 \sec \theta_1}{\eta_2 \sec \theta_2 + \eta_1 \sec \theta_1} & (\text{水平极化}), \end{cases}$$

$$R_2 = |R_2| \exp(j\phi_2), \quad R_2 = \begin{cases} \frac{\eta_2 \cos \theta_2 - \eta_3 \cos \theta_3}{\eta_3 \cos \theta_3 + \eta_2 \cos \theta_2} & (\text{垂直极化}), \\ \frac{\eta_3 \sec \theta_3 - \eta_2 \sec \theta_2}{\eta_3 \sec \theta_3 + \eta_2 \sec \theta_2} & (\text{水平极化}), \end{cases}$$

$$\eta_1 = 1, \quad \eta_2 = 1/\sqrt{\epsilon_2}, \quad \epsilon_3 = 1/\sqrt{\epsilon_3}, \quad L_2 = \exp(2\alpha_2 d \sec \theta_2),$$

$$\alpha_2 = (2\pi/\lambda_0) |\operatorname{Im}[\sqrt{\epsilon_2}]|, \quad \beta_2 = (2\pi/\lambda_0) \operatorname{Re}[\sqrt{\epsilon_2}], \quad \beta'_2 = \beta_2 \sec \theta_2,$$

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1 / \epsilon_2}, \quad \cos \theta_3 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1 / \epsilon_3},$$

其中  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  分别是空气、油膜和海水的复相对介电常数,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别是空气与油膜界面以及油膜与海水交界面的反射系数的相角,  $\lambda_0$  为自由空间波长,  $d$  为油膜厚度。

(1) 式和 (2) 式表明, 空气、油膜和海水组合体的有效发射率与各层媒质的复相对介电常数、油膜厚度、入射角、辐射频率和极化方式有关。

### 2.1 有效发射率与油膜厚度的关系

由于石油污染海区与其邻近清洁海区表面的物理温度十分相近, 故它们的亮温差别仅取决于相应有效发射率的差别。由 (2) 式可见, 当其他参数不变而仅油膜厚度变化时, 会引起有效发射率随油膜厚度的增加呈周期性变化, 这种非单值的对应关系将给检测油膜厚度工作带来困难, 限制了最大可检测的油膜厚度。例如, 给定工作频率  $f = 35\text{GHz}$ ,  $T_0 = 288\text{K}$ , 盐度为 34 ‰ 的海水的复相对介电常数  $\epsilon_3 = 15.84 - j27.44$ , 0 号柴油的复相对介电常数  $\epsilon_2 = 2.067 - j0.0069$ , 由 (1) 式和 (2) 式可计算出不同油膜厚度时的亮温。因  $d = 0$  时对应于清洁海面情况, 故可计算出石油污染海面与清洁海面的亮温差  $\Delta T_B$  随  $d$  的变化情况, 如图 2 所示<sup>[3]</sup>, 若油膜厚度小于图中第一峰值所对应的  $d$  值, 则厚度测量不会产生模糊。取图 2 中两相邻最大 (或最小) 亮温差值之间的距离为  $\Delta T_B$  随  $d$  的变化周期  $D$ , 由 (2) 式对  $d$  求偏导数并令它为零, 可求出

$$D = \frac{\lambda_0}{2\{(1/2)[(\epsilon'_2 - \sin^2 \theta_1) + \sqrt{(\epsilon'_2 - \sin^2 \theta_1)^2 + \epsilon_2''^2}]\}^{1/2}}, \quad (3)$$

式中  $\epsilon'_2$  和  $\epsilon_2''$  分别是油膜复相对介电常数  $\epsilon_2$  的实部与虚部。(3) 式表明  $D$  与油的类型 ( $\epsilon_2$ )、入射角 ( $\theta_1$ ) 和波长 ( $\lambda_0$ ) 有关, 通常取  $D/2$  为可检测的最大油膜厚度, 故采用较长的工作波长和较大的入射角有利于检测较厚的油膜。

