高阶微扰法的有效性研究

童创明[1,2], 黄泽贵[1], 胡国平[1]
(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800; 2. 中国人民解放军驻电子 29 所军事代表室, 四川成都 610036)

摘 要: 通过二维地、海面发射率的研究, 研究了高、低阶微扰法的有效性, 分析了不同极化方式、表面模型和介电常数的影响, 得到了均方根高度的有效范围, 给出了高斯模型的相关长度的匹配范围. 结果表明, 模型差异不影响低阶微扰法求解时均方根高度的有效值, 但对高阶微扰法的结果影响很大; 高斯模型下, 高阶微扰法求解时相关长度的有效值远小于低阶时的结果. 理论与矩量法计算及测量值的比较, 证明了高阶微扰法的有效性.

关键词: 粗糙表面; 发射率; 高阶微扰法; 有效性
中图分类号: TP722.6/P71 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2007) 09-1745-04

Study of Validity of High-Order Small Perturbation Method

TONG Chuang-ming[1,2], HUANG Ze-gui[1], HU Guo-ping[1]
(1. *Missile Institute of Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China; 2. Military Representative of PLA at Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu, Sichuan 610036, China*)

Abstract: Validity of small perturbation method (SPM) and high-order SPM (HSPM) is studied by evaluating the emissivity of two-dimensional rough ground and sea surface. The influences of surface model, permittivity and polarization on validity of HSPM and SPM are analyzed. The valid range of root means square (RMS) and correlation length (CL) for HSPM and SPM is obtained from two-dimensional rough surface. Results show that the diversity of different models does not affect the validity of SPM almost, which, however, is not true for HSPM. As for the Gaussian rough surface, the valid range of CL obtained by HSPM is far less than that by SPM. By comparing the simulation results, method of moment results and measured data, it is seen that HSPM is valid.

Key words: rough surface; emissivity; high-order small perturbation method; validity

1 引言

电波传播、通信、目标识别分类、环境系统检测、遥感、生物医学诊断、工程材料测试等众多学科的应用需要, 推动了粗糙表面研究的深入发展. 在解析法求解中, 一个重要问题就是算法的有效性研究. 在微扰法(Small Perturbation Method, SPM)的有效性研究中, Thorsos[1] 研究了 SPM 求解一维高斯粗糙表面散射特性时的有效性, 给出了粗糙表面相关长度 l 和均方根高度 h 对有效性的影响. Kim 等人[2] 研究了 SPM 求解一维周期性导体粗糙表面的散射特性, 分析了 SPM 在低掠入射角下的有效性. 结果表明, 水平极化下, 当 $l=0.1\sim0.2\lambda$ 时, 所有入射角下 $h<0.08\lambda$; 垂直极化下, 当 $l=0.2\sim0.4\lambda$ 时, 中小入射角下 $h<0.05\lambda$, 当入射角大于 80° 时, SPM 求解无效; 当 $l>0.4\lambda$ 时, 两种极化下的有效范围均减小.

以上有效性的研究, 仅限于一维粗糙表面和一阶微扰法. 近年来海况遥感信息研究的深入[3], 以及大量卫星试验数据的有效获取, 推动了高阶微扰法(High-order SPM, HSPM)的深入研究[4]. 而关于 HSPM 求解二维粗糙面的有效性研究, 还未见公开报道. 因此, 采用 HSPM 和 SPM 来求解二维粗糙地、海面的发射率, 通过能量守恒定律来研究 HSPM 和 SPM 在不同极化方式及表面模型下的有效性, 并探讨表面特征参数对有效性的影响.

2 理论推导

由 SPM 求得的散射幅度[5] $f_{\alpha\beta}^{(1)}(\alpha, \beta = h, v)$, h 和 v 分别表示水平和垂直极化, 则可求得发射率 e 的斯托克斯分量为

$$\begin{bmatrix} e_h(\theta_i, \phi_i) \\ e_v(\theta_i, \phi_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{\cos\theta_i}\int_0^{\pi/2}\int_0^{2\pi} k^2 \sin\theta_s \cos^2\theta_s \times W(k_{s\perp} - k_{i\perp}) \begin{bmatrix} |f_{hh}^{(1)}|^2 + |f_{vh}^{(1)}|^2 \\ |f_{hv}^{(1)}|^2 + |f_{vv}^{(1)}|^2 \end{bmatrix} \mathrm{d}\theta_s \mathrm{d}\phi_s \quad (1)$$

