

覆盖雪层土壤面的电磁波透射特征

田 炜, 任新成

延安大学物理与电子信息学院, 陕西延安 716000

摘要 采用指数型粗糙面模拟实际的粗糙雪层和土壤表面, 运用矩量法 (MoM) 结合基尔霍夫近似 (KA) 的混合算法研究了雪层覆盖土壤面的电磁波透射特征。混合算法将雪层表面划分在 MoM 区, 土壤面划分在 KA 区, 数值计算得到了透射系数的角分布曲线, 分析了雪层和土壤表面的高度起伏均方根、雪层类型、土壤湿度、雪层厚度对透射系数的影响。结果表明, 雪层表面高度起伏均方根、雪层类型、土壤湿度对透射系数有显著影响, 而土壤表面高度起伏均方根和雪层厚度对透射系数影响较小。

关键词 电磁波透射特征; 指数型粗糙面; 矩量法; 基尔霍夫近似

中图分类号 TN011

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.09.003

Transmission Characteristics of Electromagnetic Wave Through Soil Surface Covered by Snow

TIAN Wei, REN Xincheng

College of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi Province, China

Abstract The rough surface of snow and soil is simulated using a rough surface of exponential type. The transmission characteristics of electromagnetic wave through the soil surface covered by snow is investigated using the hybrid method based on the Method of Moment (MoM) and the Kirchhoff Approximation (KA). The snow surface and the soil surface are divided into an MoM region and a KA region by the hybrid method. The angular distribution of the transmission coefficient is obtained by the numerical calculation. The influences of the root-mean-square height of the snow surface and the soil surface, the type of the snow layer, the soil moisture, the thickness of the snow layer on the transmission coefficient are analyzed. It is indicated that the root-mean-square height of the snow surface, the type of the snow layer and the soil moisture have a considerable influence on the transmission coefficient, but the influence of the root-mean-square height of the soil surface and the thickness of the snow layer can be neglected.

Keywords transmission characteristics of electromagnetic wave; exponential rough surface; method of moment; Kirchhoff approximation

0 引言

粗糙面电磁散射的特性研究在微波和光学遥感等领域有着广泛的应用^[1-4], 例如可从散射回波中获得土壤含水量、农作物的成熟情况等有用的信息, 再者, 应用雷达监测处于土壤背景中的目标时, 目标和背景的散射回波信息都进入了雷达的接收系统, 只有掌握了土壤背景的电磁散射分布特征, 才可有效消除或减小背景杂波的影响, 获得目标信息。因此, 开展实际粗糙土壤面的电磁散射研究具有重要的现实意义。近年来该领域的研究引起了越来越多的学者的重视^[4-8]。目前有关单层粗糙面电磁散射的研究比较成熟, 对分层粗糙

面电磁散射的研究较少。文献[9]和[10]中分别应用微扰法和基尔霍夫近似法研究了分层粗糙面的电磁散射问题, 而就不不同类型雪层覆盖的粗糙土壤面电磁波透射问题的研究, 国内外鲜有相关报道。本文应用计算准确度较高的矩量法结合基尔霍夫近似研究了不同类型雪层覆盖土壤面的电磁波透射特征。

1 基本理论

如图 1 所示, 上层粗糙面轮廓记为 S_0 , 下层粗糙面轮廓记为 S_1 , 空间被两层粗糙面分为区域 $\Omega_0 (\epsilon_0=1, \mu_0=1)$, $\Omega_1 (\epsilon_1, \mu_1=$

收稿日期: 2012-12-14; 修回日期: 2013-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60971067); 陕西省教育厅科技计划项目 (11JK0554); 榆林市科技计划项目 (Gj11-01)

作者简介: 田炜, 讲师, 研究方向为电磁(光)波在复杂系统中的传播和散射, 电子信箱: ydianwei@126.com

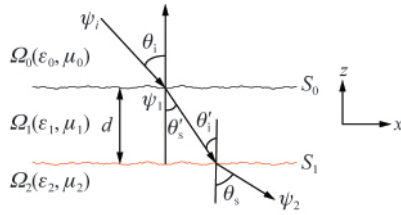


图 1 分层粗糙面电磁透射示意图

Fig. 1 Geometry of electromagnetic wave transmission through rough surface of layered medium

