

文章编号: 1007-4619(2006)03-0409-06

# 二维粗糙海面的微波发射率研究

黄泽贵, 童创明, 付红卫, 王积勤

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘 要:** 针对双尺度模型和直接发射率模型求解粗糙海面的亮温特点, 提出了一种新的高阶 Stokes 向量模型。该模型基于二维粗糙海面上场的高阶微扰法展开近似, 得到了 4 个发射率分量及亮温的高阶微扰解。通过考虑海面特性的修正, 定量计算了复折射率、风速和泡沫等因素对亮温的修正效应。数值计算和测量值的比较表明, 该模型是有效的。

**关键词:** 粗糙海面; 斯托克斯向量模型; 发射率; 亮温; 高阶微扰法

**中图分类号:** TP722.6/P71 **文献标识码:** A

## Study of Microwave Thermal Emission from Two-dimensional Rough Sea Surfaces

HUANG Ze-gui TONG Chuang-ming FU Hong-wei WANG Ji-qin

(Missile Institute of Air Force Engineering University, Shaanxi Sanyuan 713800, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing the characteristic of two-scale model and direct emissivity model, a new model named high-order Stokes vector model is presented. The four Stokes components of brightness temperature and emissivity are solved using the high-order small perturbation method (HSPM). The modified effect by the complex index of refraction, wind speed and foam is quantitatively analyzed. Compared with a set of measured data, numerical computations of the brightness temperature by moment method and HSPM for actual rough sea surface are given. The results show that the new method is validity.

**Key words:** rough sea surface; Stokes vector model; emissivity; brightness temperature; high-order small perturbation method

## 1 引 言

近年来海况遥感信息研究的深入, 以及大量卫星试验数据的有效获取, 推动了海面微波极化热发射率的研究。由于风成海面是随机的粗糙面, 因而海面发射率的研究就与粗糙表面散射特性紧密相关。海面散射特性的研究, 沿着海面波浪谱和粗糙海面的发射率模型及其求解方法两个

方向发展。

海浪谱研究的核心, 就是基于海洋遥感数据构造出更合乎实际的谱函数。Pierson 等人<sup>[1]</sup>基于风速和风向的不变性假设, 提出了经典的 Pierson-Moskowitz 海浪谱。Dunden 等人<sup>[2]</sup>基于双尺度散射模型, 并考虑方位角和风速的变化, 提出了 Dunden-Vescky 海浪谱。Apel<sup>[3]</sup>为了匹配不同频率垂直极化的微扰法 (Small Perturbation Method-SPM) 解, 提出了 Donelan-Banner-Jähne 海浪谱。而对于小尺度

收稿日期: 2005-04-20; 修订日期: 2005-11-21

基金项目: 空军工程大学学术(联合)基金 KGD-XL-02-2004-02 和陕西省自然科学基金计划项目 (2005F23) 资助。

作者简介: 黄泽贵 (1976—), 男, 2000 年毕业于空军工程大学导弹学院电子信息工程专业, 获得工学学士学位; 2003 年毕业于该院通信与信息系统专业, 获得工学硕士学位, 现为该校电磁场与微波技术专业博士研究生, 目前主要从事电磁散射理论计算、微波遥感等研究, 已发表学术论文近 10 篇。E-mail: huangjie@eyou.com。

的海浪谱,常采用简单的高斯型函数描述。

在模型研究方面,常用模型包括双尺度模型和直接发射率模型,以及最新发展的斯托克斯向量模型<sup>[4]</sup>。Wu等人<sup>[5]</sup>使用发展的双尺度模型对发射率和亮温进行了研究。Rom eiser等人<sup>[6]</sup>针对大风速产生的中尺度波的影响,提出了海浪谱受风速影响的三尺度模型。针对多尺度模型中大小尺度因子难以划分且不能进行修正的特点,Voronovich<sup>[7]</sup>提出了小斜率近似模型。小斜率近似模型和微扰法正是直接发射率模型的核心。针对高阶小斜率近似模型求解亮温运算复杂的问题,Johnson<sup>[8]</sup>采用 Monte Carlo方法研究了周期性海面的发射率和大气辐射的问题。过去在双尺度模型和小斜率近似模型的研究中,只考虑到了垂直极化亮温  $T_{Bv}$ 和水平极化亮温  $T_{Bh}$ 的存在,Tsang<sup>[4]</sup>在被动遥感中还观测到了第三个亮温  $U_B$ 和第四个亮温  $V_B$ 的存在,并对各向异性粗糙表面的 4个亮温参数进行了求解。