收稿日期: 2006-05-08; 修回日期: 2006-11-30
基金项目: 陕西省自然科学基金(No. 2005F23)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中, $\boldsymbol{k}_i$ 和 $\boldsymbol{k}_s$ 分别表示入射波和散射波矢量, $\perp$ 和 z 分别表示水平和垂直方向, k 和 k_1 分别表示空气和介质中的波数, (θ_i, ϕ_i) 和 (θ_s, ϕ_s) 分别表示入射和散射方向的高低和方位角, $W(k_{s\perp} - k_{i\perp})$ 表示粗糙表面的功率谱函数, 当采用高斯型谱函数来表征粗糙表面的功率谱函数时, 有

$$W(k_{s\perp} - k_{i\perp}) = \frac{l^2 h^2}{4\pi} \exp(-|k_{s\perp} - k_{i\perp}|^2 l^2/4) \quad (2)$$

为了比较不同表面模型对散射特性的影响, 也给出二维指数粗糙表面的功率谱函数为

$$W(k_{s\perp} - k_{i\perp}) = \frac{h^2 l^2}{2\pi} (1 + |k_{s\perp} - k_{i\perp}|^2 l^2)^{-3/2} \quad (3)$$

当采用二阶微扰法求解时, 可推导求得水平和垂直极化下的发射率分别为,

$$e_{hh} = 1 - |R_{h0}|^2 - 2\mathrm{Re}(R_{h0} \tilde{f}_{hh}^{(2)*}(k_{i\perp})) - \frac{1}{\cos\theta_i} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} k^2 \sin\theta_s \cos^2\theta_s W(k_{s\perp} - k_{i\perp}) \times \left[|f_{hh}^{(1)}(k_{s\perp}, k_{i\perp})|^2 + |f_{vh}^{(1)}(k_{s\perp}, k_{i\perp})|^2 \right] \mathrm{d}\theta_s \mathrm{d}\phi_s \quad (4a)$$

$$e_{vv} = 1 - |R_{v0}|^2 - 2\mathrm{Re}(R_{v0} \tilde{f}_{vv}^{(2)*}(k_{i\perp})) - \frac{1}{\cos\theta_i} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} k^2 \sin\theta_s \cos^2\theta_s W(k_{s\perp} - k_{i\perp}) \times \left[|f_{hv}^{(1)}(k_{s\perp}, k_{i\perp})|^2 + |f_{vv}^{(1)}(k_{s\perp}, k_{i\perp})|^2 \right] \mathrm{d}\theta_s \mathrm{d}\phi_s \quad (4b)$$

其中, R_{h0}, R_{v0} 分别为水平和垂直极化下的 Fresnel 反射系数, 式(4)中二阶全极化散射幅度[5]分别为,

$$\tilde{f}_{hh}^{(2)}(k_{i\perp}) = -\frac{2k_{iz}(k_1^2 - k^2)}{(k_{iz} + k_{1iz})^2} \left\{ -k_{1iz} \int_{-\infty}^{\infty} W(k_{s\perp} - k_{i\perp}) \mathrm{d}k_{s\perp} + (k_1^2 - k^2) \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sin^2(\phi_s - \phi_i) \frac{k_{sz} k_{1sz}}{k_1^2 k_{sz} + k^2 k_{1sz}} + \cos^2(\phi_s - \phi_i) \frac{1}{k_{1sz} + k_{sz}} \right] W(k_{s\perp} - k_{i\perp}) \mathrm{d}k_{s\perp} \right\} \quad (5a)$$

$$\tilde{f}_{vv}^{(2)}(k_{i\perp}) = -\frac{2k(k_1^2 - k^2)}{k_{iz}(k_1^2 k_{iz} + k^2 k_{1iz})^2} \left\{ k_{1iz} \int_{-\infty}^{\infty} k_1^2 k_{isz} k W(k_{s\perp} - k_{i\perp}) \mathrm{d}k_{s\perp} + k_{iz}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left[-\sin^2(\phi_s - \phi_i) \frac{k k_{1sz}^2 (k_1^2 - k^2)}{k_{1sz} + k_{sz}} + \cos^2(\phi_s - \phi_i) \frac{1}{k_{1sz} + k_{sz}} \right] W(k_{s\perp} - k_{i\perp}) \mathrm{d}k_{s\perp} \right\} \quad (5b)$$

