

基于 FDTD 的粗糙地面宽带前向电磁散射研究*

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模拟实际的粗糙地面,运用 FDTD 方法研究了超宽带高斯脉冲电磁波入射粗糙地面时的宽带前向电磁散射问题;通过数值计算得到前向散射系数随频率的变化曲线,并与时谐场源激励下的结果进行了对比;分析了不同的粗糙地面高度起伏相关长度、均方根高度,土壤湿度和入射角下前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的宽带前向电磁散射特性。数值计算结果表明各参数的变化对前向电磁散射系数的影响比较明显,入射波不同极化方式下的前向散射系数也有显著变化。

关键词: 电磁散射;FDTD;粗糙地面;前向散射系数;高斯脉冲波

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 broadband forward electromagnetic scattering from rough land surface based on FDTD

Wu Jian Ren Xincheng Zhu Xiaomin

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

Abstract: The actual rough land surface is simulated with the exponential type distribution rough surface, the wide-band forward electromagnetic scattering from rough land surface under UWB Gaussian pulse electromagnetic wave incidence is studied using FDTD. The curves of forward electromagnetic scattering coefficient varied with frequency are obtained by numerical calculation, and compared with result under harmonic field source. The forward electromagnetic scattering coefficient varying with frequency is analyzed under the difference of the correlation length and the root-mean-square of rough land height fluctuation, the moisture capacity of soil, the incidence angle. The characteristics of the wide-band forward electromagnetic scattering from rough land surface are obtained. The numerical results show that the influence of various parameters on the forward electromagnetic scattering coefficient is obvious. Moreover, forward scattering coefficient with the changes of the incident polarization modes is also significantly different.

Keywords: electromagnetic scattering; FDTD; rough land surface; the forward scattering coefficient; Gaussian pulse wave

1 引 言

在现代战争中,一些武器常采用低空飞行,向地面背景的目标发射电磁波,并通过对回波信号进行分析处理以确定目标位置,从而击中目标,但是低空飞行随机干扰很大,若要准确地击中目标,就必须对各种地物表面的电磁散射特性进行研究,以便为武器系统设计提供依据。因此,随机粗糙地面的电磁散射特性研究是学者们亟待研究的一个热点问题。

迄今为止,人们对时谐的连续电磁波入射粗糙面时的

电磁散射问题已做了大量的深入研究^[1-4],但是对于非时谐的脉冲波入射情形下粗糙地面的宽带电磁散射特性研究则相对较少^[5-6]。事实上,宽带(超宽带)雷达能以超宽带脉冲电磁波作为探测手段,获取高精度、高分辨率、多目标的信息,广泛应用于丛林透视、杂波抑制和低空 RCS 目标探测等方面^[7]。毫无疑问,对粗糙地面的宽带电磁散射特性进行研究,能够更准确地获取目标位置,具有重要的理论意义和实际应用价值。

传统的近似解析方法在研究粗糙面电磁散射问题时,效率低,适用范围小。近年来,矩量法^[2]、前后向迭代算

收稿日期:2015-03

* 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)、延安大学专项科研基金(YDQ2014-40)资助项目

法^[8]、有限元法^[9]、时域有限差分方法(FDTD)^[10]等数值算法得到快速发展。FDTD 能节省计算机内存,缩短 CPU 占用时间,不仅能计算时谐的连续波散射问题,还能计算脉冲波的散射问题,具有时域数值算法的优越性,受到广大学者的青睐^[11-12]。运用 FDTD 瞬态场外推方法研究了高斯脉冲波入射下的粗糙地面瞬态响应问题,得到了前向散射系数随频率的变化曲线,分析了粗糙地面相关长度、高度起伏均方根,土壤湿度和入射角的变化对前向散射系数的影响,得到了指数型分布粗糙地面的宽带前向电磁散射特性。

2 粗糙地面模型

用 Monte Carlo 方法模拟生成一维指数型分布粗糙地面^[13],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,电磁波的入射角为 θ_i 。计算粗糙地面电磁散射的 FDTD 模型如图 2 所示,连接边界(TF/SF)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 TF/SF 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。在 FDTD 计算区域外设置厚度为 10 个网格的 UPML 吸收边界。

