

利用多层快速多极子技术对随机粗糙表面 SAR 回波信号统计特性的研究

潘小敏^{①②③} 盛新庆^{①③}

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

^③(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

摘要: 该文主要目的是研究随机粗糙面 SAR 回波信号的统计特性。结合传统的 Monte Carlo 方法, 利用多层快速多极子算法严格高效地模拟了三维随机粗糙面的 SAR 回波信号。依据常用 SAR 系统, 将发射波的仰角固定在 45°, 并让方位角在 88°~92°之间变化, 得到若干组随机表面的回波。计算回波幅值和相位的均值, 得到一些值得关注的结论。

关键词: SAR 回波; 随机面; 多层快速多极子技术

中图分类号: O441.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)02-0489-03

Investigation on Statistic Properties of SAR Return Signals Using MLFMA

Pan Xiao-min^{①②③} Sheng Xin-qing^{①③}

^①(National Key Lab of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

^③(Dept. of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The principal objective of the present work is to investigate the statistic properties of SAR return signals. The Synthetic Aperture Radar (SAR) return signals from 3-dimensional Gauss random rough conducting surfaces is efficiently and accurately computed using Multi-Level Fast Multipole Algorithm (MLFMA) combined with traditional Monte Carlo method. According to the real situation of SAR, incidents' elevation angles are fixed at 45°, and relevant azimuth angles vary from 88° to 92°. Return signals are divided into several groups in terms of geometry coefficients. Then the statistic properties of these obtained signals are investigated by computing the means of return signals' amplitudes and phases. Several useful conclusions are acquired.

Key words: SAR return signals; Random surface; Multi-Level Fast Multipole Algorithm (MLFMA)

1 引言

近年来, 合成孔径雷达(SAR)的应用研究越来越受到人们的关注。相对于 SAR 发射信号的波长, 地面是一个随机的粗糙面。因此要充分有效地利用 SAR 回波数据, 尤其是在微波遥感应用方面, 必须全面了解电磁波和地面的相互作用过程。为此, 已发展了多种方法来研究随机粗糙面的散射问题, 其中包括理论分析法, 实验观测法和数值模拟法^[1-3]。

理论近似法的精度和应用范围受限于粗糙面的几何参数, 而实验观测则为时间和费用问题所制约。随着近年来计算电磁学的快速发展, 人们越来越重视利用数值模拟法来研究这一问题。已有不少文章利用数值模拟法研究了随机粗糙

面的散射, 然而针对随机粗糙面 SAR 回波信号特性的研究却报道很少。为此, 本文利用计算电磁学近年来发展出的多层快速多极子技术来分析研究随机粗糙面 SAR 回波信号的统计特性。

文中先用 Monte Carlo 方法生成几何参数为高斯分布的三维随机导体面^[4]。每个随机面的面积为 $100\lambda^2$ (λ 为入射波波长), 并按 RMS 高度和相关长度将随机面分为若干组。在这里我们考虑 4 组随机面, 其 RMS 高度和相关长度分别为: 0.2 和 1, 0.3 和 1, 0.2 和 3, 0.3 和 3(单位均为 λ)。接着采用高效精确的多层快速多极子技术^[5-7] 计算出随机面的回波信号。同时为了真实模拟 SAR 应用, 本文将发射波仰角固定在 45°, 并让方位角在 88° - 92° 度之间变化。然后对回波信号的相位和随机面的单站散射系数作统计分析, 得到其统计特性。

本文下面先在第 2 节简要介绍本文的数值模型, 包括

2005-06-06 收到, 2005-11-08 改回

国家自然科学基金(60371004)和国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(2005CB321702)资助课题

Monte Carlo 方法及随机面回波的计算;接着在第 3 节给出随机面 SAR 回波信号的统计数据;文章最后给出研究结论。

2 理论模型

文中采用 RMS 高度和相关长度来描述随机面的几何参数,并用文献[4]中的方法生成它们。首先,用标准函数生成服从高斯分布的二维独立随机数组 $\{R_{i,j}\}$,各维的均值为零,方差为 1。接着,将该数组同相关函数作相关(或者说以相关函数为滤波器进行滤波操作)。具体说来,令 $\{Z_{i,j}\}$ 为所要的随机面的高度函数,有

$$Z_{i,j} = \sum_{p=-M}^M \sum_{q=-M}^M W_{p,q} R_{i+p,j+q} \quad (1)$$

其中 $W_{p,q}$ 为滤波器的权函数,可以表示成

$$W_{p,q} = \left(\frac{4}{l_x l_y \pi} \right)^{1/2} \exp[-2(p/l_x)^2 - 2(q/l_y)^2] \quad (2)$$