μ_0), $\Omega_2 (\epsilon_2, \mu_2 = \mu_0)$, θ_i 和 θ'_s 分别为上层粗糙面的入射角和透射波的散射角, θ'_i 和 θ_s 分别为下层粗糙面的局部入射角和透射波的散射角, d 为中间介质厚度。混合算法将上层粗糙面划分在 MoM 区, 下层粗糙面划分在 KA 区。电磁波 $\psi_i(\mathbf{r}_0)$ 入射到图 1 所示的上层粗糙面上, $\psi_0(\mathbf{r}_0)$ 和 $\psi_1(\mathbf{r}_0)$ 分别为区域 Ω_0 和 Ω_1 中的总场, $\psi_2(\mathbf{r})$ 为区域 Ω_2 的总场, 它们满足如下积分方程^[11]

$$\frac{1}{2}\psi_0(\mathbf{r}_0) = \psi_i(\mathbf{r}_0) + \int_{S_0} [\psi_0(\mathbf{r}'_0) \cdot \nabla G_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}'_0) - G_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}'_0) \cdot \nabla \psi_0(\mathbf{r}'_0)] dS_0 \quad \mathbf{r}_0 \in S_0 \quad (1a)$$

$$\frac{1}{2}\psi_1(\mathbf{r}_0) = - \int_{S_0} \left[\psi_1(\mathbf{r}'_0) \frac{\partial G_1(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}'_0)}{\partial n'} - G_1(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}'_0) \frac{\partial \psi_1(\mathbf{r}'_0)}{\partial n'} \right] dS_0 \quad \mathbf{r}_0 \in S_0 \quad (1b)$$

式(1)中, 区域 Ω_0 和 Ω_1 的格林函数分别为 $G_0(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}'_0)$ 和 $G_1(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}'_0)$ 。上层粗糙面任意一点满足的边界条件为

$$\psi_0(\mathbf{r}_0) = \psi_1(\mathbf{r}_0) \quad \mathbf{r}_0 \in S_0 \quad (2a)$$

$$\frac{\partial \psi_0(\mathbf{r}_0)}{\partial n_0} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi_1(\mathbf{r}_0)}{\partial n_0} \quad \mathbf{r}_0 \in S_0 \quad (2b)$$

式中, 若 TE 波入射, 取 $\rho = \mu_1/\mu_0$; 若 TM 波入射, 取 $\rho = \epsilon_1$ 。

将式(2)代入式(1), 并将积分方程(1)沿 x 轴离散, 由矩量法可得下面的矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}/\rho \\ \mathbf{C} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵方程(3)中, 未知矩阵块 \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 的元素分别为 $u_n = \sqrt{1+z'(x_n)} (\hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla \psi_1(\mathbf{r}_{0n}))$, $v_n = \psi_1(\mathbf{r}_{0n})$, 其中 $z'(x)$ 为上层粗糙面高度起伏的斜率, 矩阵块 \mathbf{H} 的元素为 $h_m = \psi_i(\mathbf{r}_{0m})$, 系数矩阵块分别为 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{E} 。为了避免在计算中由于粗糙面有限长而引起的边缘效应, 应采用加高斯窗函数之后的 Thorsos 锥形波^[11]入射, \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 可通过共轭梯度法求解矩阵方程(3)得到。区域 Ω_2 的透射场可依据基尔霍夫近似法(KA)计算得到

$$\psi_2(\mathbf{r}) = T_{12}(\mathbf{r}) \psi_1(\mathbf{r}_0) \exp(-ik_1 \sqrt{\epsilon_1} |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|) \quad (4a)$$

$$\frac{\partial \psi_2(\mathbf{r})}{\partial n} = T_{12}(\mathbf{r}) \frac{\partial \psi_1(\mathbf{r}_0)}{\partial n} \exp(-ik_1 \sqrt{\epsilon_1} |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|) \quad (4b)$$

式(4)中, Fresnel 透射系数 T_{ij} 的表达式为

$$T_{ij} = \rho_{ij} \left[1 + \frac{\epsilon_j/\epsilon_i \cos \theta'_i - (\epsilon_j/\epsilon_i - \sin^2 \theta'_i)^{1/2}}{\epsilon_j/\epsilon_i \cos \theta'_i + (\epsilon_j/\epsilon_i - \sin^2 \theta'_i)^{1/2}} \right] \quad (5)$$

式(5)中, 若 TE 波入射, 取 $\rho = 1$; TM 波入射, $\rho_{ij} = \sqrt{\epsilon_j/\epsilon_i}$ 。