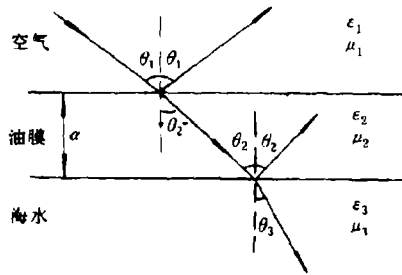


图 1 三层媒质示意图

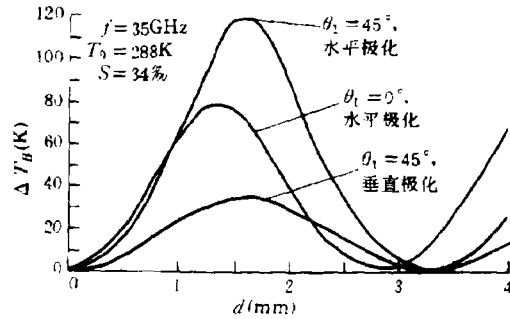


图 2 0 号柴油污染海面的亮温差与油膜厚度的关系

2.2 亮温差与入射角和极化的关系

图 2 中曲线的斜率表示油膜厚度的微量变化引起的亮温差变化量  $\partial\Delta T_B/\partial d$  或  $\partial\Delta e/\partial d$ 。斜率越陡则易于检测更薄的油膜。由于此斜率值是油膜厚度、入射角和极化方式的函数，故可以选择最佳的入射角和极化方式以利于达到最佳的测量结果。取  $d = 0.5\text{mm}$  和  $1.5\text{mm}$ ，由 (1) 式和 (2) 式计算出有效发射率的变化量  $\Delta e$  和  $\partial\Delta e/\partial d$  随入射角  $\theta_1$  的变化情况，如图 3 所示。显然，对于较厚的油膜，采用较大的入射角可获得较大的亮温差及其变化率；而对于较薄的油膜，过大的入射角则会引起亮温差及其斜率下降。因此，在选择最佳入射角时，既要获得尽可能大的斜率  $\partial\Delta T_B/\partial d$ ，又要兼顾在检测薄油膜时亮温差不致于太小，一般选择入射角为  $20^\circ \sim 45^\circ$ 。又由图 2 可见，对于相同的油膜厚度，水平极化时的亮温差大于垂直极化时的亮温差，故以水平极化方式更为合适。

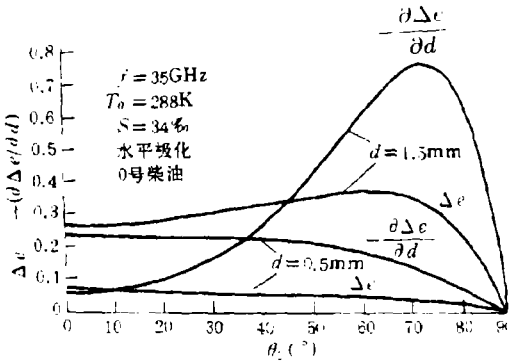


图 3 有效发射率增量  $\Delta e, -\partial\Delta e/\partial d$  与入射角的关系

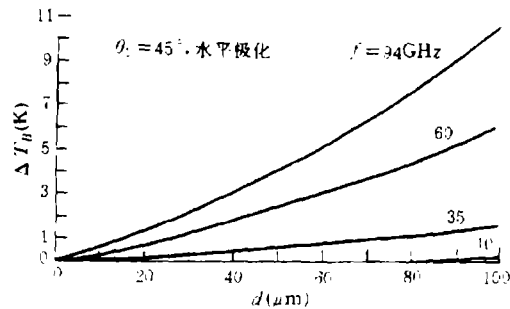


图 4 不同频率下，0 号柴油污染海面的亮温差与油厚的关系

2.3 亮温差与频率的关系

对石油污染海面进行微波辐射测量的工作频率范围可取  $10 \sim 100\text{GHz}$ 。在此频率范围内不同石油的复相对介电常数实部在  $2.0 \sim 2.4$  之间变化，而其虚部在  $0.01 \sim 0.07$  之间变化，故有  $\epsilon_2' \gg \epsilon_2''$ 。取  $\theta_1 = 0$ ，可将 (3) 式简化为

$$D \approx \lambda_0 / (2\sqrt{\epsilon_2'}) \tag{4}$$

由此式对 10GHz, 35GHz, 60GHz 和 94GHz 4 个有代表性的频率计算出最大可检测油膜厚度分别为 5.3mm, 1.52mm, 0.88mm 和 0.56mm。为考察检测薄油膜的能力, 仍由 (1) 式和 (2) 式计算上述 4 个频率下亮温差与油膜厚度 (取  $d = 0 \sim 100\mu\text{m}$ ) 的关系, 结果如图 4 所示。薄油层仅在高频段才呈现较大的亮温差。微波辐射计检测薄油膜的能力还与其灵敏度有关。将微波辐射计检测的亮温差与其灵敏度的比值称为输入信噪比, 仅当输入信噪比大于 1 时, 微波辐射计才能正确地进行检测。微波辐射计灵敏度的典型值约为 0.1K (积分时间 1s), 取信噪比为 3, 则相应于上述四个频率下的最小可检测油膜厚度分别为  $175\mu\text{m}$ ,  $25\mu\text{m}$ ,  $8\mu\text{m}$  和  $5\mu\text{m}$ 。实际上, 在机载扫描成像检测情况下, 辐射计的积分时间只有毫秒级, 故可检测到的最薄油膜厚度将比上述数值大。采用多频率测量 (多波段微波辐射计) 可扩展被检测油膜厚度的范围。

### 3 航空试验

采用机载微波辐射计可以大范围、快速、定量遥感局部海域受油溢污染的程度。实际测量时, 辐射计天线在高  $H$  处从  $(\theta, \phi)$  方向接收的海面极化视在温度  $T_{AP}$  包括海面自身的辐射亮温  $T_B$ 、大气的向上辐射  $T_{UP}$  以及大气和外层空间的向下辐射被海面散射到天线方向的辐射贡献  $T_{SC}^{[4]}$ , 即

$$T_{AP}(\theta, \phi, H, p) = [T_B(\theta, \phi, p) + T_{SC}(\theta, \phi, p)] \exp[-\tau(0, H)\sec\theta] + T_{UP}(\theta, H), \quad (5)$$