由瑞利-金斯定律和基尔霍夫定律知, 表面亮温 T_B 和发射率有如下关系式

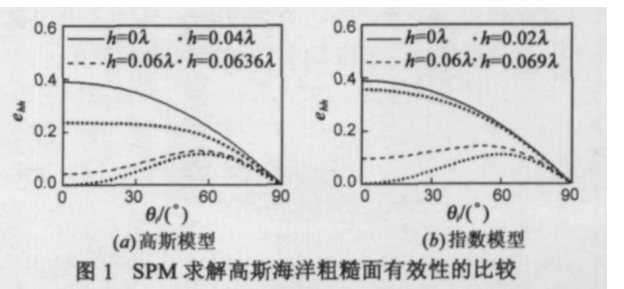
$$T_B(\lambda, \theta_i, \phi_i, T_s) = e(\lambda, \theta_i, \phi_i) T_s \quad (6)$$

其中, T_B 代表亮温, 它是入射波长 λ、高低角 θ_i、方位角 ϕ_i 和海面物理温度 T_s 等的函数.

在研究HSPM 和 SPM 的有效性时, 利用了能量守恒定律, 亦即粗糙表面的发射率和反射率之和等于 1. 在具体应用时, 就是根据不同相关长度 l 和均方根高度 h 下二维粗糙面的发射率不大于 1, 来判定 l 和 h 的最大有效值. 因此, 下面针对不同介质粗糙面, 通过多次求解式(1)、(4)在不同极化和模型下的发射率, 来全面分析微扰法的有效性.

3 算例与分析

首先, 为了和以往 SPM 求解一维粗糙面的有效性进行对比, 根据式(1)、(2)和(3)计算了 SPM 求解二维海洋粗糙面的有效性, 如图 1 所示, 照射频率 8.36GHz, 介电常数 $\varepsilon_r = 48.3 - j34.9$. 为了分析不同表面模型对有效性的影响, 也给出了指数模型下 SPM 求解的结果. 由图 1 所示数据可知, 得到了比 Kim 等人更精确的判据.

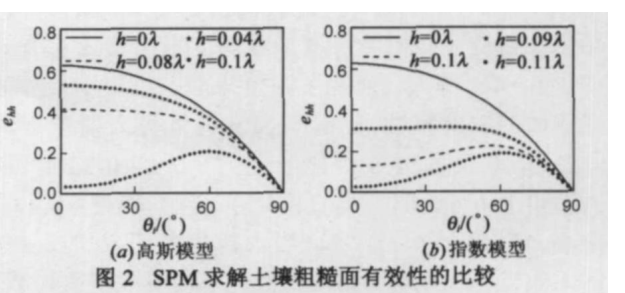


(a)高斯模型 (b)指数模型

图 1 SPM 求解高斯海洋粗糙面有效性的比较

计算表明, 水平、垂直极化下 SPM 求解的发射率随着 h 的增加均减小, 且小角度入射时不同 h 对应的结果相差很大. 图 1 中不同模型的对比表明, 指数模型的有效范围略大于高斯模型. 究其原因, 从式(1)中可以看出, 水平、垂直极化下发射率的差异是由功率谱函数和一阶散射幅度决定, 而当 h 在很小取值变化的前提下, 式中的反射率分量相差很小, 从而使得 SPM 有效性的判据与极化和模型几乎不相关. 计算和理论分析的结果表明, SPM 的有效性与极化方式无关, 模型对其有效性的影响也很小.

为了分析表面特征参数对发射率的影响, 根据图 1 的算式, 也计算了土壤粗糙表面的发射率, 结果如图 2 所示. 其中, 土壤介电常数 $\varepsilon_r = 17 - j2$, 照射频率为 1.5GHz. 从图 2 可以看出, 土壤粗糙面发射率随 h 的变化规律与海洋粗糙面相似, 只是土壤表面 h 的有效范围值更大, 这就说明表面介电常数越小(模值), 微扰法的有效范围越大. 不同模型的比较, 也得到了相同的结论.



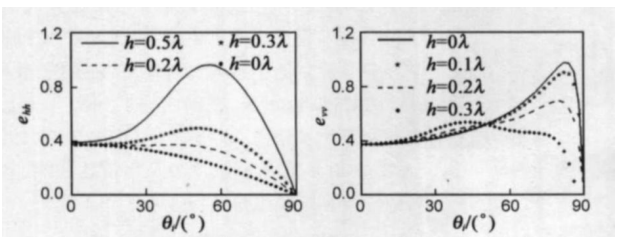
(a)高斯模型 (b)指数模型

图 2 SPM 求解土壤粗糙面有效性的比较

为了研究HSPM 求解的有效性, 根据式(4)和(2)也计算了图 1 的二维海洋粗糙表面的发射率, 结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 垂直极化下, 发射率随着 h 的增加而减小; 但与 SPM 不同的是, 水平极化下, 发射率随着

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

h 的增加却增加, 但当 $h>0.5\lambda$ 时, 不再满足能量守恒原理, HSPM 求解无效. 因此, 应以水平极化下发射率随 h 的变化来研究 HSPM 的有效性. 此外, 对比图 3 和图 1 还发现, HSPM 在中等入射角下不同 h 对应的结果相差较大, 而 SPM 则相反, 究其原因是因为 HSPM 考虑了高阶散射场分量的缘故. 对比式(1)和(4)可知, 正是由于高阶场分量引入的二阶全极化散射分量的影响, 使得 HSPM 的有效性受极化方式和模型的影响很大.