分层介质粗糙面透射波的归一化散射系数为^[12]

$$\sigma'_s = \frac{|\psi_s^N(\theta_s)|}{8\pi k_0 g \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cos \theta_i \left[1 - \frac{1+2\tan^2 \theta_i}{2k^2 g^2 \cos^2 \theta_i} \right]} \quad (6)$$

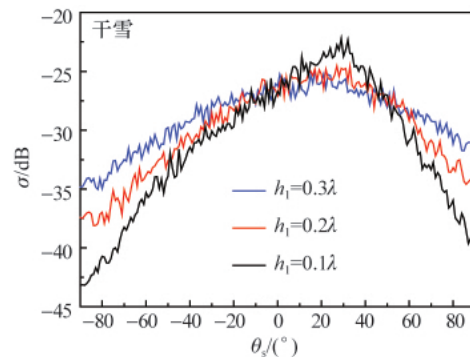
其中, $\psi_s^N(\theta_s) = \int_{S_1} [\psi_2(\mathbf{r}) (-i\mathbf{k}_s \cdot \hat{\mathbf{n}}) - \partial \psi_2(\mathbf{r}) / \partial n'] \exp(-i\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{s}$, 透射波的波矢量为 $\mathbf{k}_s = k_0(\sin \theta_s \hat{\mathbf{x}} + \cos \theta_s \hat{\mathbf{z}})$ 。

2 数值计算结果及分析

本文依据 Monte Carlo 方法^[7]产生的指数型粗糙面来模拟实际的雪层和土壤表面, 如图 1 所示, 在应用混合算法计算过程中, 锥形入射波参数取频率 $f=0.3\text{GHz}$, 入射角 $\theta_i=30^\circ$, 雪层表面和土壤表面长度为 $L_{x1}=L_{x2}=160\lambda$, 一个波长由 10 个网格点均分, 选雪层覆盖的土壤类型为沙壤土, 不同类型雪层以及各种湿度土壤的等效介电常数可分别通过文献[8]的方法计算得到。本文仅考虑 TM 波入射的情形, 计算结果是对 100 个分层粗糙面的透射系数取均值得到。

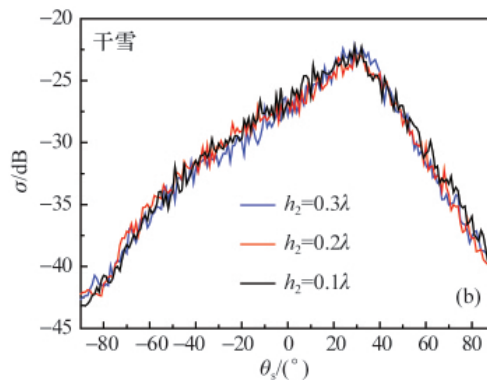
2.1 粗糙面高度起伏均方根对透射系数的影响

图 2 给出了不同粗糙面高度起伏均方根对应的透射系



(a) 雪层表面高度起伏均方根

(a) Root-mean-square height of the snow surface



(b) 土壤表面高度起伏均方根

(b) Root-mean-square height of the soil surface

图 2 不同高度起伏均方根对应透射系数的角分布

Fig. 2 Distribution of σ for different h

数随入射波散射角的变化曲线,计算中取雪层和土壤表面的相关长度均为 $l_1=l_2=5.0\lambda$, 干雪的等效介电常数为 $\epsilon_1=1.035+0.004i$, 土壤湿度为 $m_v=0.1$ 的等效介电常数为 $\epsilon_2=11.24+0.12i$, 雪层的厚度为 $d=1.0\lambda$ 。图 2(a)反映了雪层表面高度起伏均方根 h_1 对透射系数 σ 的影响情况。可以看出,在透射波散射角变化的大部分范围内, h_1 越大, σ 越大,而在峰值方向附近, σ 随 h_1 的增大而减小。图 2(b)反映了土壤表面高度起伏均方根 h_2 对透射系数 σ 的影响情况,在透射波散射角较大时, σ 随 h_2 的增大而减小,而在其他方向,土壤的高度起伏均方根对透射系数的影响很小。从图 2 可以看出,雪层表面高度起伏均方根对透射系数的影响较大,而下层土壤表面高度起伏均方根对透射系数的影响较小。