在以上分析的模型中,双尺度模型和小斜率近似模型没有对  $U_B$ 和  $V_B$ 分量进行分析,而斯托克斯向量模型中求解的海面发射率是基于一阶场分量展开的,没有包含散射场的高阶分量和绕射分量。此外,3种模型的求解中没有考虑到海面特性对亮温计算的修正影响。因此,基于 SPM 在低频段求解粗糙表面散射的精确性,结合高阶场分量能够定量解释多重散射的特性,本文提出采用高阶 SPM 求解轻微粗糙海面发射率的 4个斯托克斯分量,并分析风速、复折射率、泡沫等海面特性对发射率和亮温(Brightness Temperature)的修正影响。

## 2 理论推导

由瑞利 金斯定律和基尔霍夫定律知,海面的亮温和发射率有如下关系式,即

$$T_B(\lambda, \theta_i, \phi_i, T_s) = e(\lambda, \theta_i, \phi_i) T_s \quad (1)$$

式中,  $T_B$ 代表海面亮温,它是入射波长  $\lambda$ 、观测角  $\theta_i$ 、方位观测角  $\phi_i$ 和海面物理温度  $T_s$ 等的函数。因此,可用矩阵的形式,来描述 4个发射率分量分别与亮温  $T_B$ 的关系,即

$$\begin{bmatrix} T_{Bh}(\theta_i, \phi_i) \\ T_{Bv}(\theta_i, \phi_i) \\ U_B(\theta_i, \phi_i) \\ V_B(\theta_i, \phi_i) \end{bmatrix} = T_s \begin{bmatrix} e_h(\theta_i, \phi_i) \\ e_v(\theta_i, \phi_i) \\ e_u(\theta_i, \phi_i) \\ e_v(\theta_i, \phi_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,等式两端矩阵的前两行分别对应水平极化的

亮温  $T_{Bh}$ 、发射率  $e_h(\theta_i, \phi_i)$ 和垂直极化亮温  $T_{Bv}$ 、发射率  $e_v(\theta_i, \phi_i)$ ,后两行分别对应水平和垂直极化下亮温和发射率的实部及虚部分量。

### 2.1 高阶微扰法推导的发射率

由一阶微扰法求得的散射幅度分量<sup>[4]</sup>  $f_{\beta}^{(1)}(\alpha, \beta = h, v)$ ,求得发射率的 4个斯托克斯分量为,

$$\begin{bmatrix} e_h(\theta_i, \phi_i) \\ e_v(\theta_i, \phi_i) \\ e_u(\theta_i, \phi_i) \\ e_v(\theta_i, \phi_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{\cos\theta_i} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} k^2 \sin\theta_s \cos^2\theta_s \times$$

$$W(k_{\perp l} - k_{\perp l}) \begin{bmatrix} |f_{hh}^{(1)}|^2 + |f_{hv}^{(1)}|^2 \\ |f_{hv}^{(1)}|^2 + |f_{vv}^{(1)}|^2 \\ 2\text{Re}(f_{hh}^{(1)} f_{hv}^{(1)*} + f_{vv}^{(1)} f_{vh}^{(1)*}) \\ 2\text{Im}(f_{hh}^{(1)} f_{hv}^{(1)*} + f_{vv}^{(1)} f_{vh}^{(1)*}) \end{bmatrix} d\theta_s d\phi_s \quad (3)$$

式中,  $W(k_{\perp l} - k_{\perp l})$ 表示海面的功率谱函数。为了深入比较海面参数对发射率和亮温的影响,同时考虑到高阶 SPM 的特点,这里采用高斯型谱函数来表征粗糙海面的功率谱函数,即

$$W(k_{\perp l} - k_{\perp l}) = \frac{\hat{h}^2}{4\pi} \exp\left(-\frac{|k_{\perp l} - k_{\perp l}|^2 \hat{h}}{4}\right) \quad (4)$$