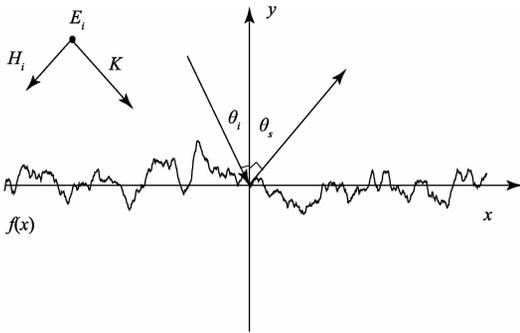


图 1 一维粗糙面电磁散射几何示意

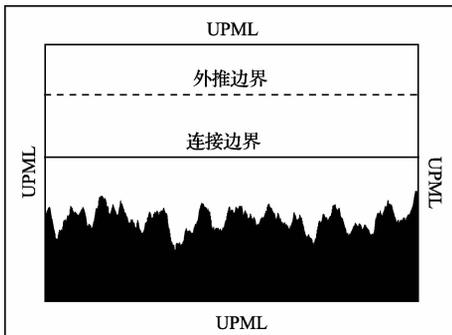


图 2 粗糙面散射 FDTD 模型

3 FDTD 方法

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

$$E_x^{n+1/2}(i, j+1/2) = CA(m)E_x^{n-1/2}(i, j+1/2) +$$

$$CB(m) \frac{H_z^n(i, j+1) - H_z^n(i, j)}{\Delta y} \quad (1)$$

$$E_y^{n+1/2}(i+1/2, j) = CA(m)E_y^{n-1/2}(i+1/2, j) - CB(m) \frac{H_z^n(i+1, j) - H_z^n(i, j)}{\Delta x} \quad (2)$$

$$H_z^{n+1}(i, j) = CP(m)H_z^n(i, j) - CQ(m) \cdot \left[\frac{E_y^{n+1/2}(i+1/2, j) - E_y^{n+1/2}(i-1/2, j)}{\Delta x} - \frac{E_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - E_x^{n+1/2}(i, j-1/2)}{\Delta y} \right] \quad (3)$$

式中: $CA(m)$ 、 $CB(m)$ 、 $CP(m)$ 、 $CQ(m)$ 及 m 的取值见文献^[12]。 Δx 、 Δy 分别为 FDTD 区域 x 、 y 方向的离散网格宽度。同理,根据 TE 和 TM 波之间的对偶关系,可写出 TM 波的 FDTD 差分公式。

根据等效原理,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。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。

普遍给入射波附加平滑的高斯窗函数来解决截断边界处场值突变而产生的反射问题,高斯窗函数表达式为:

$$G(x, y) = \exp\left\{-\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\right](\cos\theta_i/T)^2\right\} \quad (5)$$

式中: θ_i 为入射角,取 $x_0 = y_0 = 0$, $T = \rho_m \cos\theta/2.6$, ρ_m 为中心到边缘的最小距离。

通过 FDTD 的迭代运算,能计算 FDTD 计算区域的电磁场,但要计算远区的散射场,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。选取 UPML 吸收边界,取 10 个网格厚度。以 TE 波为例,各向异性介质 Maxwell 旋度方程表示为:

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = j\omega\epsilon^* \frac{s_y}{s_x} E_x \quad (6)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = -j\omega\epsilon^* \frac{s_y}{s_x} E_y \quad (7)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} = (j\omega\mu^* + \sigma^*)s_x s_y H_z \quad (8)$$

式中: ϵ^* 、 μ^* 、 σ^* 代表与 UPML 层相邻内部介质的电磁参数。 s_x 和 s_y 分别为 x 和 y 方向的单轴参数,具体形式见文献^[12]。

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^[12]。

在记录外推边界上各个时刻的场值后,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射系数式(9)获得散射系数的频率响应。

$$\sigma = 10\lg(NRCS) \text{ (dB)} \quad (9)$$

式中: $NRCS$ 表示归一化雷达散射截面,具体形式为:

$$NRCS = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{2\pi r}{L} \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} \quad (10)$$

式中: r 、 E_r 、 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 数值计算结果与讨论

4.1 算法有效性验证

为了验证算法在研究粗糙地面宽带电磁散射的正确性,利用 FDTD 时谐场对 30 个频点进行逐个运算,将计算结果与高斯脉冲波入射时 FDTD 瞬态散射结果进行对比,结果如图 3 所示。算例中粗糙面高度起伏均方根 $\delta = 2$ cm,相关长度 $l = 20$ cm,土壤介质相对介电常数 $\epsilon_r = 16.16$,入射电磁波为 TM 波,入射角 $\theta_i = 30^\circ$ 。图 3 中圆圈代表时谐场逐频点计算的结果,可明显看出,二者结果在计算频率范围内大致吻合。但是,很显然利用瞬态场计算宽带前向电磁散射系数效率更高。

