

AIEM 模型在积雪散射模拟中的应用

武胜利, 王建明, 刘伟, 余琴

(中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要:介绍一种基于一阶辐射传输的积雪散射模型。该模型考虑了积雪覆盖地表微波散射的3种回波分量:雪层表面散射、下垫面散射以及雪层体散射。对于其中2个面散射分量,文章中应用一种新的面散射模型——AIEM取代原有的IEM模型进行处理。最后,使用Michigan大学的实测数据对改进后模型的模拟结果进行验证,并与改进前的模拟结果进行了对比。

关键词:辐射传输模型;面散射;体散射;积雪;AIEM

中图分类号:TP 79 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-070X(2006)01-0040-03

0 引言

辐射传输模型自提出以来,已经广泛应用于微波遥感的各个领域,如大气参数反演、冰雪参数反演、植被参数反演等。一阶辐射传输模型是辐射传输模型的一阶形式,在冰雪参数反演中得到了相当的重视^[1]。在应用一阶辐射传输模型的不同积雪参数反演方法中,模型描述的区别主要表现在两方面:一是散射回波组成部分的不同,二是各个散射回波组成部分物理过程模拟方法的不同。

积雪覆盖地表的散射回波可以分为4个组成部分:雪层表面散射、雪层体散射、雪层下垫面散射以及雪层下垫面与雪层之间的相互作用。对于不同的雪层表面、雪层以及雪层下垫面参数来说,这4部分在总散射回波中所占的比重是不同的。但是,在一般条件下,雪层体散射与雪层下垫面散射在总散射回波中占到了绝对优势的比重^[2]。因此,这两个组成部分在基于辐射传输模型的不同积雪反演方法中都是必需的,而另外两个组成部分则根据实际情况作相应的取舍。

雪层体散射考虑雪粒子的形状、大小与分布,主要有瑞利散射模型、米氏散射模型以及密集介质的辐射传输模型等。

雪层表面散射与雪层下垫面散射两部分均属于面散射。当前有以下几种模型可以进行模拟:几何

光学模型、物理光学模型、小扰动模型、积分方程模型以及Oh模型等半经验模型^[3],而应用比较广泛的是积分方程模型(Integral Equation Model, IEM)^[4]。

Tzong-Dar Wu等在2001年^[5]和2004年^[6]分两次对IEM模型进行了改进,改进后的模型被称为Advanced IEM模型,简称AIEM。经过与实测数据对比发现,AIEM能够得到比IEM更为精确的粗糙表面散射模拟值。因此,本文将使用AIEM处理积雪覆盖地表散射过程中的面散射部分,并将模拟结果与实测数据进行对比。

1 模型描述

1.1 辐射传输模型

一般来说,辐射传输模型可以表达为如下形式^[1]:

向上能量传输

$$\frac{d}{dz}I^+(z) = -k_{es}I^+(z) + F^+(z) \quad (1)$$

向下能量传输

$$\frac{d}{dz}I^-(z) = k_{es}I^-(z) - F^-(z) \quad (2)$$

式中,

$$k_{es} = k_e/\mu_s = k_e/\cos\theta_s \quad (3)$$

$$\begin{cases} I^+(z) = I(z, \mu_z, \varphi_z) \\ I^-(z) = I(z, -\mu_z, \varphi_z) \end{cases} \quad (4)$$

$$F^\pm(z) = \frac{k_{ss}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 P(\pm\mu_s, \mu, \varphi_s - \varphi) I^\pm d\mu d\varphi + \frac{k_{ss}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 P(\pm\mu_s, -\mu, \varphi_s - \varphi) I^\mp d\mu d\varphi \quad (5)$$

式中 k_s, k_e 分别为体散射矩阵与消光矩阵; $k_{ss} = k_s / \cos\theta_s$; $P(\pm\mu_s, \mu, \varphi_s - \varphi)$ 为散射相位矩阵。

1.2 改进的 IEM 模型(AIEM)

积分方程模型(Integrated Equation Model, IEM) 由 A. K. Fung 等人于 1992 年提出。该模型是基于电磁波辐射传输方程的地表散射模型,能在一个很宽的地表粗糙度范围内再现真实地表后向散射情况,已被广泛应用于微波地表散射、辐射的模拟和分析中。然而,将 IEM 模型应用于实际自然地表时,模型模拟值与实际地表测量后向散射值之间仍然存在一些不一致性。

Tzong - Dar Wu 等在 2001 年^[5]和 2004 年^[6]分两次对 IEM 模型进行了改进。2001 年对原有 IEM 模型中计算菲涅尔反射系数的方法进行了改进,提出了一种能够将粗糙度影响以及介电常数影响同时考虑在内的菲涅尔反射系数计算方法,这与原有仅考虑介电常数的方法相比有很大改进;2004 年进一步计算了补偿场振幅与相位的精确值,以取代原有的近似假设。