当采用二阶微扰法求解时,可推导求得粗糙海面的发射率分别为,

$$e_h = 1 - |R_{h0}|^2 - 2\text{Re}(R_{h0} f_{hh}^{(2)*}(k_{\perp l})) -$$

$$\frac{1}{\cos\theta_i} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} k^2 \sin\theta_s \cos^2\theta_s W(k_{\perp l} - k_{\perp l}) \times$$

$$[|f_{hh}^{(1)}(k_{\perp l}, k_{\perp l})|^2 + |f_{hv}^{(1)}(k_{\perp l}, k_{\perp l})|^2] d\theta_s d\phi_s \quad (5a)$$

$$e_v = 1 - |R_{v0}|^2 - 2\text{Re}(R_{v0} f_{vv}^{(2)*}(k_{\perp l})) -$$

$$\frac{1}{\cos\theta_i} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} k^2 \sin\theta_s \cos^2\theta_s W(k_{\perp l} - k_{\perp l}) \times$$

$$[|f_{hv}^{(1)}(k_{\perp l}, k_{\perp l})|^2 + |f_{vv}^{(1)}(k_{\perp l}, k_{\perp l})|^2] d\theta_s d\phi_s \quad (5b)$$

$$e_u = 2\text{Re}(R_{h0} f_{hv}^{(2)*}(k_{\perp l})) +$$

$$\int_0^{\pi/2} d\theta_s \int_0^{2\pi} \frac{k^2 \cos^2\theta_s \sin\theta_s}{\cos\theta_i} W(k_{\perp l} - k_{\perp l}) \times$$

$$2\text{Re}[f_{hh}^{(1)}(k_{\perp l}, k_{\perp l}) f_{hv}^{(1)*}(k_{\perp l}, k_{\perp l})] d\phi_s +$$

$$2\text{Re}(R_{v0} f_{vh}^{(2)*}(k_{\perp l})) +$$

$$\int_0^{\pi/2} d\theta_s \int_0^{2\pi} \frac{k^2 \cos\theta_s \sin\theta_s}{\cos\theta_i} W(k_{\perp l} - k_{\perp l}) \times$$

$$2\text{Re}[f_{vv}^{(1)}(k_{\perp l}, k_{\perp l}) f_{vh}^{(1)*}(k_{\perp l}, k_{\perp l})] d\phi_s \quad (5c)$$

$$e_v = -2 \operatorname{Im}(R_{h0} \hat{f}_{hv}^{(2)*}(\mathbf{k}_{i\perp})) + 2 \operatorname{Im}(R_{v0} \hat{f}_{vh}^{(2)*}(\mathbf{k}_{i\perp}))$$

$$\int_0^{\pi/2} d\theta_s \int_0^{2\pi} \frac{k^2 \cos^2 \theta_s \sin \theta_s}{\cos \theta_i} W(\mathbf{k}_{s\perp} - \mathbf{k}_{i\perp}) \times$$

$$[-2 \operatorname{Im}(\hat{f}_{hh}^{(1)}(\mathbf{k}_{s\perp}, \mathbf{k}_{i\perp}) \hat{f}_{vv}^{(1)*}(\mathbf{k}_{s\perp}, \mathbf{k}_{i\perp})) +$$

$$2 \operatorname{Im}(\hat{f}_{vv}^{(1)}(\mathbf{k}_{s\perp}, \mathbf{k}_{i\perp}) \hat{f}_{hh}^{(1)*}(\mathbf{k}_{s\perp}, \mathbf{k}_{i\perp}))] d\phi_s \quad (5d)$$