其中 l_x 和 l_y 分别是 x 方向和 y 方向的相关长度。图 1 给出了用这种方法生成的典型三维随机粗糙面。

假设有一束平面电磁波照射到所生成的随机面上,则其表面电流服从下述方程:

$$L(\mathbf{J}) = \mathbf{E}^i \quad (3)$$

其中 \mathbf{J} 是等效电流, \mathbf{E}^i 是入射波, L 是微积分算符^[5]。采用矩量法(MOM)求解式(3),使用 RWG 基函数和 Galerkin 匹配方式,式(3)就可以写成下述的离散形式:

$$[\mathbf{A}]\{\mathbf{J}\} = \{\mathbf{b}\} \quad (4)$$

系数矩阵 $[\mathbf{A}]$ 是稠密阵,所以只有当随机面的电尺寸较小时才能快速求解式(4)。为此,我们采用 MLFMA 来加速 conjugate-gradient 求解器中的矩阵向量相乘操作。使用 MLFMA^[5]后,算法的时间和空间复杂度均为 $O(N \log N)$ 。

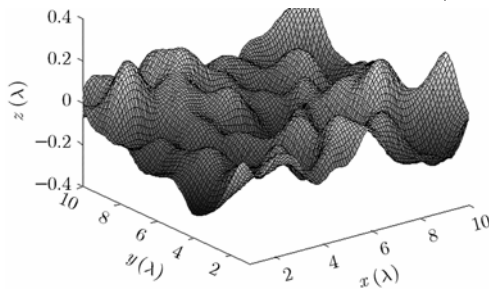


图 1 RMS 为 0.1λ, 相关长度为 1λ 的随机粗糙面

3 数值结果及分析

为保证精度,在求解 SAR 回波之前,对 MLFMA 代码的精度做了充分验证。实验表明计算直径为 12λ 的金属球在 1801 个方向的散射时,本文 MLFMA 代码计算误差小于 0.01dBsw。

我们知道,对于普通 SAR,其发射波仰角为固定值,而方位角则在 90° 附近变化。于是为了更真实模拟 SAR 回波信号,计算中选择入射波仰角为 45°,而方位角则在 88°-92° 范围内均匀变化,其变化步长为 0.02°。文中考虑 4 组随机面,

其 RMS 高度 σ 和相关长度 ($l_x = l_y = l$) 分别为: 0.2 和 1, 0.3 和 1, 0.2 和 3, 0.3 和 3(单位均为 λ)。每组包含几何参数相同的 9 个随机面,每个的面积为 $100\lambda^2$ 。用 ANSYS 剖分随机面,求解每个随机面所需未知数大约为 20,000。

首先考虑每组内 9 个面的 RCS 和回波相位的均值。图 2 给出了同向极化和交叉极化 RCS 随方位角的变化。与预计相同,几何参数为 0.3 和 1 的面,即 4 组中最粗糙的面,其 RCS 也最大。无论对于同向极化还是交叉极化,都是如此。图 3 显示了 SAR 回波信号相位随方位角的变化。从图中可以看到,无论对于同向极化还是交叉极化,SAR 回波相位都只是在较小的范围内变化,而通常我们假设它们在 0°-360° 内均匀分布。

接下来对不同方位角作平均,得到 RCS 的均值。因为它们能反映出 SAR 成像单元的主要性质。图 4 给出了每组内不同随机面 RCS 的均值。从图中同样可以发现,无论是哪种极化,表面越粗糙,其散射也越强,即 RCS 越大。进一步,还可以看到,随机面的几何参数变化时,交叉极化情

