

粗糙面与上方目标复合的宽带电磁散射研究*

武 剑 任新成 朱小敏

(延安大学 物理与电子信息学院 延安 716000)

摘 要: 采用指数型分布粗糙面和 Monte Carlo 方法模拟实际的粗糙地面,运用时域有限差分法研究了超宽带高斯脉冲电磁波入射时粗糙地面与上方等边三角形截面柱的宽带后向电磁散射问题;通过数值计算得到了后向复合散射系数随频率的变化曲线,分析了不同的粗糙地面高度起伏均方根、相关长度,土壤湿度和三角形边长、倾角、高度及介电常数条件下后向散射系数随频率的变化关系,得到了指数型分布粗糙地面与上方目标的宽带后向电磁散射特性。

关键词: 宽带电磁散射;粗糙地面;后向散射系数;三角形截面柱;FDTD

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.4010

Study on wideband electromagnetic scattering of rough surface and target above it

Wu Jian Ren Xincheng Zhu Xiaomin

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

Abstract: The actual rough land surface is simulated with the exponential type distribution rough surface and Monte Carlo method, the wideband back electromagnetic scattering from rough land surface and column with equilateral triangle cross-section above it under UWB Gaussian pulse electromagnetic wave incidence is studied using FDTD. The curves of back electromagnetic scattering coefficient varied with frequency are obtained by numerical calculation. The back electromagnetic scattering coefficient varying with frequency is analyzed under the difference of the root-mean-square of rough land height fluctuation, correlation length and the moisture capacity of soil, the side length of triangle, tilt angle, height and dielectric parameter. The characteristics of the wideband back electromagnetic scattering from rough land surface with the exponential type distribution and column with equilateral triangle cross-section above it are obtained.

Keywords: the wideband electromagnetic scattering; rough land surface; the back scattering coefficient; column with triangle cross-section; FDTD

1 引 言

粗糙地面与目标的复合电磁散射特性研究一直是学者研究的热点问题之一,在雷达探测、微波遥感和目标制导与跟踪等方面具有重要的应用价值。在现代战争中,精密制导武器采用低空飞行,通过发射电磁波来识别并击中地面、海背景中的目标,但低空飞行随机干扰较大,电磁散射包含地面与目标间复杂的相互作用,从而导致制导困难,因此,对粗糙地面与上方目标的复合电磁散射进行研究能够为精确制导提供理论依据。

目前,大多数学者研究了粗糙面与立方体或圆柱的复合散射问题^[1-5],且入射波为时谐电磁波,对粗糙面与其他

类型目标复合模型宽带电磁散射问题的相关研究并不多见^[6-7]。实际上,粗糙面上方的目标不仅局限于圆柱和方柱,入射波也并非都是时谐波。近年来,随着宽带(超宽带)雷达以超宽带脉冲电磁波作为探测手段,在丛林透视、目标识别、目标探测等方面的广泛应用^[8],研究粗糙地面与上方目标复合模型宽带电磁散射特性对实际应用具有重要的指导意义。

数值算法克服了近似解析方法在粗糙面与目标复合散射问题研究上的不足,在计算机技术基础上得到迅猛发展。常见的有矩量法^[9]、有限元法^[10]、时域有限差分法(FDTD)^[2]、快速互耦迭代法^[11]等。FDTD作为一种时域数值算法,能节省计算机内存,缩短 CPU 占用时间,不仅能

收稿日期:2015-05

* 基金项目: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)、陕西省教育厅科研计划(14JK1830)项目

计算时谐波散射问题,而且在计算脉冲波散射问题时,与传统的频域算法相比又具有独特的优越性,受到国内外学者的青睐^[12-13]。

本文用 FDTD 瞬态场外推方法研究了高斯脉冲波入射时指数型分布粗糙地面与上方等边三角形截面柱复合模型的宽带电磁散射问题,得到后向复合散射系数随频率的变化曲线,计算了粗糙地面高度起伏均方根、相关长度,土壤湿度和三角形边长、倾角、高度及介电常数等因素对后向复合散射系数的影响。

2 复合散射模型

用 Monte Carlo 方法模拟生成一维指数型分布粗糙地面^[14],如图 1 所示, x 轴上方为自由空间,下方为各向同性均匀土壤,等边三角形截面柱 abc 位于粗糙面上方, h_i 为三角形重心到粗糙地面的高度,三角形的边 ab 与 x 轴正向的夹角为 φ 。