式中,  $R_{h0}$ ,  $R_{v0}$  分别为水平和垂直极化下的 Fresnel 反射系数, 式 (5) 中二阶全极化散射幅度<sup>[9]</sup>分别为,

$$\hat{f}_{hh}^{(2)}(\mathbf{k}_{i\perp}) = -\frac{2k_{iz}(k_i^2 - k^2)}{(k_{iz} + k_{iz})^2} \left\{ -k_{iz} \int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{k}_{s\perp} - \mathbf{k}_{i\perp}) d\mathbf{k}_{s\perp} + \right.$$

$$(k_i^2 - k^2) \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \sin^2(\phi_s - \phi_i) \frac{k_s k_{sz}}{k_i^2 k_{sz} + k^2 k_{sz}} + \right.$$

$$\left. \left. \cos^2(\phi_s - \phi_i) \frac{1}{k_{sz} + k_{sz}} \right] W(\mathbf{k}_{s\perp} - \mathbf{k}_{i\perp}) d\mathbf{k}_{s\perp} \right\} \quad (6a)$$

$$\hat{f}_{vv}^{(2)}(\mathbf{k}_{i\perp}) = -\frac{2k(k_i^2 - k^2)}{k_{iz}(k_i^2 k_{iz} + k^2 k_{iz})} \left\{ k_{iz} \int_{-\infty}^{\infty} k_i^2 k_{iz} k \times \right.$$

$$W(\mathbf{k}_{s\perp} - \mathbf{k}_{i\perp}) d\mathbf{k}_{s\perp} + k_{iz}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left[ -\sin^2(\phi_s - \phi_i) \times \right.$$

$$\left. \frac{k k_{iz}^2 (k_i^2 - k^2)}{k_{iz} + k_{sz}} + \cos^2(\phi_s - \phi_i) \frac{1}{k_{iz} + k_{sz}} \right] \times$$

$$W(\mathbf{k}_{s\perp} - \mathbf{k}_{i\perp}) d\mathbf{k}_{s\perp} \right\} \quad (6b)$$

$$\hat{f}_{hv}^{(2)}(\mathbf{k}_{i\perp}) = -\frac{2k(k_i^2 - k^2)}{(k_{iz} + k_{iz})(k_i^2 k_{iz} + k^2 k_{iz})} \times$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{k}_{s\perp} - \mathbf{k}_{i\perp}) d\mathbf{k}_{s\perp} \left[ -\sin(\phi_s - \phi_i) \times \right.$$

$$\left. \frac{k_i^2 k_p k_{pi}}{k_{sz} + k_{sz} k_{iz}} + \frac{(k_i^2 - k^2) k_p k_{iz}}{2(k_i^2 k_{iz} + k^2 k_{iz})} \sin 2(\phi_s - \phi_i) \right] \quad (6c)$$

$$\hat{f}_{vh}^{(2)}(\mathbf{k}_{i\perp}) = -\hat{f}_{hv}^{(2)}(\mathbf{k}_{i\perp}) \quad (6d)$$

### 2.2 反射系数的修正

在对海洋进行微波的主、被动遥感中, 海水表面膜等因素的存在, 会明显改变海面的电磁散射特性。由于油膜平滑粗糙海面并与海水组成薄的混合层, 它具有复介电常数的特性, 是频率、海面温度和盐度的函数, 电磁波在其中传播时会发生衰减, 从而会影响到 Fresnel 反射系数的计算。在海水介电常数的求取方面, Meissner 等人<sup>[10]</sup>针对 Klein 提出的改进模型不能适用于高频 ( $f > 85.5 \text{GHz}$ ) 和低温 ( $T_s < -20^\circ\text{C}$ ) 的缺点, 采用两个 Debye 方程对其作了进一步拓展。在使用介电常数计算海面特性的常见文献中, 都没有考虑复折射率虚部  $n''$  的衰减影响。这种忽略近似对于可见光遥感是正确的, 但对微波波段

却不适合, 因为此时虚部  $n''$  与实部  $n'$  相比不可忽略。这里基于介电常数已知的条件, 采用 Guillou 等人<sup>[11]</sup>提出的考虑了衰减的 Fresnel 公式, 即

$$R_{h0} = \frac{\cos \theta_i - \frac{\epsilon_{r2} - \left(\frac{n_2}{n_1} \frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}{\epsilon_{r1}}}{\cos \theta_i + \frac{\epsilon_{r2} - \left(\frac{n_2}{n_1} \frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}{\epsilon_{r1}}} \quad (7a)$$

$$R_{v0} = \frac{(\epsilon_{r2} / \epsilon_{r1}) \cos \theta_i - \frac{\epsilon_{r2} - \left(\frac{n_2}{n_1} \frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}{\epsilon_{r1}}}{(\epsilon_{r2} / \epsilon_{r1}) \cos \theta_i + \frac{\epsilon_{r2} - \left(\frac{n_2}{n_1} \frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}{\epsilon_{r1}}} \quad (7b)$$