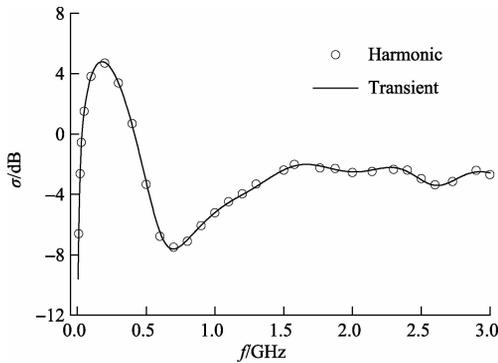


图 3 粗糙地面瞬态散射与单频点计算结果比较

在以下的数值计算中,选取指数型粗糙面模拟实际地面,分别用 TM、TE 极化的高斯脉冲平面波作为入射波,FDTD 的网格宽度为 $dx = 0.5$ cm,粗糙面的抽样长度为 $l = 1600$ cm,选取 40 个粗糙面进行统计计算。如无特殊说明,取粗糙面高度起伏均方根 $\delta = 2$ cm,相关长度 $l = 20$ cm,土壤介质相对介电常数 $\epsilon_r = 10.2802 - i1.6464$ (土壤湿度取 $m_v = 0.2 \text{ g/cm}^3$),入射角 $\theta_i = 30^\circ$,土壤类型选择粉沙壤土,土壤介电常数利用 Wang and Schmutge 的四成分模型进行计算^[14]。

4.2 粗糙地面相关长度对前向散射系数的影响

图 4 为前向散射系数 σ 随粗糙面相关长度 l 的变化关系。其中相关长度分别取 $l = 10$ cm、 $l = 20$ cm、 $l = 40$ cm。从图 4(a)可看出, TM 波入射时,当入射波频率较小时,前向散射系数 σ 随频率 f 的增大而迅速增大,且在 $f = 0.18$ GHz 处取得最大值 σ_{\max} ,且 σ_{\max} 不随 l 的变化而变化;其后,随着 f 的增大, σ 先减小再增大,最后缓慢的趋于平稳;当 $f < 0.42$ GHz 时, σ 不随 l 的变化而变化,但 $f > 0.42$ GHz

时,对于同一个频率值, σ 随 l 的增大而增大。由图 4(b)可知, TE 波入射时, σ 随频率的增大而振荡的变化,振荡的幅度随频率的增大而减小,当 $f = 0.265$ GHz 时, σ 取得最大值 σ_{\max} ,且 σ_{\max} 不随 l 的变化而变化;当 $f < 0.5$ GHz 时, σ 不随 l 的变化而变化;当 $f > 0.5$ GHz 时,对于同一频率点, l 越大, σ 相应增大,且不同 l 对应的 σ 相差较大。经分析,由于频率增大,波长变短,导致地面的相对粗糙度变大,因此 σ 振荡的幅度变小。

