

通信技术

一维带限 Weierstrass 分形海面 电磁散射的矩量法研究

田 炜¹ 郝伟杰²

(延安大学物理与电子信息学院¹,延安 716000;中国电信延安分公司²,延安 716000)

摘要 采用一维带限 Weierstrass 分形函数来模拟实际的分形海面,依据海水的介电特性,运用矩量法研究了锥形波入射一维带限 Weierstrass 分形海面的电磁散射特性。通过数值计算得到了散射系数随散射角的变化曲线,讨论了风速、分维、海水盐含量、入射波频率对散射系数的影响,得到了一维带限 Weierstrass 分形海面散射系数的基本特征、分形特征和随频率变化特征。结果表明,风速、分维和入射波频率对散射系数有显著影响,而海水盐含量对散射系数的影响较小。

关键词 电磁散射 一维带限 Weierstrass 分形海面 共轭梯度法 矩量法 散射系数

中图法分类号 TN011.4; **文献标志码** A

近几十年来,粗糙面散射一直是一个十分活跃、有着大量实际应用、且为许多学科领域共同研究的热门课题^[1-5]。如海面通信会受到海面粗糙度的影响,在无线海洋学中,通过雷达接收到海杂波来探测海浪特性;红外、可见光遥感中,利用目标表面光波的散射获得数据以识别目标形态和特征;再如对人体组织的超声波散射,粗糙金属表面的光学散射等方面均属于粗糙面散射问题。在近年来,研究粗糙面电磁散射的方法不断得到丰富和发展,目前基于各种积分/微分方程的电磁场数值方法有限元法^[6]、时域有限差分法^[7]和矩量法^[3,8]等方法。

在以往的粗糙面散射研究中,大多采用近似解析法,但近似解析法如基尔霍夫近似法^[9](KA)和微扰法^[10](SPM)等都有小斜率近似的限制,它们的求解不够准确,而且近似解析方法仅能够解决微粗糙度粗糙面的电磁散射问题,矩量法能够避开近似解析方法的上述局限性,在近似方法失效时得到一

些重要的散射效应。另外,过去粗糙海面的数学模型也常采用周期函数或随机函数描述,但是实际的粗糙海面一般既不是纯随机的也不是完全周期的。分形粗糙面存在着自相似性,同时具有在大范围内有序和小范围内无序的特点^[11,12],能更好地反映自然界中粗糙面的物理特性。本文采用一维带限 Weierstrass 分形函数来模拟实际的分形海面,依据海水的介电特性,运用矩量法研究了锥形波^[3,13]入射时,一维带限 Weierstrass 分形海面的电磁散射特性,数值计算得到了散射系数随散射角的变化曲线,讨论了海面风速、分维、海水盐含量、入射波频率对散射系数的影响。

1 一维带限 Weierstrass 分形粗糙海面模型

采用一维带限 Weierstrass 函数来模拟实际的分形粗糙海面,该函数从 Weierstrass-Mandelborot 函数衍生而来,具有一定的内、外尺度,保证了在一定区间内保持分形的主要特征,该函数表示为^[14]

$$Z(x) = \delta \sqrt{\frac{2[1 - b^{(2D-4)}]}{1 - b^{2N(D-2)}}} \sum_{n=0}^{N-1} b^{(b-2)n} \sin(Kb^n x + \varphi_n) \quad (1)$$

式(1)中, D 为分维数 ($1 < D < 2$), $b (> 1)$ 为空

2011 年 3 月 14 日收到,6 月 9 日修改 西陕西省科技厅和教育厅项目

(2010JQ6009,2010JK917,2011JK0828)资助

第一作者简介:田 炜(1978—),男,陕西绥德人,延安大学讲师,硕士。

间基频, K 为海表面的空间波数, φ_n 为 $(0, 2\pi)$ 上均匀分布的随机相位, δ 为粗糙海面高度起伏均方根。当空间基频 b 取有理数时, $Z(x)$ 表现为周期函数, 当空间基频 b 取无理数时, $Z(x)$ 表现为准周期函数, 最高谐波数 N 可以由入射波的频率来确定, 即 $Kb^{N-1} = k \left(= \frac{2\pi}{\lambda}$ 入射波波数 $\right)$ 。海面高度起伏均方根 δ 和空间波数 K 以及风速 u 满足下面的关系^[15]