在 AIEM 中,双站散射系数可表达为

$$\sigma_{qp}^s = \sigma_{qp}^k + \sigma_{qp}^{kc} + \sigma_{qp}^c = \frac{k_1^2}{2} \exp[-\sigma^2(k_z^2 + k_{sz}^2)] \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \sigma^{2n} |I_{qp}^n|^2 \frac{W^{(n)}(k_{sx} - k_x, k_{sy} - k_y)}{n!} \quad (6)$$

其中,

$$I_{qp}^n = (k_{sz} + k_z)^n f_{qp} e^{-\sigma^2 k_z k_{sz}} + \frac{1}{4} [(k_{sz} - q_1)^n F_{qp_1}^{(+)} e^{-\sigma^2(q_1^2 - q_1 k_{sz} + q_1 k_z)} + (k_{sz} - q_2)^n F_{qp_2}^{(+)} e^{-\sigma^2(q_2^2 - q_2 k_{sz} + q_2 k_z)} + (k_{sz} + q_1)^n F_{qp_1}^{(-)} e^{-\sigma^2(q_1^2 - q_1 k_{sz} + q_1 k_z)} + (k_{sz} + q_2)^n F_{qp_2}^{(-)} e^{-\sigma^2(q_2^2 - q_2 k_{sz} + q_2 k_z)}] + \frac{1}{4} [(k_{sz} + q_1)^n F_{qp_1}^{(+)} e^{-\sigma^2(q_1^2 - q_1 k_{sz} + q_1 k_z)} + (k_{sz} + q_2)^n F_{qp_2}^{(+)} e^{-\sigma^2(q_2^2 - q_2 k_{sz} + q_2 k_z)} + (k_{sz} - q_1)^n F_{qp_1}^{(-)} e^{-\sigma^2(q_1^2 - q_1 k_{sz} + q_1 k_z)} + (k_{sz} - q_2)^n F_{qp_2}^{(-)} e^{-\sigma^2(q_2^2 - q_2 k_{sz} + q_2 k_z)}] \quad (7)$$

在上述表达式中, σ_{qp}^k 为基尔霍夫项; σ_{qp}^c 为基尔

霍夫项的补域项; σ_{qp}^{kc} 为二者交叉项; $W^{(n)}(\cdot)$ 为表面自相关函数的 n 阶傅立叶变换。 f_{qp}, F_{qp} 以及计算二者所需菲涅尔反射系数 $R(T)$ 的具体计算方法可参考文献^[5,6]。

1.3 针对积雪散射的一阶辐射传输模型

针对积雪这一特例,本文提到的一阶辐射传输模型对散射介质特性主要有以下两个假设:雪层表面与雪层下垫面为随机粗糙表面;雪层为不规则、各向异性的瑞利散射层,由球形雪粒子与空气组成。

本文使用的积雪散射模拟方法将积雪覆盖地表的雷达回波分为以下 3 个主要组成部分:雪层表面散射、雪层体散射以及雪层下垫面散射。

雪层表面散射分量,直接用 AIEM 进行计算。

雪层下垫面散射分量,用式(8)计算

$$\sigma_{gpp}^0 = \cos\theta T_{lt} T_{tl} \exp(-2k_e d / \cos\theta_t) \cdot \sigma_{pp}^0(\theta_t) / \cos\theta_t \quad (8)$$

其中 $\sigma_{pp}^0(\theta_t)$ 用 AIEM 计算。

雪层体散射分量,表达形式如式(9)

$$\sigma_{vpp}^0 = 0.5 (k_s/k_e) T_{lt} T_{tl} \cos\theta [1 - \exp(-2k_e d / \cos\theta_t)] \cdot P_{pp}(\cos\theta_t, -\cos\theta_t; \pi) \quad (9)$$

式(8)、(9)中 k_s, k_e, T 分别为散射系数、消光系数和透射系数; θ 为入射角; θ_t 为折射角; d 为雪层深度; P_{pp} 为 Rayleigh 相位矩阵。

2 结果验证

本部分将使用 1995 年 Michigan 大学的实测数据^[7]与改进前后的模型模拟结果分别进行对比。

1995 年,Michigan 大学的 John R. Kendra 等对不同深度人造雪层的雷达散射特性进行了研究。分别在 L、C、X 波段下对裸露地表以及 20 cm、60 cm、102 cm 三种深度的人造积雪进行了观测。本文将把他们的测量结果与应用改进前后模型得到的模拟结果进行对比。