式中,  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$  分别表示空气和海水的相对介电常数,  $n_1$ ,  $n_2$  分别表示空气和海水的复折射率,  $n = n' - jn''$ , 式中  $n'$  代表电磁波的折射,  $n''$  代表电磁波的衰减, 复折射率可由 Debye 方程来计算。在式 (7) 中, 若将  $\sin^2 \theta_i$  项前的系数置为 1, 即得传统的 Fresnel 公式。

### 2.3 泡沫的影响

由于风的驱动, 海面会产生很多泡沫, 泡沫的多少会影响到海面的发射率。为了分析风速对亮温的影响, 采用经验修正的泡沫因子<sup>[12]</sup>, 即

$$F = b_0 + b_1 v + b_2 v^2 \quad (8)$$

式中,  $v$  表示风速,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  表示包含照射波频率  $f$  的系数, 即

$$b_0 = 1.707 \times 10^{-2} + 8.560 \times 10^{-4} f + 1.120 \times 10^{-5} f^2 \quad (9a)$$

$$b_1 = -1.501 \times 10^{-2} + 1.821 \times 10^{-3} f - 4.634 \times 10^{-5} f^2 \quad (9b)$$

$$b_2 = 2.442 \times 10^{-4} - 2.282 \times 10^{-6} f + 4.194 \times 10^{-7} f^2 \quad (9c)$$

则可求得考虑泡沫效应的修正亮温  $T_{BM}$  的计算表达式, 即

$$T_{BM\gamma}(\theta_i, \phi_i) = T_{B\gamma}(\theta_i, \phi_i)(1 - F + F^2/2) \quad (10)$$

式中, 下标  $\gamma = 1, 2, 3, 4$ , 代表四个 Stokes 分量。

### 3 算例与分析

为了对比高、低阶微扰法求解的精度, 首先利用式 (3) 和式 (5) 计算了某海面的发射率, 并和矩量法 (MOM) 求解的结果<sup>[13]</sup>进行了比较, 结果如图 1 所示。其中表面参数为, 介电常数  $\epsilon_r = 54 - j38.5$ , 照射频率  $f = 8.36 \text{GHz}$ , 海面相关长度  $l = 0.011 \text{m}$ , 均方根高度  $\sigma = 0.001 \text{m}$ , 海面物理温度  $T_s = 300 \text{K}$ 。需要

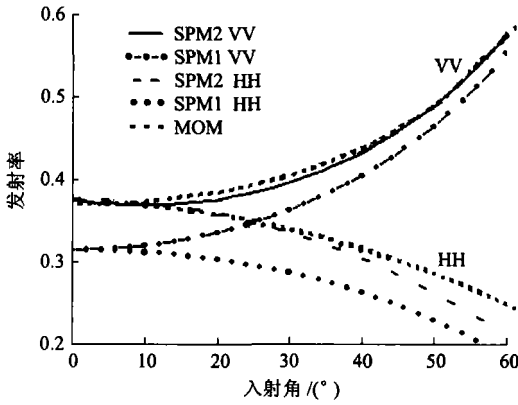


图 1 一阶、二阶微扰法求解发射率的比较  
Fig 1 Comparison of emission computed by first- and second-SPM to MOM

首先指出的是,若无特别说明,后面图示计算的参数同图 1。从图 1 可以看出,与一阶微扰法 (SPM1) 求解结果相比,二阶微扰法 (SPM2) 与矩量法匹配较好,特别是 VV 极化的情况。在天顶角附近,一、二阶微扰法求解发射率相差高达 0.07,当转化为亮温时就高达 21K。这就说明二阶微扰法能更好的逼近求解问题的精度,因为此时求解的结果中包含了高阶场分量的影响。