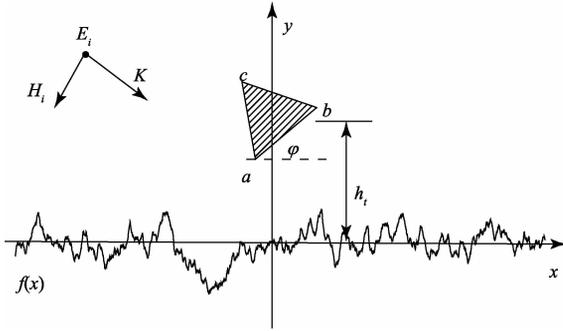


图 1 粗糙地面与目标复合散射几何示意图

计算粗糙地面与目标复合电磁散射的 FDTD 模型如图 2 所示,连接边界 AB 为平面,将 FDTD 计算区域划分为散射场区(上方)和总场区(下方),在连接边界设置等效电磁流引入入射波,并在散射场区设置外推边界 CD。在 FDTD 计算区域外设置厚度为 10 个网格的 UPML 吸收边界。

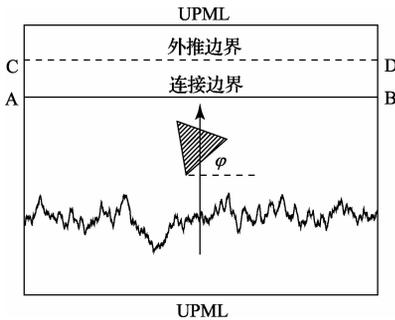


图 2 粗糙地面与目标复合散射 FDTD 计算模型

3 FDTD 方法

对于二维问题,电磁波分为 TE 波和 TM 波。以 TM 波为例,FDTD 差分公式为:

$$H_x^{n+1/2}(i, j + 1/2) = CP(m) H_x^{n-1/2}(i, j + 1/2) - CQ(m) \frac{E_z^n(i, j + 1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y} \quad (1)$$

$$H_y^{n+1/2}(i + 1/2, j) = CP(m) H_y^{n-1/2}(i + 1/2, j) + CQ(m) \frac{E_z^n(i + 1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x} \quad (2)$$

$$E_z^{n+1}(i, j) = CA(m) E_z^n(i, j) + CB(m) \cdot \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i + 1/2, j) - H_y^{n+1/2}(i - 1/2, j)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j + 1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j - 1/2)}{\Delta y} \right] \quad (3)$$

(1)、(2)、(3)式中 $CA(m)$ 、 $CB(m)$ 、 $CP(m)$ 、 $CQ(m)$ 及 m 的取值见文献[13]。 Δx 、 Δy 分别为 FDTD 区域 x 、 y 方向的离散网格宽度。

在连接边界设置等效电磁流,将入射波引入总场区,而散射场区只有散射波。本文选取高斯脉冲波为入射波,其表达式为

$$E_i(t) = \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (4)$$

式中: τ 为常数,决定高斯脉冲的宽度,通常选 $\tau = \frac{2}{f}$, $t_0 = 0.8\tau$ 。

通过 FDTD 的迭代运算,能计算出 FDTD 计算区域的电磁场,但要模拟计算远区的散射过程,则需在计算区域外设置吸收边界条件模拟开域电磁散射过程。本文选取 UPML 吸收边界,取 10 个网格厚度。由 $H \rightarrow P' \rightarrow P \rightarrow E$ 和 $E \rightarrow B \rightarrow H$ 的时域推进步骤,根据中心差分近似和均值近似可得到 UPML 二维 FDTD 差分迭代公式,其中 P 、 P' 、 B 为中间变量,详见文献[13]。

运用瞬态场外推方法得到脉冲源激励下远区散射场时间响应,再进行傅里叶变换代入入散射系数公式(5)获得散射系数的频率响应。

$$\sigma = 10 \lg(NRCS) \text{ dB} \quad (5)$$

式中:NRCS 表示归一化雷达散射截面,具体形式为:

$$NRCS = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{2\pi r}{L} \frac{|E_s|}{|E_i|}^2 \quad (6)$$

