

# Alpha-stable 分布粗糙土壤表面电磁散射研究\*

晁雪 任新成 田伟

(延安大学物理与电子信息学院 延安 716000)

**摘要:** 采用空间域合成法生成高度起伏遵守 Alpha-stable 分布的粗糙土壤表面,运用矩量法研究了锥形入射波入射时粗糙土壤表面的电磁散射特性。数值计算了散射系数随散射角的变化关系,分析了稳定性系数、归一化尺度参数、互相关长度、入射波频率、土壤湿度对散射系数的影响。结果表明,稳定性系数、归一化尺度参数、互相关长度、入射波频率、土壤湿度对散射系数均有较大的影响,遵守不同的规律。

**关键词:** 电磁散射; 散射系数; 土壤表面; 空间域合成法; Alpha-stable 分布

**中图分类号:** TN011    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** O441.4

## Study on electromagnetic scattering from rough soil surface with Alpha-stable distribution

Chao Xue Ren Xincheng Tian Wei

(School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

**Abstract:** The spatial domain building method is used to generate rough soil surface with Alpha-stable distributions, the characteristic of electromagnetic scattering from rough soil surface in the condition that the tapered wave incidence by using method of moment. The varying relationship of scattering coefficient with scattering angle is numerical calculated, the influence of the stability coefficient, normalized scale parameter, cross-correlation length, the incident wave frequency, and moisture of soil on the scattering coefficient is analyzed. The results show that the influence of the stability coefficient, normalized scale parameter, cross-correlation length, the incident wave frequency, and moisture of soil on the scattering coefficient is obvious, and the different laws are obeyed.

**Keywords:** electromagnetic scattering; scattering coefficient; rough soil surface; method of moment spatial domain building method; Alpha-stable distribution

### 1 引言

随机粗糙面电磁散射特性研究在军用、民用方面均具有显著的学术价值和广阔的应用前景,如在微波遥感、地面通信及雷达探测等领域有着及其重要的应用价值<sup>[1-3]</sup>。例如,在现代战争中,隐身技术已经成为战场上必不可少的一部分,隐身技术最主要的就是雷达隐身技术,而雷达隐身技术的核心就是降低入射到雷达上的电磁波的雷达散射截面。因此通过对随机粗糙面电磁散射特性的研究,得到影响雷达散射截面的因素,可在飞机隐身技术、无人机、电子对抗等方面避免地、海粗糙面产生杂波的影响提供理论依据。

在过去的粗糙地物表面电磁散射研究中,主要利用蒙

特卡罗方法<sup>[4]</sup>对地物表面进行建模。然而,这种建模方法局限于具有特定功率谱密度分布的地物表面,比如高斯分布表面<sup>[5]</sup>和指数分布表面<sup>[6]</sup>。事实上,自然界中绝大多数介质表面高度起伏分布是非高斯分布的,例如 Alpha-stable 分布粗糙表面,但鲜有学者对非高斯分布随机粗糙表面的散射特性进行研究<sup>[7-9]</sup>。

本文采用空间域合成法<sup>[10]</sup>生成 Alpha-stable 分布粗糙面,运用矩量法<sup>[11]</sup>研究了锥形波入射条件下,一维 Alpha-stable 粗糙土壤表面的电磁散射特性,分析了稳定性系数、入射波频率、归一化尺度参数、互相关长度、土壤湿度对散射系数的影响。得到了 Alpha-stable 分布粗糙土壤表面的电磁散射特性。

收稿日期:2017-02

\* 基金项目:国家杰出青年科学基金(61225002)、国家自然科学基金(61379026)、陕西省科学技术研究发展计划(工业攻关)(2014K05-61)、陕西省高水平大学建设专项资金(2015SXTS02)、复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室开放基金(EMW201502)、陕西省教育厅专项科研计划(15JK1829)、延安市科学技术研究发展计划(2014ZC-4)资助项目