式中  $\tau(0, H)$  为由海面至高  $H$  处的大气光学厚度,  $p$  为极化方式。考虑天线主波束效率  $\eta_M$  和辐射效率  $\eta_L$  后, 实际输入到辐射计接收机的天线温度  $T_A$  为

$$T_A = \eta_L[\eta_M T_{AP}(\theta, \phi, H, p) + (1 - \eta_M)T_{SL}] + (1 - \eta_L)T_0, \quad (6)$$

式中  $T_{SL}$  为  $T_{AP}$  对天线旁瓣产生的贡献。

航空遥感海面石油污染的研究, 是根据微波辐射计输出指示确定的  $T_A$ , 结合相应的现场环境状态参数反演被测海面的  $T_{AP}$  和相应的  $T_B$ , 据此确定被测海面的石油污染程度。

根据上述原理, 我们设计并研制成机载高精度微波辐射计系统<sup>[5]</sup>, 其主要技术指标为: 中心工作频率 35GHz, 天线半功率波束宽度  $0.8^\circ$ , 辐射测温范围  $> 0 \sim 320\text{K}$ , 测温灵敏度 0.1K (积分时间 1s), 输出线性相关系数  $> 0.999$ 。该系统安装在运 5 飞机上, 工作于水平极化, 入射角为  $20^\circ$ 。试验在我国南海海域进行, 采用船上人工布油在海面上形成一条长约 1000m、宽约 35m 的油带, 但由于

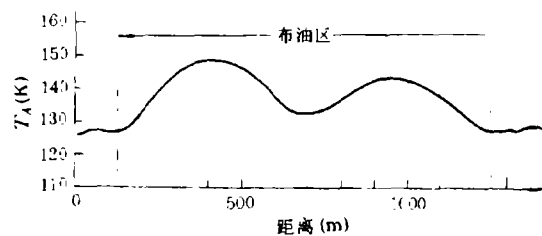


图 5 航空遥感石油污染海面的微波辐射计输出天线温度

海流的作用, 此油带在中部附近逐渐分裂成二段。遥感飞机沿油带方向和横过油带方向作多次航空遥感检测; 与此同时由海上小艇沿油带直接取样检测油膜厚度、海水物理温度和盐度等参数。图 5 所示为其中一次沿油带方向飞行时辐射计记录输出的天线温度变化情况。从图中可明确区分有油区与无油区 (清洁海面) 以及油带断裂处。测出的有油区海面天线温度比无油区海面的天线温度高, 最大温差可达 22.6K, 这都与理论分析的预期结果是一致的。由中国科学院南海海

洋研究所对机载遥感数据进行微机处理和反演计算, 得出油膜厚度分布为 0.02mm~0.26mm, 油带长度约 1000m, 均与船测值相近。由此估算出油溢量约 5.49t, 实际布油量为 4.3t。误差主要来源于海流和海浪的影响, 使海面形成油水混合泡沫状态, 其辐射亮温高于平静有油海面的亮温。

## 4 结 论

本文的理论分析和遥感试验表明: 航空无源微波遥感是目前唯一能全天候、大范围、快速和定量检测海上石油污染程度的可行技术。实际应用选用单频或多频扫描成像、水平极化入射角为  $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$  的工作状态为宜。

**致谢** 中国科学院南海海洋研究所钟其英研究员对本文的研究和试验工作给予了大力支持和帮助, 在此深表感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Ulaby F T, More P K, Fung A K. Microwave Remote Sensing Active and Passive. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1981, Vol.I, Chap. 4.
- [2] Skou N. IEEE Trans. on GE, 1986, GE-24(3): 360-367.
- [3] 周 宏. 海面石油污染无源微波遥感技术研究: [硕士论文]. 武汉: 华中理工大学, 1988.
- [4] 雷震东, 等. 宇航学报, 1992, (2): 62-67.
- [5] 雷震东, 等. 微波学报, 1990, (2): 15-19.

## STUDY ON PASSIVE MICROWAVE REMOTE SENING OF SEA-SURFACE OIL POLLUTION

Lei Zhendong    Wang Lei    Zhong Shirong

(Huazhong University of Science and Technlogy, Wuhan 430074)

**Abstract** By using the model of air-oil film-sea water system, the influences of the oil thickness, operating frequency of the radiometer and incidence angle of the beam on the effective emissivity are calculated and analysed. The optimal scheme for passive microwave remote sensing of sea-surface oil pollution is also proposed and used successfully for airborne microwave remote sensing experiments.

**Key words** Microwave remote sensing, Effective emissivity, Oil pollution

雷震东: 男, 1938年生, 副教授, 现从事微波遥感及其应用研究.

王 雷: 男, 1972年生, 硕士研究生.

钟仕荣: 男, 1968年生, 学士, 助理工程师.