式中: r 、 E_s 、 E_i 分别表示观察点到原点的距离、远区散射场、入射波电场。

4 数值结果与讨论

在以下的数值计算中如无特殊说明,取入射波为 TM 极化的高斯脉冲平面电磁波,入射角 $\theta_i = 30^\circ$,网格宽度为 $dx = 0.5 \text{ cm}$,粗糙面抽样长度为 $L = 1600 \text{ cm}$,选取 40 个粗糙面进行统计计算。等边三角形目标(如图 1)边长 $ab = 20 \text{ cm}$,倾角 $\varphi = 0^\circ$,目标高度 $h_i = 20 \text{ cm}$ 。土壤介电常数利用 Wang and Schmugge 的四成分模型进行计算^[15],取 $\epsilon_r = 10.2802 - i1.6464$ (土壤湿度取 $m_v = 0.2 \text{ g/cm}^3$),土壤类型选择粉沙壤土。粗糙地面的高度起伏均方根 $\delta = 2 \text{ cm}$,相

关长度 $l=30$ cm。

4.1 粗糙地面高度起伏均方根对后向复合散射系数的影响

图 3 为后向复合散射系数 σ 随粗糙地面高度起伏均方根 δ 的变化关系图。其中均方根分别取 2 cm、4 cm、6 cm。从图 3 可看出,在计算的整个频率范围内, σ 随频率 f 振荡地变化,且振荡幅度随 f 的增大而减小。当 $f < 0.44$ GHz 时, σ 基本不随 δ 的变化而变化,但是 $f > 0.44$ GHz 时,对于同一频率点, δ 越大, σ 也相应越大,并且差异较为明显。这是因为 δ 增大导致地面粗糙度变大,地面散射增强,所以后向复合散射系数增大。

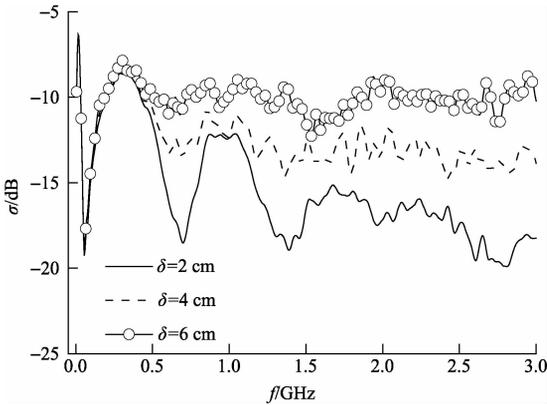


图 3 高度起伏均方根对后向复合散射系数的影响

4.2 粗糙地面相关长度对后向复合散射系数的影响

图 4 为后向复合散射系数 σ 随粗糙地面相关长度 l 的变化关系图。其中相关长度分别取 $l=10$ cm、 $l=30$ cm、 $l=50$ cm。从图 4 可看出, σ 随频率 f 振荡地变化,当 $f < 0.6$ GHz 时, σ 基本不随 l 的变化而变化;当 $f > 0.6$ GHz 时, σ 随 l 的变化较为复杂,但是在大部分频率点, σ 随 l 的增大而减小。

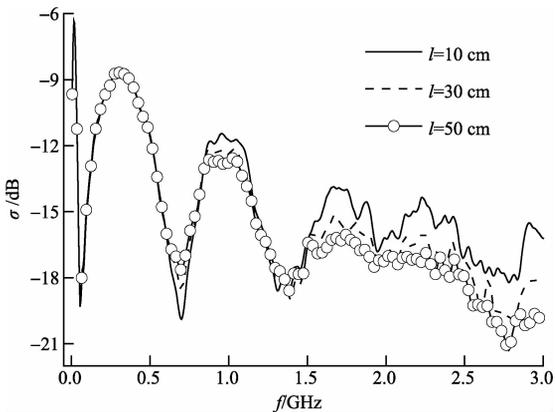


图 4 相关长度对后向复合散射系数的影响

4.3 土壤湿度对后向复合散射系数的影响

图 5 为后向复合散射系数 σ 随土壤湿度 m_v 的变化关

系图。其中土壤介电常数分别取 $\epsilon_{r1} = 4.9301 - i0.4510$ ($m_{v1} = 0.1\text{g/cm}^3$), $\epsilon_{r2} = 10.2802 - i1.6464$ ($m_{v2} = 0.2\text{g/cm}^3$), $\epsilon_{r3} = 26.0279 - i5.2063$ ($m_{v3} = 0.4\text{g/cm}^3$)。从图 5 可看出, σ 随频率 f 振荡地变化,当 $f < 0.13$ GHz 时, m_v 对 σ 的影响并不大,但是当 $f > 0.13$ GHz 时,对同一个频率值, σ 随 m_v 的增大而增大,变化较为明显。土壤湿度的变化使得等效介电常数实部差异很大,土壤湿度越大,粗糙地表面散射越强,所以后向复合散射系数增大。