## 2 Alpha-stable 分布粗糙表面模型

设一维粗糙面总长度为  $L$ , 将其平均分为  $N$  段, 则每段长度为  $\Delta x = L/N$ , 则粗糙表面的轮廓表达式为:

$$f(kL/N) = \sum_{j=-N/2+1}^{N/2} F((k-j)L/N)M_j \quad (1)$$

式中:  $F((k-j)L/N)$  为滤波函数, 其具体形式表示为:

$$F((k-j)L/N) = \sigma_n l^{-l/\alpha} \left( \frac{\alpha^2}{\pi(\alpha-1)} \right)^{1/2\alpha} \exp\left(-\frac{\alpha((k-j)L/N)^2}{l^2(\alpha-1)}\right) \quad k = -N/2+1, \dots, N/2 \quad (2)$$

$$M_j = \frac{\gamma \sin(\alpha u_j)}{(\cos u_j)^{1/\alpha}} \left( \frac{\cos((1-\alpha)u_j)}{e_j} \right)^{(1-\alpha)/\alpha} \quad (3)$$

是 Alpha-stable 随机变量,  $u_j$  是在区间  $[-\pi/2, \pi/2]$  上均匀分布的随机变量,  $e_j$  是均值为 1 的指数分布的随机变量。

## 3 粗糙面基本理论

图 1 所示为粗糙面电磁散射的几何示意图。一维 Alpha-stable 随机粗糙表面采用空间域合成方法生成。图 1 中,  $s_r$  表示粗糙土壤表面轮廓, 土壤表面将空间分为上、下两部分,  $V_0$  表示上方空间、是空气,  $V_1$  表示下方空间、是土壤, 电磁波入射角和散射角分别为  $\theta_i$  和  $\theta_s$ , 入射波的波矢为  $\hat{k}_i$ , 散射波的波矢为  $\hat{k}_s$ 。

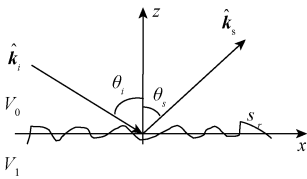


图 1 一维粗糙面电磁散射几何示意图

设  $\psi_i(\hat{r})$  为入射波,  $\psi_0(\hat{r})$  和  $\psi_1(\hat{r})$  分别区域  $V_0$  和  $V_1$  的总场, 它们满足下列边界积分方程:

$$\frac{1}{2}\psi_0(\hat{r}) = \psi_i(\hat{r}) + \int_{s_r} [\psi_0(\hat{r}')n \cdot \nabla G_0(\hat{r}, \hat{r}') - G_0(\hat{r}, \hat{r}')n \cdot \nabla \psi_0(\hat{r}')] ds' \quad \hat{r} \in s_r \quad (4)$$

$$\frac{1}{2}\psi_s(\hat{r}) = - \int_{s_r} [\psi_1(\hat{r}')n \cdot \nabla G_1(\hat{r}, \hat{r}') - G_1(\hat{r}, \hat{r}')n \cdot \nabla \psi_1(\hat{r}')] ds' \quad \hat{r} \in s_r \quad (5)$$

式中:  $G_0(\hat{r}, \hat{r}')$ 、 $G_1(\hat{r}, \hat{r}')$  分别为  $V_0$  和  $V_1$  空间中的格林函数, 定义式如下:

$$\begin{cases} G_0(\hat{r}, \hat{r}') = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_0 |\hat{r} - \hat{r}'|) \\ G_1(\hat{r}, \hat{r}') = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1 |\hat{r} - \hat{r}'|) \end{cases} \quad (6)$$

$\psi_0(\hat{r})$  和  $\psi_1(\hat{r})$  满足边界条件:

$$\begin{cases} \psi_0(\hat{r}) = \psi_1(\hat{r}), & \hat{r} \in s_r \\ \frac{\partial \psi_0(\hat{r})}{\partial n} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi_1(\hat{r})}{\partial n}, & \hat{r} \in s_r \end{cases} \quad (7)$$

其中, 若 TE 波入射, 取  $\rho = 1$ , 若 TM 波入射, 取  $\rho =$

$\epsilon_1/\epsilon_0$ 。

将式(4)代入式(7), 并利用矩量法离散方程, 可得出下列矩阵表达式:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ \rho C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $U_1 = \sqrt{1+f'(x)}(n \cdot \nabla \psi_0(\hat{r}'))$ ,  $\hat{r}' \in s_r$ ;  $U_2(x) = \psi_0(\hat{r}')$ ,  $\hat{r}' \in s_r$ 。