John R. Kendra 实验中的积雪与地表参数如表 1 所示,其中,地表介电常数在 C 波段下测得。

表 1 Kendra 实验中的积雪与地表参数

地表	雪层内部	雪层表面	雪层深度
均方根高度 $s = 0.32 \text{ cm}$	积雪颗粒直径 $d = 0.27 \pm 0.11 \text{ mm}$	均方根高度 $s = 0.45 \text{ cm}$	$d_1 = 20 \pm 6 \text{ cm}$
相关长度 $l = 2.09 \text{ cm}$	介电常数 $\epsilon = 1.9 - j 0.015$	介电常数实部 $\epsilon_r = 1.97$	$d_2 = 60 \pm 10 \text{ cm}$
介电常数实部 $\epsilon_r = 4.7$	积雪密度 $\rho_s = 0.48 \text{ g/cm}^3$		$d_3 = 102 \pm 9 \text{ cm}$

从图 1 看出,在大多数情况下,特别在 20° ~ 40° 的入射角范围, AIEM 比 IEM 提供更精确的模拟结果。

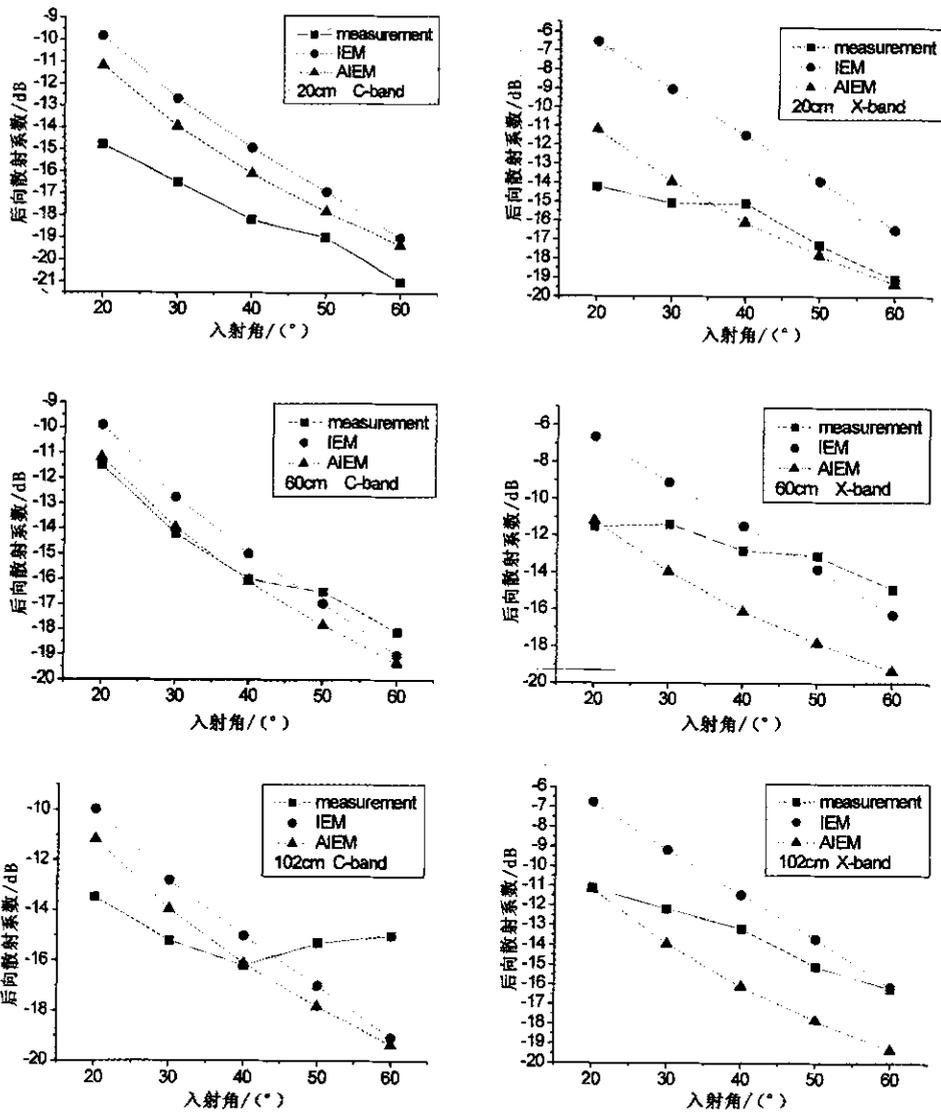


图 1 实测结果与分别使用 IEM 与 AIEM 的模拟结果对比 (■为实测数据;●为使用 IEM 模拟结果;▲为使用 AIEM 模拟结果)

在 X 波段情况下,随入射角的增加,实测后向散射值并没有模拟结果降低的那么迅速,可能因为是大入射角下积雪体散射比重增加。因此,由于忽略了雪层体散射中的多次散射而造成的误差将随体散射比重的增加而增加。