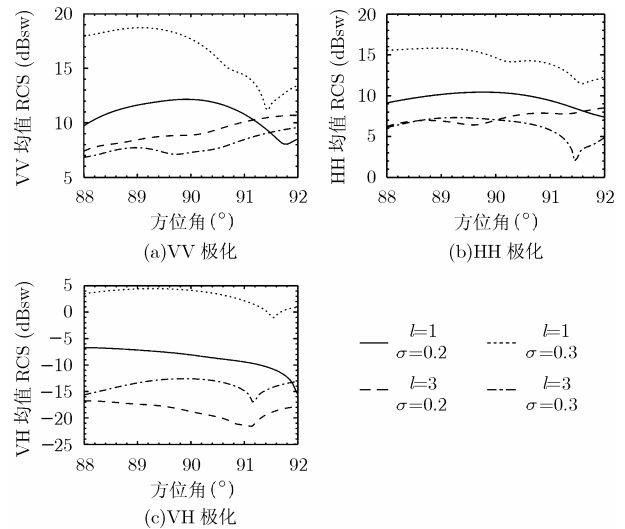


图 2 RCS 均值随方位角的变化

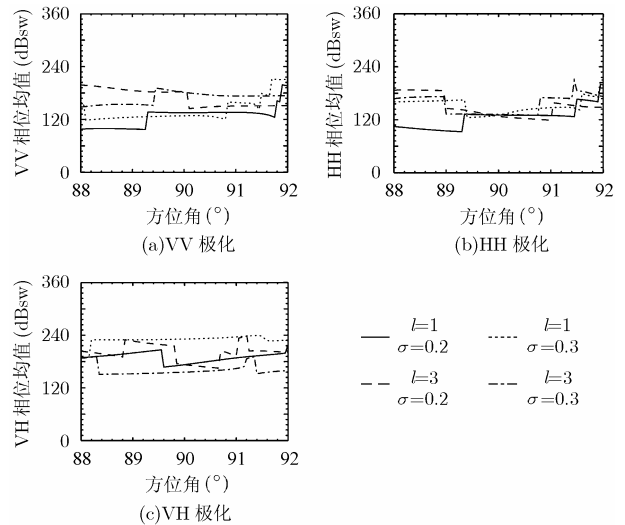


图 3 回波相位均值随方位角的变化

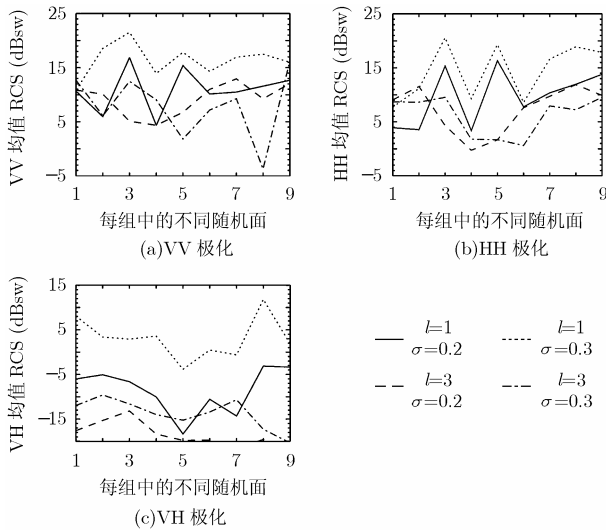


图4 RCS在不同方位角的均值

况下 RCS 的变化幅度大于同向极化时的情形。例如,对于交叉极化 RCS 的均值,第 1 组和第 2 组随机面两者之差约为 20.5dBsw;而对于同向极化 VV,其均值之差约为 7.2dBsw;同向极化 HH,其均值之差也约为 7.2dBsw。换言之,交叉极化的回波对随机面的几何参数更敏感。

4 结束语

采用多层快速多极子算法,本文严格高效地模拟了 SAR 回波信号。统计分析回波的幅度和相位,结果表明:(1)无论哪种极化方式,表面越粗糙,其 RCS 也越大,这与以往理论方法所得结论吻合;(2) SAR 回波的相位在一个较小幅度内变化,这一点与我们通常所认为的在 $0-360^\circ$ 内均匀分布不同;(3)与同向极化相比,交叉极化情况下 RCS 对随机面的几何参数更敏感。

参考文献

- [1] Ulaby F T, Moore R K, and Fung A K. Microwave Remote Sensing. Artech House, Dedham, MA, Vol.1, 1981, Chapter 1.
- [2] Fung A K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Application. Artech House, Norwood, 1994, Chapter 1.
- [3] Tsang L, Kong J A, and Ding K H. Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulations. John Wiley & Sons, New York, 2000, Chapter 6.
- [4] Garcia N and Stoll E. Monte Carlo calculation for electromagnetic-wave scattering from random rough surfaces. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, 52(20): 1798-1801.
- [5] Song J M and Chew W C. Multilevel fast-multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering. *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 1995, 10(1): 14-19.
- [6] Sheng X Q, Jin J M, Song J M, Lu C C, and Chew W C. Solution of combined-field integral equation using multilevel fast multipole algorithm for scattering by homogeneous bodies. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1998, 46(11): 1718-1726.
- [7] Song J and Chew W C. The fast Illinois solver code: requirements and scaling properties. *IEEE Computational Science and Engineering*, 1998, 5(3): 19-23.

潘小敏: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为计算电磁学和目标特性。

盛新庆: 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算电磁学、目标特性、微波传感与仿真技术、天线分析与设计等。