2.2 雪层类型对透射系数的影响

图 3 给出了雪层类型对透射系数的影响情况,计算中取雪层和土壤表面的高度起伏均方根、相关长度分别为 $h_1=h_2=0.05\lambda$, $l_1=l_2=5.0\lambda$, 土壤湿度 $m_v=0.1$, 雪层的厚度为 $d=1.0\lambda$, 通过文献[13]可得到不同类型雪的等效介电常数分别为:干雪 $\epsilon_{11}=1.035+0.004i$, 潮雪 $\epsilon_{12}=1.7013+0.005i$, 湿雪 $\epsilon_{13}=1.9010+0.003i$ 。可以看出,当湿雪覆盖土壤表面时,透射系数最大,潮雪、干雪对应的透射系数依次减小,这是因为当干雪覆盖土壤表面时,两层介质的介电常数差别较大,雪层和土壤的界面对电磁波的反射较强,导致透射较弱。

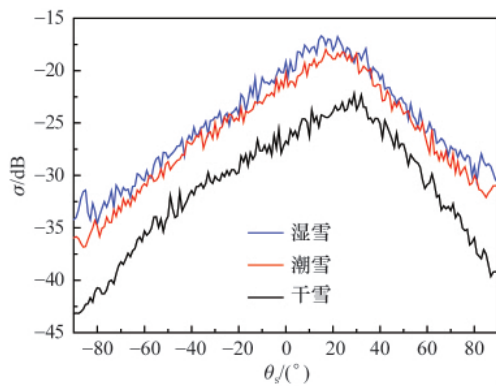


图 3 不同类型雪层对应透射系数的角分布
Fig. 3 Distribution of σ for different type of snow layer

2.3 土壤湿度对透射系数的影响

图 4 给出了土壤湿度对透射系数的影响情况,计算中取雪层和土壤表面的高度起伏均方根、相关长度分别为 $h_1=h_2=0.05\lambda$, $l_1=l_2=5.0\lambda$, 干雪的等效介电常数为 $\epsilon_1=1.035+0.004i$, 雪层的厚度为 $d=1.0\lambda$, 通过文献[12]计算得到湿度分别为 $m_v=0.1, 0.2, 0.3$ 时, 土壤介电常数分别为 $\epsilon_{21}=6.219+0.047i, \epsilon_{22}=11.24+0.12i, \epsilon_{23}=17.43+0.22i$ 。可以看出,在透射波散射角变化的整个范围内,土壤湿度越大,透射系数越小,这是因为土壤湿度越大,雪层和土壤的介电常数差别越大,导致下层界面反射增强,透射减弱。

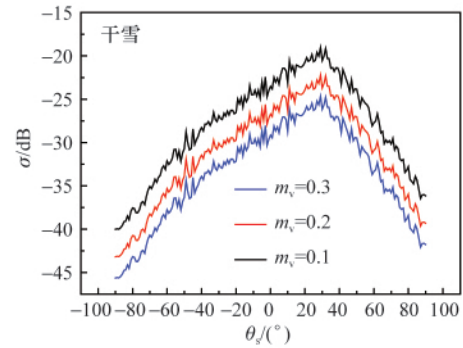


图 4 不同土壤湿度对应透射系数的角分布
Fig. 4 Distribution of σ for different m_v

2.4 雪层厚度对透射系数的影响

图 5 给出了雪层厚度对透射系数的影响情况,计算中取雪层和土壤表面的高度起伏均方根、相关长度分别为 $h_1=h_2=0.05\lambda$, $l_1=l_2=5.0\lambda$, 干雪的等效介电常数为 $\epsilon_1=1.035+0.004i$, 土壤湿度为 $m_v=0.1$ 。可以看出,在透射波散射角变化的大部分范围内,透射系数随雪层厚度的增大而减小,这是因为雪层厚度增大,电磁波在雪层的传播距离增大,导致电磁波衰减增大。另外,电磁波在介质中的衰减与介质介电常数的虚部有关,而干雪等效介电常数的虚部很小,所以在电磁波传播中由于雪层厚度增大而导致的衰减程度很小。