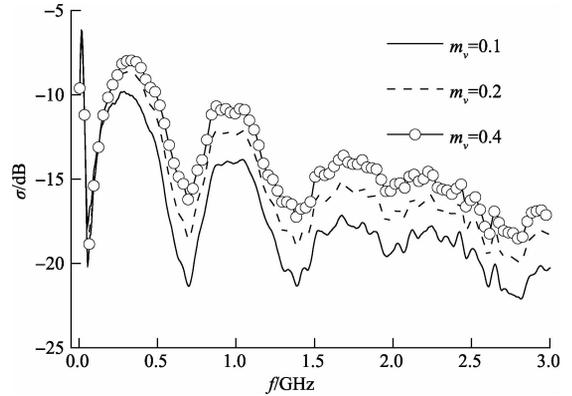


图 5 土壤湿度对后向复合散射系数的影响

4.4 目标几何参数对后向复合散射系数的影响

图 6 计算了等边三角形截面目标边长变化对后向复合散射系数 σ 的影响。其中边长分别三个不同的值,即 $ab=10$ cm、 20 cm、 40 cm。从图 6 中可以看出,在低频区, σ 几乎不随边长的变化而变化;在高频区的大部分区域, σ 随边长增大而减小,但变化并不明显且较为复杂,总之, σ 受边长的影响不大。

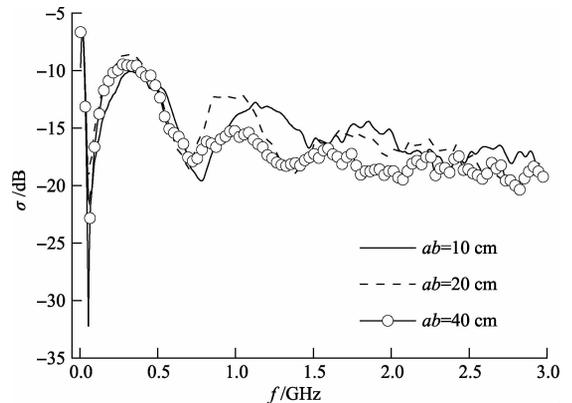


图 6 三角形边长变化对后向复合散射系数的影响

图 7 计算了等边三角形目标倾角 φ 对后向复合散射系数 σ 的影响。其中 φ 分别取 0° 、 20° 、 40° 、 60° 、 90° 。由图可知,对于同一频率点,当 φ 取 90° 时, σ 明显增大,当 φ 取 0° 和 60° 时, σ 明显减小,当 φ 取其他值时, σ 变化较小。 σ 来自于粗糙地表面后向散射、三角形目标的后向散射和粗糙地面与目标复合的后向耦合散射,由图 1 的几何关系可看出, φ

取 90° 时,入射波的方向垂直于目标的 bc 表面,此时该表面的镜反射方向为后向散射的方向,因此目标的后向散射增强, σ 明显增大;当 φ 取 0° 和 60° 时,入射波的方向分别平行于 bc 表面和 ac 表面,此时这两个表面基本没有镜反射,因此目标的后向散射减弱, σ 明显减小;当 φ 取其他值时,目标表面均有镜面反射,且镜反射方向与后向散射方向不一致,因此 φ 对 σ 的影响不大。