采用锥形入射波代替一般平面波, 取锥形波的射束宽度参数  $g = L/4$ 。粗糙面的散射截面为:

$$\sigma(\theta_s) = \frac{|\phi_s^N(\theta_s)|^2}{8\pi k_0 g \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cos\theta_i \left[ 1 - \frac{1+2\tan^2\theta_i}{2(k_0 g \cos\theta_i)^2} \right]} \quad (9)$$

式中:

$$\begin{aligned} \phi_s^N(\theta_s) = & - \int_{-\infty}^{\infty} dx \{ -U(x) + \psi(x) ik \times \\ & \left[ \frac{d}{dx} \sin\theta_s - \cos\theta_s \right] \} \cdot e^{-ik(\sin\theta_s x + f(x) \cos\theta_s)} \end{aligned} \quad (10)$$

## 4 数值计算结果与讨论

在本文数值计算中, 若无特殊说明, 则取归一化尺度参数  $\sigma_n = 0.3\lambda$ 、互相关长度  $l = 4\lambda$ 、土壤湿度  $m_v = 0.1 \text{ g/cm}^3$ 、入射波频率  $f = 0.3 \text{ GHz}$ 、稳定性系数  $\alpha = 1.5$ 。

### 4.1 稳定性系数对散射系数的影响

图 2 所示为稳定性系数  $\alpha$  对散射系数的影响。其中稳定性系数分别取为  $\alpha = 1.3$ 、 $\alpha = 1.5$ 、 $\alpha = 1.75$ , 从图 2 可以看出, 当  $\theta_s < -20^\circ$  时, 散射系数  $\sigma$  均随  $\alpha$  的增大而显著减小; 当  $20^\circ < \theta_s < 70^\circ$  时, 散射系数  $\sigma$  随  $\alpha$  的增大而增大, 变化不甚明显, 而当  $\theta_s > 70^\circ$  时, 散射系数  $\sigma$  随  $\alpha$  的增大而减小, 但变化非常小, 这是由于稳定性系数  $\alpha$  使得概率密度函数在其尾部(远离平均值的位置)衰减得非常慢导致的, 此外, 当  $\theta_s < 20^\circ$  时, 散射系数随散射角的增大而增大, 而当  $\theta_s > 20^\circ$  时, 散射系数随散射角的增大而减小。

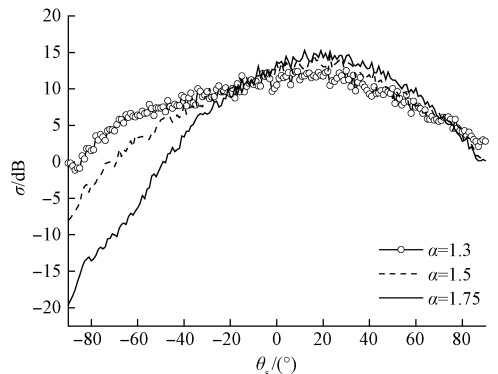


图 2 稳定性系数对散射系数的影响

### 4.2 归一化尺度参数对散射系数的影响

图 3 所示为归一化尺度参数对散射系数的影响, 其中归一化尺度参数分别取  $\sigma_n = 0.3\lambda$ 、 $\sigma_n = 0.5\lambda$ 、 $\sigma_n = 0.8\lambda$ 。