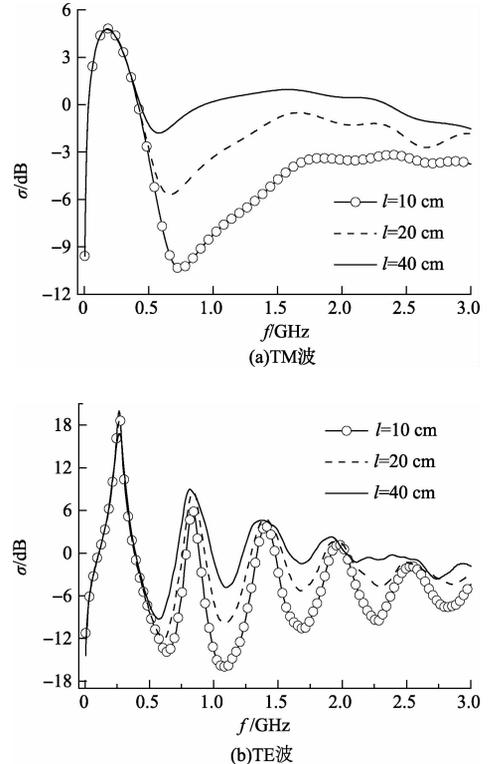


图 4 粗糙地面相关长度对前向散射系数的影响

4.3 粗糙地面均方根对前向散射系数的影响

图 5 为前向散射系数 σ 随粗糙地面高度起伏均方根 δ 的变化关系图。其中均方根分别为 2 cm、4 cm、6 cm。从图 5(a)可看出, TM 波入射时, σ 在 $f = 0.18$ GHz 处取得最大值 σ_{\max} ,且 $f < 0.42$ GHz 时, σ 不随 δ 的变化而变化;当 $0.42 \text{ GHz} < f < 1.395 \text{ GHz}$ 时, σ 随 δ 的变化较为复杂;当 $f > 1.395$ GHz 时, σ 随 δ 的增大而减小,变化较为明显。由图 5(b)可知, TE 波入射时, σ 随频率的变化情况与图 4(b)相同,但 σ 最大峰值 σ_{\max} 随 δ 的增大而减小,取得 σ_{\max} 的频率点位置随 δ 的增大而略微左移;当 $f < 0.395$ GHz 时, σ 不随 δ 的增大而变化 (σ 取 σ_{\max} 时除外);在其余大部分频率点, σ 随 δ 的增大而减小,这主要是因为 δ 增大意味着地面轮廓变得更粗糙,前向散射减弱,前向散射系数在大部分频率点相应减小。

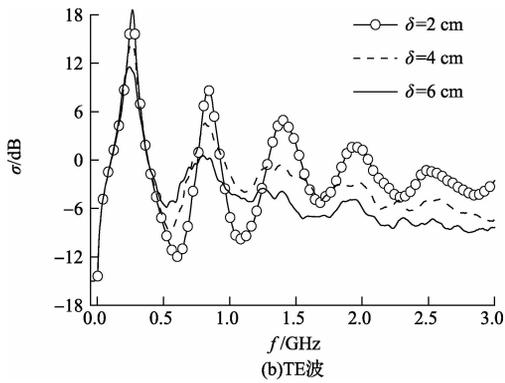
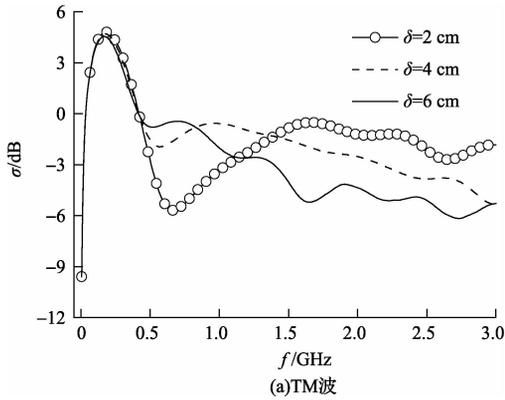


图5 粗糙地面均方根对前向散射系数的影响

4.4 土壤湿度对前向散射系数的影响

图6为前向散射系数 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6(a)、(b)可看出,在计算的整个频率范围内, σ 随土壤湿度 m_v 的增大而略微增大,变化并不明显。经分析,土壤湿度的变化使得等效介电常数差异很大,但是对同一频率值,土壤湿度对前向散射系数影响并不大。

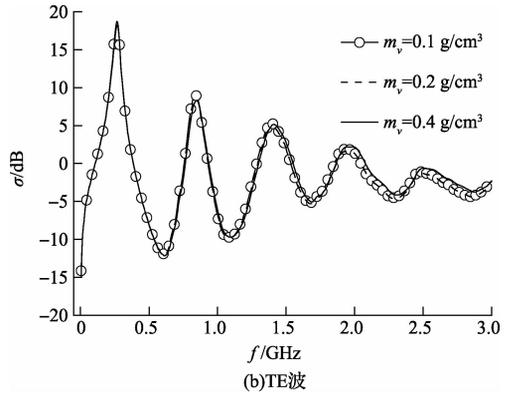
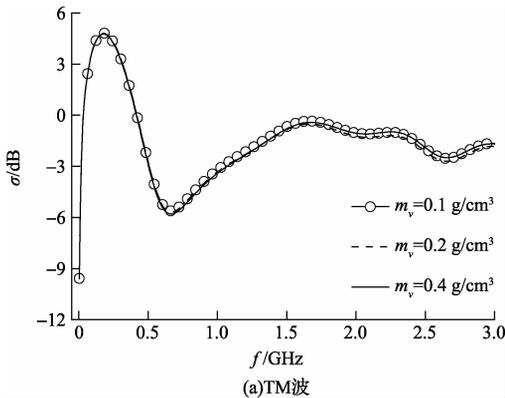