$$\delta = \frac{0.021 \cdot 2u^2}{4} \quad (3)$$

$$K = \frac{0.877^2 g}{u^2} \quad (4)$$

式(4)中, $g = 9.8 \text{ m/s}$ 为重力加速度, u 为海面 19.5 m 高处的风速。

2 理论计算公式

图 1 为粗糙面电磁散射问题的几何示意图。粗糙土壤表面轮廓记为 S_r , θ_i 和 θ_s 分别为入射角和散射角。考虑电磁波 $\psi_i(\vec{r})$ ($\vec{r} = \hat{x}\vec{x} + \hat{z}\vec{z}$) 入射到一维粗糙面上, $\psi_0(\vec{r})$ 表示粗糙面 S_r 上表面任意点的磁场, $\psi_1(\vec{r})$ 表示粗糙面 S_r 下表面磁场, 它们满足下面积分方程^[3]

$$\frac{1}{2}\psi_0(\vec{r}) = \psi_i(\vec{r}) + \int_{S_r} [\psi_0(\vec{r}') \cdot \nabla G_0(\vec{r}, \vec{r}') - G_0(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \nabla \psi_0(\vec{r}')] ds' \quad \vec{r} \in S_r \quad (5a)$$

$$\frac{1}{2}\psi_1(\vec{r}) = - \int_{S_r} [\psi_1(\vec{r}') \frac{\partial G_1(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial n'} - G_1(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial \psi_1(\vec{r}')}{\partial n'}] ds' \quad \vec{r} \in S_r \quad (5b)$$

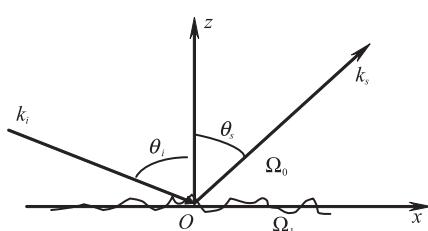


图 1 粗糙面电磁散射问题的几何示意图

这里, $G_0(\vec{r}, \vec{r}')$ 和 $G_1(\vec{r}, \vec{r}')$ 分别为上半空间 Ω_0 和下半空间 Ω_1 中的格林函数, 对于粗糙面 S_r 上的任意点 \vec{r} , $\psi_0(\vec{r})$ 和 $\psi_1(\vec{r})$ 满足边界条件

$$\psi_0(\vec{r}) = \psi_1(\vec{r}); \quad \vec{r} \in S_r \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \psi_0(\vec{r})}{\partial n} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi_1(\vec{r})}{\partial n}; \quad \vec{r} \in S_r \quad (6b)$$

式(6b)中, $\rho = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}$ 。

将式(6)代入式(5), 并沿 x 轴离散粗糙表面轮廓 S_r 为 N 断, 采用脉冲基函数, 以点匹配做检验, 将积分方程(5)离散化为如下方程

$$\sum_{n=1}^N A_{mn} U_1(x_n) + \sum_{n=1}^N B_{mn} U_2(x_n) = \psi_i(x_m) \quad (7a)$$

$$\sum_{n=1}^N C_{mn} \rho U_1(x_n) + \sum_{n=1}^N E_{mn} U_2(x_n) = 0 \quad (7b)$$

矩阵方程中, $U_1(x) = \sqrt{1+f'(x)}(\hat{n} \cdot \nabla \psi_0(\vec{r})) \vec{r} \in S_r$, $U_2(x) = \psi_1(\vec{r}) \vec{r} \in S_r$, $f(x)$ 为粗糙海面高度起伏函数, 其中 A_{mn} , B_{mn} , C_{mn} 和 E_{mn} 为方程离散系数。

为了尽量减少数值计算中粗糙面的人为截断所引起的边缘效应, 采用 THorsos 锥形波^[3]代替一般的平面波入射, 锥形波的射束宽度参数取 $g = \frac{L}{4}$ 。利用共轭梯度法解矩阵方程(7)就可以得到 $U_1(x)$, $U_2(x)$, 采用锥形波入射后, 粗糙面的散射截面为

$$\sigma_{pq}^0(\theta_s) = \frac{|\varphi_s^N(\theta_s)|^2}{8\pi k_0 g \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cos \theta_i \left[1 - \frac{1 + 2\tan^2 \theta_i}{2(k_0 g \cos \theta_i)^2} \right]} \quad (8)$$