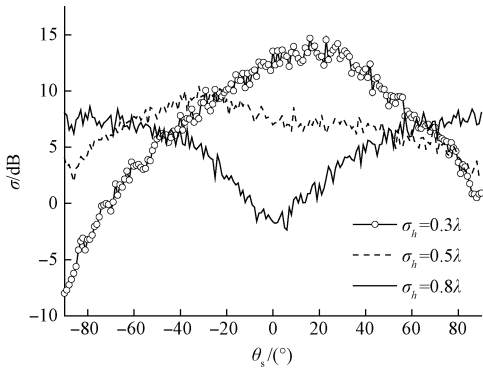


图 3 归一化尺度参数对散射系数的影响

不难看出,归一化尺度参数对散射系数的影响是比较复杂的。对于  $\sigma_h = 0.3\lambda$  和  $\sigma_h = 0.5\lambda$  来说,当  $\theta_s < -20^\circ$ , 散射系数随着归一化尺度参数的增大而增大;当  $\theta_s > -20^\circ$  时,散射系数随着归一化尺度参数的增大而减小,在  $70^\circ < \theta_s < 80^\circ$  时,散射系数几乎不随归一化尺度参数的变化而变化,在  $\theta_s > 80^\circ$  的一个很小的范围内,散射系数随着归一化尺度参数的增大而增大。当  $\sigma_h = 0.8\lambda$  时,散射系数随归一化尺度参数的变化而变化的关系比较复杂,不同于  $\sigma_h = 0.3\lambda$  和  $\sigma_h = 0.5\lambda$  的情况,曲线在散射角  $0^\circ$  左右近似对称,当  $\theta_s < 0^\circ$  时,散射系数随散射角的增大而减小,而当  $\theta_s > 0^\circ$ , 散射系数随散射角的增大而增大。这是因为归一化尺度参数逐渐增大到一定程度时,地面的粗糙程度增大,使得相干散射增强,镜向方向不再是散射系数幅值最大的方向。

#### 4.3 互相关长度对散射系数的影响

图 4 所示为互相关长度对散射系数的影响。其中互相关长度分别取  $l = 3.0\lambda$ 、 $l = 4.0\lambda$ 、 $l = 6.0\lambda$ 。由图 4 可知,当  $\theta_s < 0^\circ$  时,散射系数随相关长度的增大而减小,变化非常明显;而当  $0^\circ < \theta_s < 60^\circ$  时,散射系数随相关长度的增大而增大,变化不甚明显;当  $\theta_s > 60^\circ$  时,散射系数几乎不随相关长度的变化而变化,且稍有随相关长度的增大而减小。这是因为,当互相关长度增加到一定程度时,散射系数随  $l$  的变化很小,表现出非相干散射减少,相干散射增大,此外,当  $\theta_s < 20^\circ$  时,散射系数随散射角的增大而增大,而当  $\theta_s > 20^\circ$  时,散射系数随散射角的增大而减小。

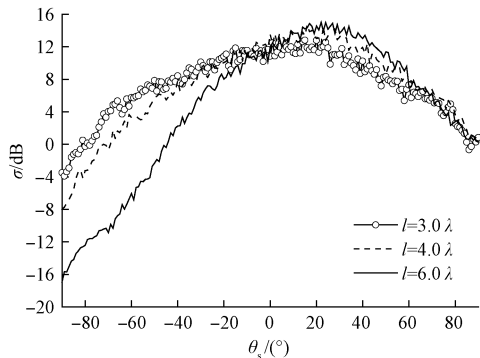


图 4 互相关长度对散射系数的影响

#### 4.4 入射波频率对散射系数的影响

图 5 所示为入射波频率对散射系数的影响。其中入射波频率分别取  $f = 0.3 \text{ GHz}$ 、 $f = 0.8 \text{ GHz}$ 、 $f = 12 \text{ GHz}$ , 容易看出,入射波频率对散射系数的影响比较简单,入射波频率越大,则散射系数越大,变化非常明显,此外,当  $\theta_s < 20^\circ$  时,散射系数随散射角的增大而增大,而当  $\theta_s > 20^\circ$  时,散射系数随散射角的增大而减小。

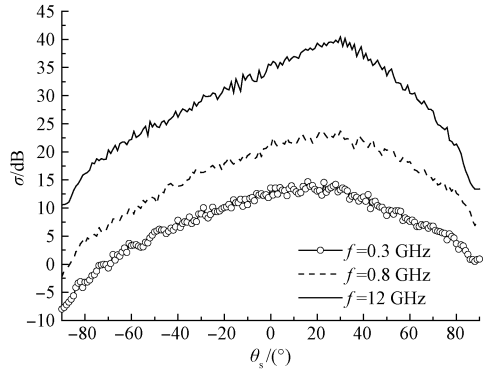


图 5 入射波频率对散射系数的影响

#### 4.5 土壤湿度对散射系数的影响

图 6 所示为土壤湿度对散射系数的影响。其中土壤介电常数根据四成分模型<sup>[12]</sup>进行计算,分别取  $\epsilon_1 = 4.95 + i0.09$  ( $m_v = 0.1 \text{ g/cm}^3$ )、 $\epsilon_2 = 4.94 + i0.16$  ( $m_v = 0.2 \text{ g/cm}^3$ )、 $\epsilon_3 = 18.22 + i0.31$  ( $m_v = 0.3 \text{ g/cm}^3$ )。从图中可以看出,土壤湿度对散射系数  $\sigma$  的影响较为简单,散射系数随着土壤湿度的增大而增大,变化较为明显。这主要是由于当土壤湿度增大,介电常数实部也在增大,导致散射系数随之增大,此外,当  $\theta_s < 20^\circ$  时,散射系数随散射角的增大而增大,而当  $\theta_s > 20^\circ$  时,散射系数随散射角的增大而减小。