(a) 水平极化　(b) 垂直极化

图 3　HSPM 求解高斯海洋粗糙面有效性的比较

为了便于直观比较, 表 1 给出了 HSPM 在不同极化方式和模型下, 求解不同介质类型粗糙面时均方根高度 h 的最大有效值. 为了对高、低阶微扰法的有效性进行对比, 表 1 也给出了 SPM 求解二维粗糙面时 h 的最大有效值. 表 1 中 16 组数据的比较表明, HSPM 的有效范围明显得到了拓展, 且水平极化拓展的幅度大于垂直极化. SPM 求解时, 同一模型下, 不同极化 h 的最大有效值相同, 这就说明 SPM 的有效性与表面模型无关, 这也正是传统 SPM 的适用条件没有限定表面模型的缘故; 同一极化下, 不同模型对发射率的影响很小. HSPM 求解时, 同一模型下, 不同极化下 h 的最大有效值不同, 水平极化大于垂直极化; 同一极化下, 海洋粗糙面 h 的最大有效值比较是高斯模型大于指数模型, 而土壤粗糙面则是指数模型大于高斯模型. 而表面介电常数对高、低阶微扰法的影响规律是, HSPM 求解水平极化的高斯海面时, h 随介电常数的减小而减小, 其他情况下都是随介电常数的较小而增大. 这也说明, 在研究 HSPM 的适用条件时, 除了考虑微扰法本身作微扰展开的特性要求外, 还应考虑多次散射场和表面参数对有效性的影响.

表 1　高低阶微扰法有效性的比较(h)

极化方式 / 表面类型	水平极化(λ)		垂直极化(λ)	
	SPM	HSPM	SPM	HSPM
高斯海洋表面	0.06363	0.512	0.06364	0.301
指数海洋表面	0.06908	0.443	0.06909	0.216
高斯土壤表面	0.10304	0.408	0.10306	0.392
指数土壤表面	0.11231	0.56	0.11233	0.307

需要说明的是, 不同 h 下高、低阶微扰法的有效性判据, 是在微扰展开有效的前提下进行的, 表 1 中 h 的有效值是在 $l=\lambda$ 的条件下得到的. 但进一步计算表 1 中的 16 种组合表明, 在求解高斯模型时, 与 h 匹配的 l 也存在一个有效范围值, 如 SPM 求解水平极化的高斯海面时, l 的有效取值范围为 1~42.5 个波长, 其他情况如表 2 所示, 这与 Thorsos 和 Kim 等人所得的结论不同. 从表 2 可知, HSPM 求解有效时, 表面介电常数模值越大, l 的有效范围越小; SPM 求解时, 模值越大, l 的有效范围亦越大; 相同表面和极化方式下, HSPM 求解的有效表面长度远小于 SPM. 此外, 指数模型的计算却表明, h 与 l 是单值匹配关系.

表 2　相关长度的匹配比较(高斯模型)

极化方式 / 表面类型	水平极化(λ)		垂直极化(λ)	
	SPM	HSPM	SPM	HSPM
海洋表面	[1, 42.5]	[1, 2.75]	[1, 42.5]	[1, 3.16]
土壤表面	[1, 40.25]	[1, 3.82]	[1, 40.25]	[1, 3.87]

为了说明高阶微扰法求解的有效性, 在 HSPM 的有效范围内, 利用式(1)、(4)和(2)计算了某海面的发射率, 并和 SPM 及矩量法(MOM)求解的结果[6]进行了比较, 结果如图 4 所示. 其中, 照射频率 8.36GHz, 介电常数 $\varepsilon=54-j38.5$, 海面相关长度 $l=0.011$m, 均方根高度 $h=0.001$m, 海面物理温度 $T_s=300$K. 从图 4 可以看出, 与 SPM 求解结果相比, 高阶微扰法与矩量法匹配较好, 特别是 VV 极化的情况. 在垂直入射时, HSPM 和 SPM 求解结果相差高达 0.07, 转化为亮温时就高达 21K. 这就说明高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, 这也说明了发展高阶微扰法的必要性.