式(8)中

$$\varphi_s^N(\theta_s, \theta_i) = \int_{S_r} \{ -U_1(x) + U_2(x) k_0 [f'(x) \sin \theta_s - \cos \theta_s] \} \exp(-ik_s \cdot \vec{r}) dx \quad (9)$$

此时, 散射系数定义为

$$\sigma = 10 \lg \sigma_{pq}^0 \quad (10)$$

3 数值计算结果和讨论

采用一维带限 Weierstrass 分形粗糙面来模拟

实际的粗糙海面,如图 1 所示。在下面计算过程中若不特殊说明,锥形入射波参数取 $\theta_i = 30^\circ, g = \frac{L}{4}$,

$f = 1.2 \text{ GHz}$ 。粗糙面参数取 $L = 160\lambda, b = \frac{e}{2}$, 将粗糙面长度划分为 1600 个网格,采用 100 个粗糙面样本统计。选取海水温度 $T = 25^\circ \text{ C}$,不同海水盐含量 S 对应的等效介电常数 $\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon''i$ 。根据文献[16] 计算得到。本文只考虑锥形 TM 入射波的情形下,一维带限 Weierstrass 分形海面的的电磁散射问题。

3.1 风速对散射系数的影响

取 $D = 1.1, S = 20\%, f = 1.2 \text{ GHz}$, 分别取风速 $u = 2.0 \text{ m/s}, u = 4.0 \text{ m/s}, u = 8.0 \text{ m/s}$, 研究风速 u 对散射系数 σ 的影响, 数值计算结果如图 2 所示。从图 2 看出, 散射系数 σ 随散射角 θ_s 变化曲线是振荡的, 但还是有固定的规律可循, 总体来说, 散射系数 σ 在大部分散射角 θ_s 区域内随风速 u 的增大而增大, 在镜向散射方向, 散射系数 σ 随风速 u 的增大而减小。这主要是因为粗糙海面的粗糙度随着风速 u 的增大而增大, 导致非相干散射分量增大, 相干散射分量减小。

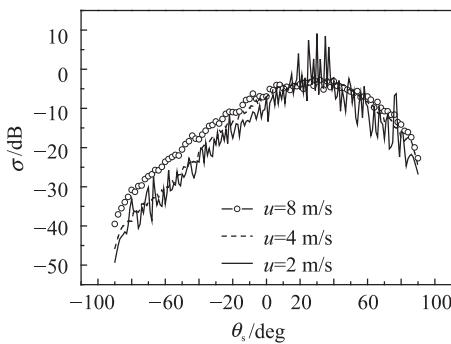


图 2 不同风速对应的散射系数角分布

3.2 分维对散射系数的影响

图 3 给出了 $u = 2 \text{ m/s}, S = 20\%, f = 1.2 \text{ GHz}$ 的情况下, 不同分维 $D = 1.1, D = 1.5, D = 1.9$ 对应的散射系数 σ 随散射角 θ_s 的变化曲线。不难看出, 镜向散射系数 σ 几乎不随分维 D 的变化而变化, 但非镜向方向散射系数 σ 随着分维 D 的增大而增大, 这一结果在 $-90^\circ < \theta_s < -20^\circ$ 范围内尤为明显, 这是由于分维 D 越大, 粗糙面粗糙程度越大, 导致非相