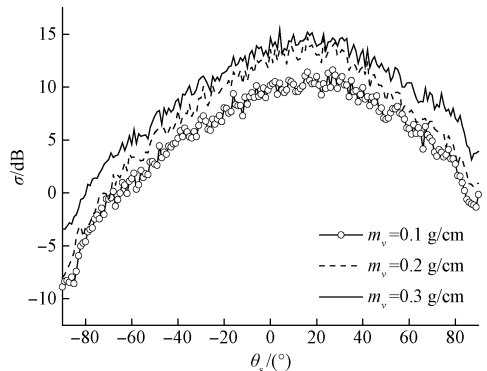


图 6 土壤湿度对散射系数的影响

## 5 结 论

本文采用空间域合成法模拟了一维 Alpha-stable 分布的粗糙土壤表面,计算得到了土壤表面的积分方程,运用矩量法研究了锥形波入射情况下粗糙土壤表面稳定性系数、归一化尺度参数、互相关长度、入射波频率和土壤湿度对散

射系数的影响,得到了 Alpha-stable 分布粗糙土壤表面的电磁散射特性。当然,文章仅研究了一维 Alpha-stable 分布粗糙土壤表面的电磁散射特性,对于遵守 Alpha-stable 分布的分层土壤表面、二维 Alpha-stable 分布的粗糙土壤表面的散射问题有待于进一步的研究,本文研究结果还有待于进一步实验验证。

## 参考文献

- [1] VORONOVICH A G, ZAVOROTNY V U. Full-polarization modeling of monostatic and bistatic radar scattering from a rough sea surface [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014, 62(3): 1362-1371.
- [2] 任新成,朱小敏,刘鹏. 大地土壤表面与浅埋多目标宽带复合电磁散射研究[J]. 物理学报, 2016, 65(20): 47-54.
- [3] 郭立新,王运华,吴振森. 二维导体微粗糙面与其上方金属平板的复合电磁散射研究[J]. 物理学报, 2005, 54(11): 5130-5138.
- [4] 凌明祥,李会敏,黎启胜,等. 含相关性的测量不确定度拟蒙特卡罗评定方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1385-1393.
- [5] 薛钰川,任新成. 高斯粗糙土壤面电磁散射的矩量法研究[J]. 河南科学, 2014, 32(10): 1966-1971.
- [6] 朱小敏,任新成,郭立新. 指数型粗糙地面与上方矩形截面柱宽带电磁散射的时域有限差分法研究[J]. 物理学报, 2014, 63(5): 054101.
- [7] 韦国晖. 非高斯海面后向电磁散射的小斜率近似方法[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(1): 167-171.
- [8] 武剑,任新成,朱小敏. 基于 FDTD 的粗糙地面宽带前向电磁散射研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10): 135-139.
- [9] 刘明骞,李兵兵,石亚云. Alpha 稳定分布噪声下数字调制识别新方法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2015, 42(6): 1-5.
- [10] 任玉超. 随机粗糙表面电磁散射与逆散射中的若干问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007.
- [11] GUAN B, ZHANG J F, ZHOU X Y. Electromagnetic scattering from object above a rough surface using the method of moments with half-space green's function[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(10): 3399-3405.
- [12] 朱小敏,任新成. 分形地面与半埋矩形截面目标复合电磁散射 FDTD 研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 23-27.

## 作者简介

**晁雪**, 2015 年于西安电子科技大学长安学院获得学士学位, 现为延安大学研究生, 主要研究电波传播与散射。

E-mail: 17868819013@163.com

**任新成**, 2008 年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为延安大学教授, 主要研究方向为复杂系统和随机介质中电磁(光)波传播和散射特性及其应用。

E-mail: xchren@yau.edu.cn

**田炜**, 2009 年于西安电子科技大学获得硕士学位, 现为延安大学副教授主要研究方向为复杂系统和随机介质中电磁(光)波传播和散射特性及其应用。

E-mail: ydfsyy@163.com