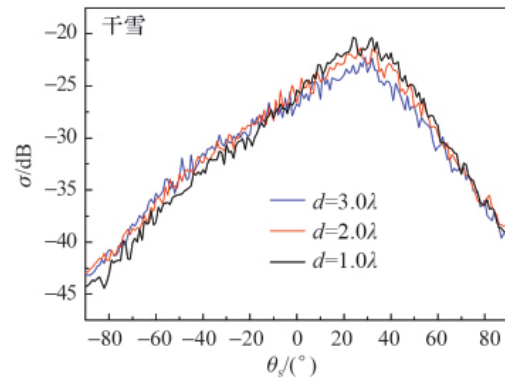


图 5 不同雪层厚度对应透射系数的角分布
Fig. 5 Distribution of σ for different d

3 结论

当电磁波入射到雪层覆盖的土壤面时,发生在土壤粗糙面下方的电磁波透射对于诸多实际工程问题的研究具有一定的现实意义。本文应用计算准确度较高的矩量法结合基尔霍夫近似研究了不同类型雪层覆盖土壤面的电磁波透射特征,在混合算法中将雪层划分在 MoM 区,土壤面划分在 KA 区,数值计算得到了透射系数的角分布曲线,分析了雪层粗糙面和土壤面的高度起伏均方根、雪层类型、土壤湿度、雪层厚度对透射系数的影响。本文的数值结果对实际植被覆盖的地面模型或上方有油层海面模型的电磁波透射的研究具有

一定的参考价值。下一步将重点研究 3 层介质粗糙面的电磁透射问题。

参考文献 (References)

- [1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing[M]. London: Addison-Wesley Publishing, 1982.
- [2] Duan X Y, Moghaddam M. 3D vector electromagnetic scattering from arbitrary random rough surfaces using stabilized extended boundary condition method for remote sensing of soil moisture [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Sensing, 2012, 50(1): 87-103.
- [3] Weihermüller L, Huisman J A, Lambot S, et al. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques [J]. Journal of Hydrology, 2007, 340: 205-216.
- [4] Demarty Y, Thirion-Lefevre L, Gobin V. Modelling of the electromagnetic scattering by sea surfaces at grazing incidence. Application to HF surface wave radars[J]. Comptes Rendus Physique, 2010, 11(1): 87-95.
- [5] Zribi M, Baghdadi N, Holah N, et al. Evaluation of a rough soil surface description with ASAR-ENVISAT radar data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95: 67-76.
- [6] Liao W L. Application of transition matrix to scattering of elastic wave in half-space by s surface scatterer[J]. Wave Motion, 2011, 48: 325-334.
- [7] 郭立新, 陈建军, 韦国晖, 等. 粗糙面电磁散射的小斜率近似方法研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(3): 408-413.
Guo Lixin, Chen Jianjun, Wei Guohui, et al. Journal of Xidian University, 2005, 32(3): 408-413.
- [8] 刘鹏. 三维粗糙面电磁双站散射的直接型区域分解计算[J]. 计算物理, 2010, 27(1): 73-81.
Liu Peng. Chinese Journal of Computational Physics, 2010, 27(1): 73-81.
- [9] 任新成, 郭立新. 具有二维 fBm 特征的分层介质粗糙面电磁散射的特性研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1627-1634.
Ren Xincheng, Guo Lixin. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1627-1634.
- [10] Dé Champs N, Bourlier C, De Beaucoudrey N, et al. Numerical simulations of scattering from multilayers separated by one-dimensional rough interface [C]// Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2003, 1: 118-120.
- [11] Tsang L, Kong J A, Ding K H. Scattering of electromagnetic waves[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001: 111-174.
- [12] Wang J R, Schmugge T J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1980, 18: 288-295.
- [13] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
Li Daxin. Method and application of ground penetrating radar [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1994.

(责任编辑 齐志红)

· 学术动态 ·

“中国科协年会”背景

从 2006 年起,中国科协年会由综合性、跨学科、开放性的学术年会转型为大科普、综合交叉、为举办地服务的综合性科协年会。年会由中国科协与省级人民政府联合举办,每年举办 1 届,至今已先后在杭州、西安、长春、成都、沈阳、博鳌、乌鲁木齐、北京、武汉、郑州、重庆、福州、天津、石家庄举办了 14 届。

年会由各省、自治区、直辖市、副省级城市科协申办。组织工作在中国科协和举办地党委、政府领导下开展,设组织委员会、年会办公室和执行委员会。年会围绕党和国家工作大局、科技发展需要和举办地特色,按照“征集—推荐—审定”的程序确定主题。年会规模一般控制在 6000 人左右,包括党和国家领导人 3 人以上、国家相关部委和中办地省市主要领导 10 余人、“两院”院士 120 人左右、港澳台专家 20 余人、中国科协常委 100 余人、科技工作者代表 5000 人左右。

“大科普,学科交叉,为举办地服务”是年会的宗旨。大科普是国际惯例;学科交叉是推进学术交流,促进学科发展,增强年会对科技工作者的吸引力;紧密结合地方实际,为地方经济社会发展建言献策,为举办地服务,是年会的方向。