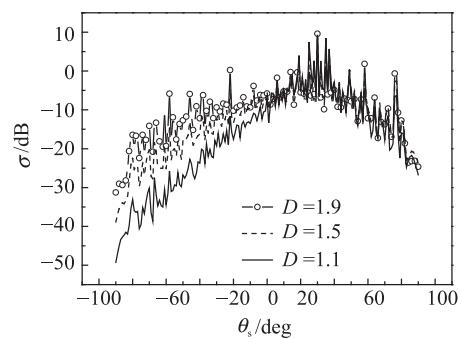


图 3 不同分维对应的散射系数角分布

干散射分量增大。

3.3 海水盐含量对散射系数的影响

取 $u = 2.0 \text{ m/s}, D = 1.1, f = 1.2 \text{ GHz}$, 海水盐含量分别取 $S = 10\%, S = 20\%, S = 30\%$, 在海水温度 $T = 25^\circ \text{ C}$ 的情形下, 依据文献[16] 计算可得不同海水盐含量对应的海水等效介电常数 $\varepsilon = 75.42 + 29.98i, \varepsilon = 73.43 + 52.51i, \varepsilon = 71.51 + 73.46i$, 研究海水盐含量 S 对散射系数 σ 的影响, 数值计算结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 不同海水盐含量 S 对应的散射系数 σ 随散射角 θ_s 的变化曲线几乎是重合的, 但在大散射角区域, 散射系数 σ 随海水盐含量 S 的增大而减小, 这一结论对海洋遥感等工程问题来说颇有意义。

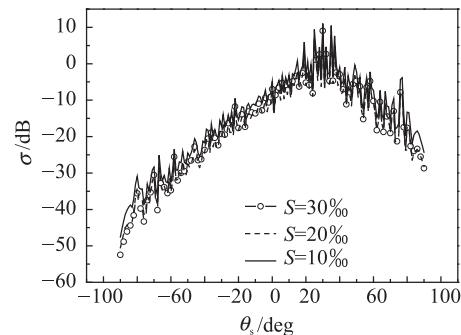
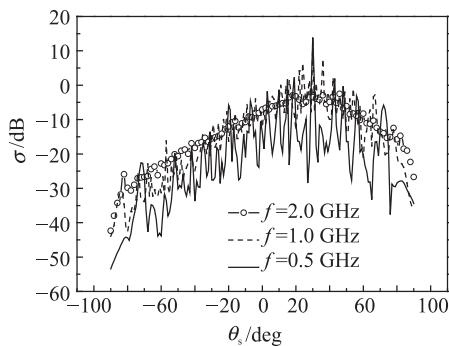


图 4 不同海水盐含量对应的散射系数角分布

3.3 入射波频率对散射系数的影响

图 5 给出了入射波频率 f 对一维 Weierstrass 分形海面散射系数 σ 的影响情况, 计算时各参数取值如下: $u = 2 \text{ m/s}, D = 1.3, S = 20\%, L = 40 \text{ m}$, 入射波频率分别取 $f = 0.5 \text{ GHz}, f = 1.0 \text{ GHz}, f = 2.0 \text{ GHz}$, 通过计算得到不同入射波频率 f 对应的海



5 不同入射波频率对应的散射系数角分布

水等效复介电常数 $\varepsilon = 71.80 + 167.94i$, $\varepsilon = 71.62 + 86.62i$, $\varepsilon = 70.97 + 48.46i$ 。从图 5 可以看出, 入射波频率 f 越小, 散射系数 σ 角分布曲线振荡的振幅越大。另外, 在镜向方向附近的一个小范围内, 散射系数 σ 随着入射波频率 f 的增大而减小, 这主要是由于在海面粗糙度参数固定的情形下, 入射波频率越大, 则粗糙面的相对粗糙度就越大, 导致散射曲线的镜向峰值减小。

4 结束语

本文采用一维带限 Weierstrass 分形函数来模拟实际的分形海面, 运用矩量法离散了一维带限 Weierstrass 分形海面电磁场积分方程, 并利用共轭梯度法求解了该矩阵方程, 数值计算了一维带限 Weierstrass 分形海面在锥形波入射情形下电磁散射的特性, 讨论了风速、分维、海水盐含量、入射波频率对散射系数的影响。得出了一维带限 Weierstrass 分形海面散射系数的基本特征、分维特征和随频率变化特征。毫无疑问, 这些结果在诸如环境遥感、探地雷达、无线电传播与通信、粗糙面重构等电磁散射问题中有着广泛的应用。当然本文仅限于对一维带限 Weierstrass 分形海面电磁散射进行了研究, 对于其它类型的一维粗糙面、以及更为复杂的二维粗糙面的电磁散射问题有待于今后作进一步研究, 有关理论和计算结果还有待于实验验证。