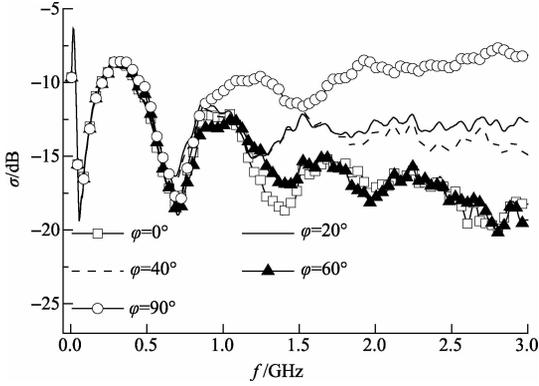


图7 目标倾角对后向复合散射系数的影响

图8 计算了目标的重心距离粗糙面高度 h_t 对后向复合散射系数 σ 的影响。其中分别取 $h_t = 20$ cm、 60 cm、 80 cm 和 100 cm。由图可知,在计算的整个频率范围内, σ 随频率 f 振荡地变化,且振荡幅度随 f 的增大而减小。 h_t 增大的同时, σ 随 f 振荡的越快,振荡幅度略微增大。这是由于 h_t 增大,三角形目标与粗糙地面之间的耦合散射增强, σ 振荡幅度减小,振荡越快。

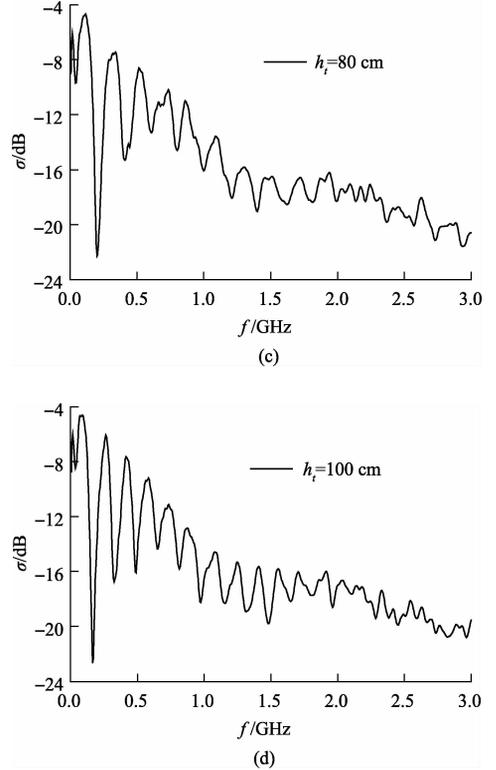
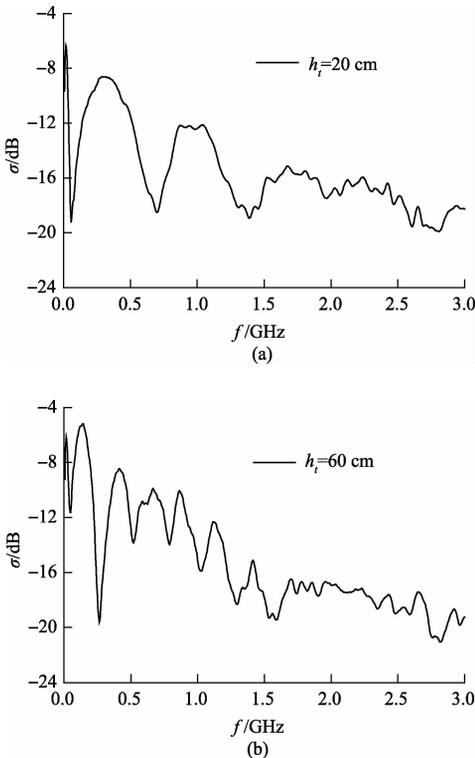