为验证高阶微扰法求解的有效性,还计算了不同海面均方根高度  $\sigma$  下的发射率,结果如图 2 所示。从图中可以看出,发射率随着海面粗糙度的增大而增加,且  $\epsilon_v$  增加的幅度远大于  $\epsilon_h$  的变化,当  $\sigma$  超过  $0.3\lambda$  时,  $\epsilon_v$  出现负值,此时求解方法失效。同时,也对低介电常数的土壤,在不同  $\sigma$  下的发射率进行了计算。结果表明,表面介质参数越小,SPM 求解的有效范围越大。

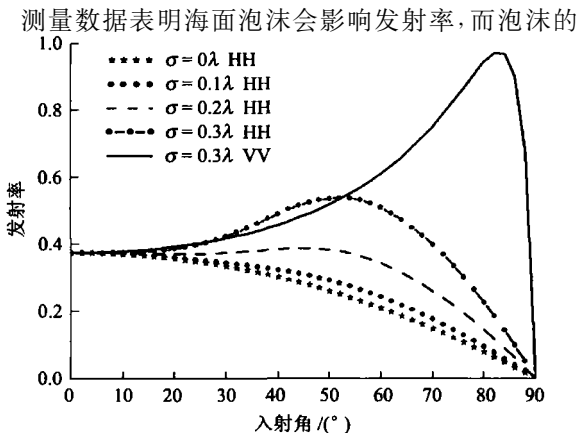


图 2 不同均方根高度的发射率  
Fig 2 Emission with different rms

多少又与频率和风速有关。为了分析两者的影响,在照射频率分别为 8.36GHz 和 19GHz 下,采用图 1 的参数,计算了海面的亮温。结果表明,在这些频率下,泡沫的存在会增加前两个 Stokes 参量,而后两个参量则会减小,且频率越高影响越大。亮温在不同入射角下,随风速的变化比较如图 3 中实线和虚线所示。从图中可以发现,随着风速的增加,亮温会减小,当风速增加到 50m/s 后,亮温又开始增加。而随着入射角的增大,亮温也减小,这是由于在大入射角下,存在阴影和遮挡效应的缘故。同时,在图 3 中用点线图示了亮温随频率在 0-50GHz 内变化的情况。从图中可以看出,在 K 波段范围内亮温随着频率的增加而增加,在 Ka 波段内则相反,当频率超过 60.5GHz 时二阶微扰法失效。从比较结果可以看出,考虑二阶场分量时的微扰法的适用范围得到了很大拓展。

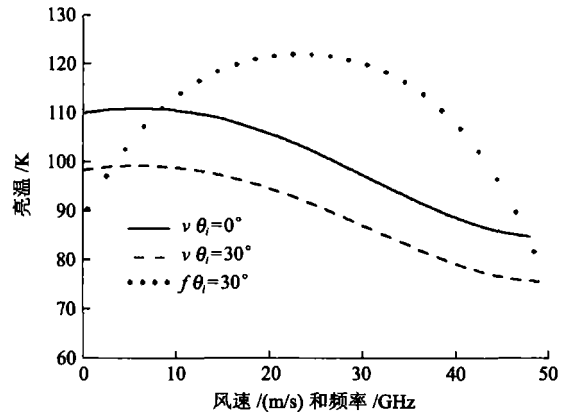


图 3 泡沫对亮温的影响  
Fig 3 Effect of foam for brightness temperature

为了用高阶微扰法来验证第三和第四个 Stokes 发射率分量及其特性,利用 (5c) 和 (5d) 两式计算了  $U_B, V_B$  随方位角变化的情况,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,在幅值上  $U_B$  和  $V_B$  均远小于  $T_{Bh}$  与  $T_{Bv}$ ,与海面温度 ( $T_s = 300K$ ) 相比仅占 3% 左右。随着表面介质参数的减小,  $U_B$  和  $V_B$  的值也随之减小,如对土壤 ( $\epsilon_r = 17 + j2$ ) 而言,只占 1.5% 左右。这正是后两个 Stokes 参量发现较晚的缘故。对 4 个 Stokes 参量计算表明,在随风向方位角的变化上,  $U_B$  和  $V_B$  是方位角的奇函数,  $T_{Bh}$  和  $T_{Bv}$  是方位角的偶函数。

为定量分析海面的衰减特性,对水平极化 (HH) 下是否考虑电磁波衰减时的 Fresnel 反射系数进行了比较,结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,当入射角在 (20-60°) 的范围内变化时,复折射率对反射系数影响较大,当入射角为 58° 时这种影响