参 考 文 献

- Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing. London: Addison-Wesley Publishing, 1982
- Menedez J, Pinczuk A. Light scattering determinations of band offsets in semiconductor heterostructures. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988;24(8):1698—1710
- Tsang L, Kong J A, Ding K H. Scattering of electromagnetic waves. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001
- Thorsos E I. The validity of the perturbation approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum. Acoust Soc Am, 1989;86(1):261—277
- Elfouhaily T M, Johnson J T. A new model for rough surface scattering. IEEE Trans on GRS, 2007;45(7):2300—2308
- 刘鹏. 三维粗糙面电磁双站散射的直接型区域分解计算. 计算物理, 2010;27(1):73—81
- 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002
- Ku Hwarching, Awadallah R S, McDonald R L. Fast and accurate algorithm for electromagnetic scattering from 1-D dielectric ocean surface. IEEE Transaction On Antennas And Propagation, 2006; 54(8):2381—2391
- Ishimaru A, Chen J S. Scattering from very rough metallic and dielectric surface: a theory based on the modified Kirchhoff approximation. Waves in Random Media, 1991;1(1):21—34
- Yang Junhua, Guo Lixin, Wan Jianwei. Study of electromagnetic scattering from fractal sea surface based on non-fully developed sea spectrum. Acta Phys Sinica, 2007;56(4): 2106—2114
- Franceschetti G, Iodice A, Riccio D, et al. Fractal surface and electromagnetic extended boundary conditions. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2002;40(5):1018—1030
- Peitgen H O. The science of fractal images. New York: World Publishing Corp., 1990.
- Thorsos E. The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum. J Acous Soc Am, 1988;83(1):78—92
- 任新成, 郭立新. 一维带限 Weierstrass 分形分层介质粗糙面电磁散射研究. 西安电子科技大学学报, 2009;36(2):322—330
- 王运华, 郭立新, 吴振森. 改进的一维分形模型在海面电磁散射中的应用. 电子学报, 2007;35(3):478—483
- 张德海, 张俊荣, 王丽巍. 海洋微波遥感中的介电常数. 遥感技术与应用, 1994;9(3):43—52

Improved Model of Avionics Network Simulation and Analysis

WANG Hui-wen, ZHANG Yan-yuan, LIN Yi, JIA Xin

(College of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, P. R. China)

[Abstract] The application of fiber channel was studied, a Fiber Channel-based Avionics Network was established by OPNET, according to protocol standards the finite state machine models of terminal nodes and switching node were established. The switch structure was CICQ, using DRR algorithm in input and output ports. Then the network was simulated by OPNET, end to end delay and network throughout were studied. The results show that using the DRR scheduling algorithm can reduce end to end packet delay, meet real time request, increase network throughout, so this model is suitable for avionics network.

[Key words] avionics network DRR OPNET delay normalized throughput

(上接第 6322 页)

Study on Electromagnetic Scattering from 1D Band-limited Weierstrass Fractal Rough Sea Surface Using the Method of Moments

TIAN Wei¹, HAO Wei-jie²

(School of Physics and Electronic Information, Yanan University¹, Yan'an 716000, P. R. China;
Yan'an Branch Company of China Telecom², Yan'an 716000, P. R. China)

[Abstract] A 1D band-limited weierstrass fractal function is used to simulate the practical fractal sea surface. Based on the brine dielectric properties, the electromagnetic scattering from 1D band-limited weierstrass fractal rough sea surface with the tapered wave incidence is studied using the method of moment. The curves of electromagnetic scattering coefficient with scattering angle are obtained by numerical calculation. The effects of the wind speed, the fractal dimension, the salt content of sea and the frequency of the incident wave on the scattering coefficient are discussed. The basic characteristics, the fractal characteristics and the characteristics with varying of frequency of scattering coefficient from 1D band-limited Weierstrass fractal rough sea surface are also obtained. The results show that the effect of the wind speed, the fractal dimension and the frequency of the incident wave on the scattering coefficient of the rough surface is obvious while the influence of the salt content in sea is smaller.

[Key words] electromagnetic Scattering 1D band-limited weierstrass fractal rough sea surface Monte Carlo method conjugate gradient method method of moment scattering coefficient