图8 目标高度对后向复合散射系数的影响

4.5 目标介电常数对后向复合散射系数的影响

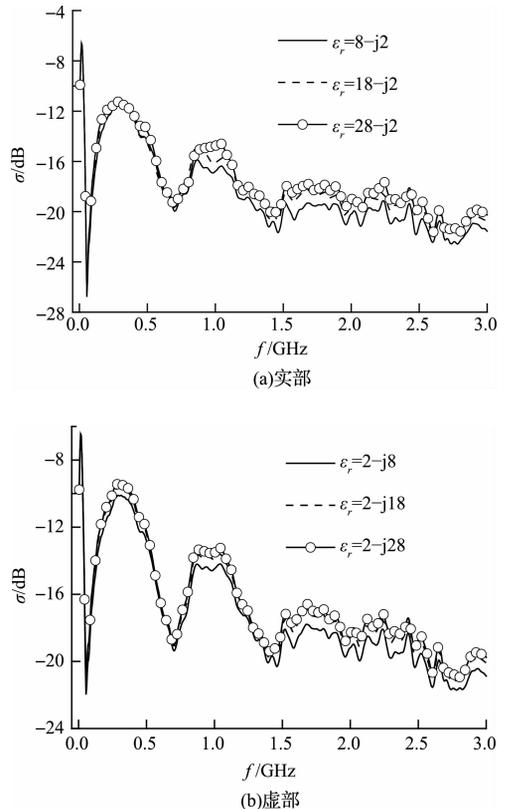


图9 目标介电常数对后向复合散射系数的影响

图 9 计算了目标的介电参数 ϵ_r 变化对后向复合散射系数 σ 的影响,其中(a)表示介电常数的实部变化,(b)表示介电常数虚部的变化。由(a)可知,在计算的频率范围内,当频率较小时,实部变化对 σ 影响不大;当频率变大时,对于任一频率点, σ 随实部的增大而增大,但相差不大。由(b)可知,当频率较小时,虚部变化对 σ 影响不大;当频率变大时,对于任一频率点, σ 随虚部的增大而增大,但相差不大。总之,目标的介电常数变化对 σ 的影响不是很大。

5 结 论

本文运用瞬态 FDTD 方法研究了高斯脉冲波入射时粗糙地面与上方三角形截面柱复合模型的宽带后向电磁散射问题,主要分析了不同的粗糙地面高度起伏均方根、相关长度,土壤湿度和三角形边长、倾角、高度及介电常数下后向散射系数随频率的变化关系。数值计算结果表明,后向复合散射系数随各个参数变化的规律比较复杂,且每个参数对后向复合散射系数的影响均受其他一些参数的制约。本文的研究结果对复杂环境中目标的识别和参数的反演具有一定的应用价值,同时也具有一定的理论意义。当然,本文只采用指数型分布粗糙地面来模拟实际地面,运用瞬态 FDTD 方法研究粗糙地面与上方三角形截面柱复合模型的宽带电磁散射问题,且仅限于一维情况,有关的计算结果还有待进一步实验验证,对于其他类型的粗糙地面,如分形及二维的宽带电磁散射问题还有待进一步研究。

参考文献

- [1] FIAZ M A, FREZZA F, PONTI C, et al. Electro magnetic scattering by a circular cylinder buried below a slightly rough Gaussian surface[J]. JOSAA, 2014, 31(1): 26-34.
- [2] 杨洋,姚建铨,王力,等.基于太赫兹目标散射特性测试系统的设计与应用[J]. 仪器仪表学报,2013, 34(5): 975-980.
- [3] FIAZ M A, ASHRAF M A. Scattering of two-dimensional field from a PEMC cylinder buried beneath slightly rough surface [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2014, 28(4): 470-484.
- [4] ZHAO H, GUO L X, LIU S H. EM scattering of a target over sea surface based on physical optics[C]// 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). IEEE, 2014: 1098-1101.
- [5] 田炜.改进的分形海面及其上方目标复合散射研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 55-58.

- [6] 何艳丽,黄飞龙.地波雷达在海面风场探测的应用[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 80-83.
- [7] 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, 5(63): 054101.
- [8] 曹秋生,刘贺军,马建超,等.基于超宽带雷达的丛林目标探测无人机系统分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(4): 351-355.
- [9] 李西敏,童创明,李晶晶.粗糙面与导弹目标复合电磁散射仿真计算[J]. 现代雷达, 2014, 4(36): 61-65.
- [10] GUO L X, XU R W. An efficient multiregion FEM-BIM for composite scattering from an arbitrary dielectric target above dielectric rough sea surfaces [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(7): 3885-3896.
- [11] 姬伟杰,童创明.分层粗糙面下方介质目标散射的快速算法[J]. 电波科学学报, 2010, 2(25): 336-342.
- [12] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Trans. Antennas Propag, 1966, 14(3): 302-307.
- [13] 葛德彪,闫玉波.电磁波时域有限差分方法(第三版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2011.
- [14] TSANG L, KONG J A, DING K H, et al. Scattering of electromagnetic waves, numerical simulations [M]. New York: Wiley-Interscience, 2004.
- [15] 朱小敏,任新成,郭立新.指数型分布粗糙地面电磁散射的 FDTD 研究[J]. 上海航天, 2011, 28(4): 1-6.

作者简介

武剑,1992 年出生,硕士研究生。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:yadxyswj@163.com

任新成,1967 年出生,博士后,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:yauxchren@126.com

朱小敏,1975 年出生,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:ydzxm123@163.com