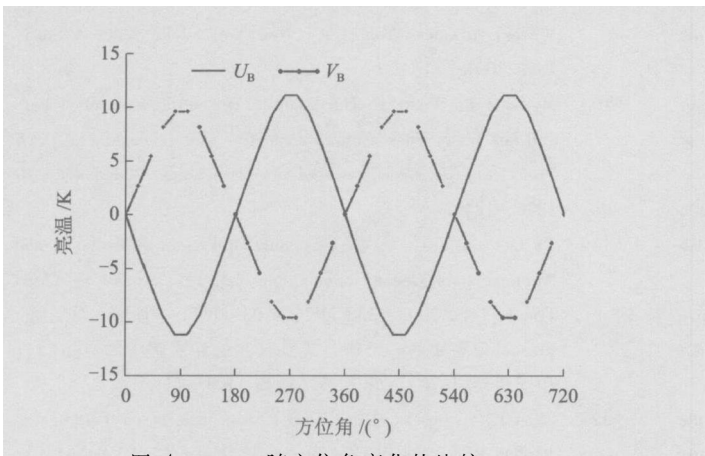


图 4  $U_B$ 、 $V_B$  随方位角变化的比较

Fig 4 Comparison of  $U_B$  and  $V_B$  with azimuth angles

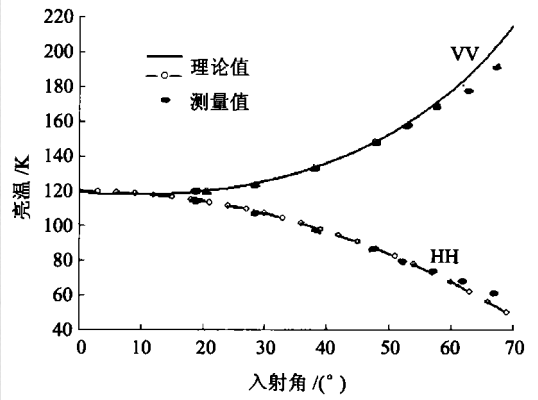


图 6 二阶微扰法求解海面亮温的比较

Fig 6 Comparison of computation by second-order SPM to measurement for brightness temperature

达到最大值,有 5dB 的差异,反演到亮温计算中时就有 0.15K 的差异。由图 5 比较可知,介电常数越大,复折射率的影响程度越大,对亮温的修正也越大,这也表明此时海表面盐度越大。因此,考虑复折射率的影响,将有助于更加准确的计算亮温,从而作出对海况信息的准确判定。

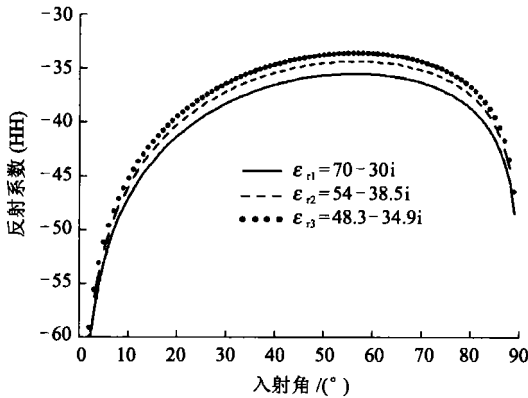


图 5 复折射率对 Fresnel 反射系数的影响

Fig 5 Fresnel reflectance influenced by complex refractive index

为验证高阶微扰法求解的有效性,以及海面参数对亮温的影响,采用二阶微扰法,并综合考虑反射系数的修正、风速、泡沫的影响,计算了某海面的亮温,并和实测结果<sup>[14]</sup>进行了比较,比较结果如图 6 所示。其中,测量值取自 Sandlin<sup>[15]</sup>对海面粗糙度进行被动微波遥感测量时获得的亮温值,海面物理温度为 291K,风速 14.7m/s  $k\sigma = 1.0$ ,  $kI = 0.2$ ,介电常数同图 1。从图 6 中可以看出,在中小入射角度内,考虑场的高阶分量及海面特性的亮温计算的理论与测量值吻合较好,特别是在观测角小于 60° 的范