图6 土壤湿度对前向散射系数的影响

4.5 入射角对前向散射系数的影响

图7为前向散射系数 σ 随入射角 θ_i 的变化关系图。其中入射角分别取 30° 、 45° 和 60° 。从图7(a)可看出,在TM波入射的情况下, σ 最大值 σ_{\max} 随 θ_i 的增大而减小,取得 σ_{\max} 的频率点位置随 θ_i 的增大而右移;在大部分频率范围内 σ 随 θ_i 增大而减小。由图7(b)可知,TE波入射时,在计算频率范围内, σ 取得多个峰值,峰值大小随频率的增大而减小, σ 最大峰值随入射角 θ_i 的增大而减小,对应的频率位置随入射角 θ_i 的增大向高频端移动;还可以看出,频率大于最大峰值的频率位置时,随 θ_i 的增大, σ 变化较为复杂。

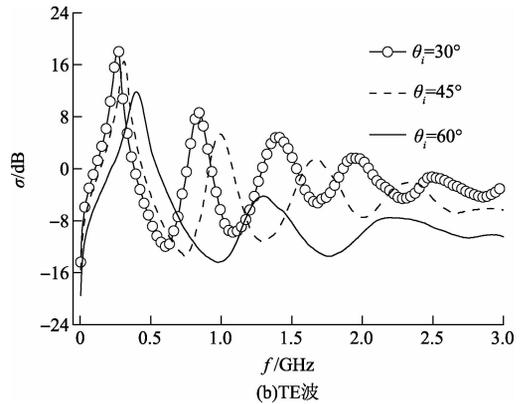
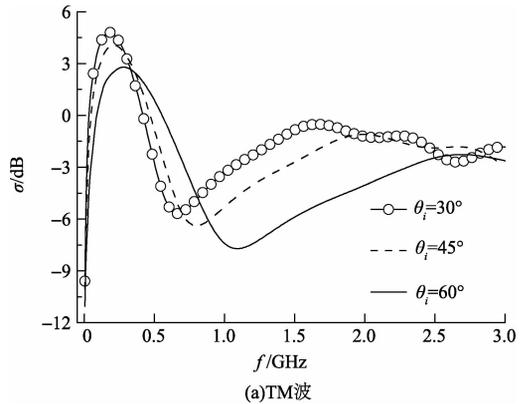


图7 入射角对前向散射系数的影响

5 结 论

基于 FDTD 瞬态场外推的方法研究了高斯脉冲波入射指数型分布粗糙地面的宽带电磁散射特性, 得出了粗糙地面相关长度、均方根, 土壤湿度及入射角等参数对前向散射系数的影响规律。结果表明前向散射系数随各参数变化的规律比较复杂。当然, 仅讨论了一维指数型粗糙面的宽带前向散射问题, 计算结果还有待进一步的实验验证, 对于其他分布的一维地物表面、二维地物表面等的前向散射问题还有待今后进一步地研究。

参考文献

- [1] 任新成, 郭立新, 焦永昌. 雪层覆盖的粗糙地面与上方矩形截面柱复合电磁散射的时域有限差分法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(14): 144101-144101.
- [2] 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.
- [3] WANG R, GUO L X, MA J, et al. Hybrid method for investigation of electromagnetic scattering from conducting target above the randomly rough surface [J]. Chinese Physics B. 2009, 18(4): 1503-1511.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] VINCENZO G, PANAGIOTIS K, CAREY M R, et al. Short-pulse three-dimensional scattering from moderately rough surfaces: A comparison between narrow-waisted Gaussian beam algorithms and FDTD [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagat, 2006, 54(1): 157-167.
- [7] 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.
- [8] 金亚秋, 李中新. 结合谱积分加速法的前后向迭代法

数值计算分形粗糙介质面的双站散射和透射[J]. 电子学报, 2002, 30(11): 1648-1653.

- [9] 李杰. 随机粗糙面及其与目标复合电磁散射有限元与高频方法建模研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [10] 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方法研究[J]. 物理学报, 2014, 63(5): 054101.
- [11] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media[J]. IEEE Transactions antennas and propagation, 1966, 14(3): 302-307.
- [12] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [13] TSANG L, KONG J A, DING K H, et al. Scattering of electromagnetic waves, Numerical simulations[M]. New York: Wiley-Interscience, 2004.
- [14] WANG JAMES R, SCHMUGGE THOMAS J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content [J]. IEEE Transaction on geoscience and remote sensing, 1980, 18(4): 288-295.

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: yadxjswj@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