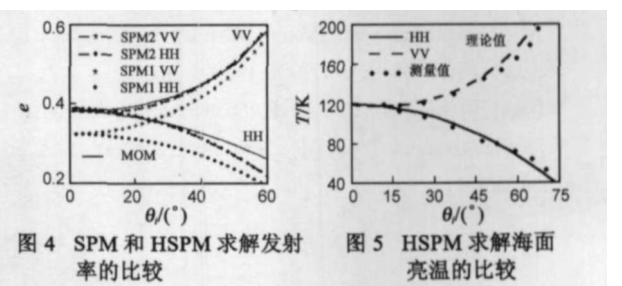


图 4　SPM 和 HSPM 求解发射率的比较　　图 5　HSPM 求解海面亮温的比较

为验证 HSPM 求解的有效性, 根据式(4)和(2)计算了某海面的亮温, 并和实测结果[7]进行了比较, 比较结果如图 5 所示. 其中, 测量值取自 Hollinger 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, $k\sigma=1.0$, $kl=0.2$, 介电常数同图 1. 需要说明的是, 采用 HSPM 计算时, 综合考虑了 Fresnel 反射系数的修正以及风速、泡沫的影响. 从图 5 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值与测量值吻合较好, 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仍有差异, 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, 很可能是因为理论计算中没有考虑大

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气辐射影响的缘故.

4 结论

在深入分析粗糙表面发射率的基础之上,首次根据能量守恒定律研究了高、低阶微扰法求解二维粗糙面的有效性,分析了不同模型和介电常数对有效性的影响,得到了判定不同表面在不同模型和不同极化方式下,高、低阶微扰法有效时的最大均方根范围值,得到了高斯模型下高、低阶微扰法有效时相关长度的有效匹配范围.理论计算和实测结果的比较表明,高阶微扰法能更好的求解 Stokes 的亮温参量,从而验证了高阶微扰法求解的有效性.

参考文献:

[1] Thorsos E I, Jackson D R. The validity of the perturbation approximation for rough surface scattering using Gaussian roughness spectrum[J]. Journal of Acoustic Society America, 1989, 86(2): 261- 277.

[2] Kim M-J, Stoddart A J. The region of validity of perturbation theory[J]. Waves in Random Media, 1993, 3(4): 325- 342.

[3] Johnson J T. A study of ocean-like surface thermal emission and reflection using Voronovich's small slope approximation [J]. IEEE Transaction on Geoscience Remote Sensing, 2005, 43(2): 306- 314.

[4] Huang Z G, Tong C M, Hu G P, et al. Study of the low grazing incident effects from fractal Brownian motion rough sea surface [A]. Seventeenth Asia-Pacific Microwave Conference[C]. Suzhou, China: Hong wei, 2005. 1. 299- 302.

[5] Tsang L, Kong J A, Ding K. Scattering of electromagnetic waves: Advanced Topic[M]. New York: John Wiley & Sons, INC. 2001.

[6] Floury N, Toso G. The sea surface at L-band microwaves: modeling and applications[J]. SPIE, 2002, 4544(1): 152- 159.

[7] Hollinger J P. Passive microwave measurements of sea surfaces [J]. IEEE Transaction on Geoscience Electric, 1971, 9(1): 165 - 169.

作者简介:

童创明 男,1964 年生于湖北,博士,东南大学毫米波国家重点实验室和国防科技大学电子科学与工程学院博士后出站,现为空军工程大学导弹学院雷达工程系微波教研室主任、教授,博士生导师.近年来,在国内外期刊和会议上发表与交流学术论文 70 余篇(其中 SCI、EI、ISTP、SA 收录 40 多篇).目前主要从事雷达系统、电磁场数值计算等领域科研与教学工作.

E-mail: chmtong@126.com

黄泽贵 男,1976 年生于四川,于 2006 年毕业于空军工程大学导弹学院电磁场与微波技术专业,获得工学博士学位,现为空军驻西南电子设备研究所工程师.近年来,在国内外期刊和会议上发表与交流学术论文 30 余篇(其中 EI 等收录 10 多篇),获军队科技成果进步奖三项.目前主要从事电磁场数值计算、雷达系统、电子对抗等领域的科研和质量管理等工作.

E-mail: zghuang203@163.com

胡国平 男,1964 年生于江西,教授,硕士生导师,主要从事雷达系统、雷达信号处理等研究.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net