围内,这就充分证明了采用高阶微扰法求解的有效性。但当观测角大于 60° 时,同极化下的理论计算值与测量结果均有差异,VV 极化下的差异更为明显,其均方差高达 15.5K。大观察角下二者间的较大差异,很可能是因为在理论计算中没有考虑大气辐射影响的缘故。

### 4 结 论

本文在深入分析粗糙海面发射率求解模型及其计算方法的基础上,提出采用高阶微扰法求解 Stokes 向量模型的新算法。在分析过程中,通过采用一阶、二阶微扰法,对比研究了二维粗糙海面亮温的四个 Stokes 参数及其随风向方位角变化的特性,数值计算验证了后两个 Stokes 参量的存在,计算表明前两个 Stokes 参量的幅值远大于后两个参量,且前两个参量随风向方位角变化呈偶函数特性,后两个参量呈奇函数特性。文中利用二阶微扰法,定量分析了海水介电常数的复折射率和泡沫等因素对亮温的修正影响,结果表明泡沫的存在将使前两个 Stokes 亮温数值增加,后两个亮温数值减小。理论计算和实测结果比较表明,考虑海面特性的高阶微扰法能更好的求解 Stokes 的 4 个亮温参量,从而证明了该方法是有效的。

### 参 考 文 献 (References)

[ 1 ] Thorsos E I Acoustic Scattering from a Pierson-Moskowitz Sea Spectrum [J]. Journal of Acoustical Society American, 1990, 88: 335-349.  
 [ 2 ] Dunlen S L, Vesecky J F. A Physical Radar Cross-Section Model

- for a Wind Driven Sea with Swell[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1985, **10**: 445-451.
- [3] Apel J R. An Improved Model of the Ocean Surface Wave Vector Spectrum and Its Effects on Radar Backscatter[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, **99**: 16269-16291.
- [4] Tsang L, Kong J A, Ding K. Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications[M], New York: John Wiley & Sons, INC, 2001.
- [5] Wu S T, Fung A K. A Noncoherent Model for Microwave Emissions and Backscattering from the Sea Surface[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, **77**: 5917-5929.
- [6] Romeiser R, Alpers W. An Improved Composite Surface for the Radar Backscattering Cross-section of the Ocean Surface: Theory of the Model and Optimization/Validation by Scatterometer[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, **102**: 25237-25250.
- [7] Voronovich A G. The Effect of the Modulation of Bragg Scattering in Small-slope Approximation [J]. Waves in Random Media, 2002, **12**: 341-349.
- [8] Johnson J T. A Study of Ocean-like Surface Thermal Emission and Reflection Using Voronovich's Small Slope Approximation [J]. IEEE Tran on Geosci Remote Sensing, 2005, **43**(2): 306-314.
- [9] Tsang L, Kong J A, Ding K. Scattering of Electromagnetic Waves: Advanced Topic[M], New York: John Wiley & Sons, INC, 2001.
- [10] Meissner T, Wentz J. The Complex Dielectric Constant of Pure and Sea Water from Microwave Satellite Observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, **42**(9): 1836-1849.
- [11] Xu Q, Liu Y G. A New Formula of Fresnel Reflectance and Application in Ocean Remote Sensing [J]. Science in China (Series D), 2003, **33**(11): 1103-1111. [徐青, 刘玉光. Fresnel反射率的一个新公式及其在海洋遥感中的应用 [J]. 中国科学 (D辑), 2003, **33**(11): 1103-1111.]
- [12] Zhou L, Tsang L, Ding K H. Foam Effects on Polarimetric Passive Microwave Remote Sensing of Ocean Wind Vectors [A]. IGASS'02[C], 2002.
- [13] Floury N, Toso G. The Sea Surface at L-band Microwaves: Modeling and Applications [J]. SPIE, 2002, **4544**: 152-159.
- [14] Ulaby F T, Moore R K, Fung A F. Microwave Remote Sensing II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory[M]. New York: Addison Wesley Publishing, 1982.
- [15] Sandlin G D, Rose L A, Hollinger J P. Passive Microwave Measurements of sea surface Roughness During the Saxon Experiment [A]. IGASS'89[C], 1989.