3 结论

本研究针对积雪研究中广泛使用的一阶辐射传输模型,使用 AIEM 替代 IEM 对雪层覆盖地表进行散射模拟。结果显示, AIEM 的使用可以在一定程度上提高模拟的准确性,为建立更加准确的积雪参数反演模型打下基础。

参考文献

- [1] Fung A drian K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications[M]. Norwoodma : Artech House , 1994.
- [2] Ulaby F T , Stiles W H. The active and passive microwave response to snow parameters 2. water equivalent of dry snow[J]. J. Geophys. Res. , 1980 85(C2) : 1045 - 1049.
- [3] Chen K S , Fung A drian K. A Comparison of Backscattering Models for Rough Surface[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing , 1995 33(1) : 195 - 200.
- [4] Fung A drian K , Li Zongqian , Chen K S. Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing , 1992 30(2) : 195 - 200.
- [5] Wu Tzong - Dar , Chen K S , Shi Jiancheng et al. A Transition Model for the Reflection Coefficient in Surface Scattering[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing , 2001 39(9) : 2040 - 2050.

[6] Oracle Spatial. 技术白皮书[EB/OL]. <http://www.oracle.com> , 2003 - 11 - 8.

[7] 周新忠, 赵俊. GIS 中应用 Oracle Spatial 对象模型进行空间数据存储的分析[J]. 矿山测量, 2003(8) 39 - 42.

[8] 罗平, 杜清运. 基于关系数据库的 CA 模型扩展和时空模拟实验研究[J]. 地理学与国土研究, 2002 (8) 8 - 11.

[9] 梅承力, 周源华. 高维数据空间索引的研究[J]. 图像通信与信息处理研究, 2002 (1) 22 - 25.

[10] 马修军, 周贵云, 邱伦. GIS 空间动态模型组件的设计实现地理学与国土研究[A]. 中国地理信息系统会第二次团体会员代表大会暨海峡两岸地理信息系统发展研讨会论文集[C]. 2003.

[11] 马常杰, 陈守余. 基于 MapGIS 的勘探剖面数据库设计与实现[J]. 地理与地理信息科学, 2003 ,19(5) 32 - 34.

THE MMP FILTER ALGORITHM IN THE OBJECT - RELATIONAL SPETIAL DATABASE AND ITS ADVANTAGES

KONG Dong - yan¹ , LIU Jun² , WANG Hong - bin³

(1. China University of Geosciences , Beijing 100083 , China ; 2. Peking University , Beijing 100081 , China ; 3. Daqing Oil-field Geophysical Company , Daqing 163000 , China)

Abstract : The MMP (Minimum Maximum Points) filter algorithm is a highly - efficient filter algorithm for the spatial data in the object - relational spatial database. The description and the application result analysis of the MMP algorithm demonstrate the advantages of the MMP algorithm in the retrieval of mass volume of spatial data , i. e. , the speed of the MMP algorithm is at least scores of times higher than that of the function operation.

Key words : GIS ; Object - relational spatial database ; ZEUS 2000 ; MMP filter algorithm

第一作者简介: 孔冬艳(1969 -)女, 博士, 计算机、自控、地图制图学与地理信息专业, 目前研究方向为图形处理与地理信息。

(责任编辑: 刁淑娟)

=====

(上接第 42 页)

[6] Wu Tzong - Dar , Chen K S. A Reappraisal of the Validity of the IEM Model for Backscattering From Rough Surfaces[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing , 2004 42(4) 743 - 753.

[7] Kendra John R. Microwave Remote Sensing on Snow : An Empirical/ Theoretical Scattering Model for Dense Random Media[D]. University of Michigan , 1995.

THE APPLICATION OF THE AIEM MODEL TO THE SNOW COVERED GROUND SCATTERING SIMULATION

WU Sheng - li , WANG Jian - ming , LIU Wei , YU Qin

(State Key Lab of Remote Sensing Science , Institute of Remote Sensing Application , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100101 , China)

Abstract : A method of snow covered ground simulation using the first - order radioactive transfer model is described in this paper. In this method , three parts of the echo are taken into account , i. e. , top surface scattering , volume scattering and subsurface scattering. A new surface scattering model——AIEM , instead of the IEM model , is used to deal with the surface scattering problem. Finally , the improved method is verified using the measured data of 1995 from the University of Michigan.

Key words : Radioactive transfer model ; Surface scattering ; Volume scattering ; Snow ; AIEM

第一作者简介: 武胜利(1980 -)男, 中国科学院遥感应用研究所博士研究生, 主要从事主动微波遥感方面研究。

(责任编辑: 刁淑娟)