



微波遥感机理模型研究进展*

施建成

(中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室 北京 100101)

摘要 在全球环境变化的背景下,区域及全球尺度地表参数和能量循环的研究中迫切需要大范围、高精度的观测数据。随着遥感技术的迅速发展,遥感已经具备在全球尺度上精确监测地球系统中诸多要素的能力。特别是星载微波遥感系统,具备全天时、全天候的观测能力,且对多种地表要素特性十分敏感,已广泛应用在全球积雪、土壤水分与植被等地表要素的监测和定量反演之中。精确的微波机理模型是理解遥感观测、发展遥感反演算法以及提高数据同化系统中观测算子精度的基础和关键。近30年来,研究人员基于电磁辐射和散射理论及微波辐射传输方程,针对不同传感器参数特性进行了大量卓有成效的研究,建立了从单散射体、随机粗糙表面到积雪、植被等典型地物的微波散射、辐射机理模型,广泛应用于微波观测模拟和反演。文章对这一系列微波机理模型的研究进展进行了系统的介绍和评述。随着遥感数据的不断丰富和遥感建模及反演理论的深入发展,包括微波遥感在内的遥感手段将为地球系统的研究及应用发挥更为重要的作用。

关键词 微波遥感,理论模型,土壤水分,植被,积雪

DOI:10.3969/j.issn.1000-3045.2013.Z01.009



施建成研究员

1 引言

在全球环境变化的背景下,准确理解和描述全球地表参数及能量循环中关键参数的时空分布十分重要。以水循环为例,积雪、土壤水分与植被等地表参数是水文模型、

气候及陆面过程模式中的重要参数。传统的方法

很难大范围、高效率 and 全过程地对气候及陆面过程模式中需要的水文参数进行常规观测。由于缺乏不同尺度大范围、高精度气象及陆面过程水文参数观测数据,在研究区域气候变化的时间和空间演变特点研究中,迫切需要用新的科学与技术手段以改进当前的水循环观测系统。与传统观测手段不同,遥感把传统的“点”测量方法获取的有限代表性的信息扩展为更加符合客观世界的“面”信息(区域信息),这使我们真正地对地表参数进行定量分析成为可能。利用遥感手段获取的不同尺度大范围、高精度地表参数不仅能改善当前的陆表观测系统,而且为开展定量的、陆-气相互作用

* 收稿日期:2013年3月27日



的、具体的气候模式及时空特性提供科学依据和技术支撑。

2 微波遥感概述

按照传感器获取能量时采用的波段分类,获取地表参数信息的卫星传感器有3种:可见光和红外波段传感器、微波波段传感器。可见光和红外波段传感器易受大气影响,在云雨天无法获取地表信息。而微波遥感具有独特的优势,可以穿透云雾、雨雪、深入地表,具有全天时、全天候的工作能力。如阴雨绵绵的情况对L波段的微波观测影响很小。更重要的是,微波遥感观测对于植被特性的变化、地表土壤水分和积雪参数十分敏感,已广泛应用于积雪、植被等地表参数的监测和反演应用之中。按照观测方式分类,微波遥感进一步分为主动和被动两种方式。被动方式与可见光和红外遥感类似,由微波辐射计接收观测目标的微波辐射。主动方式则由遥感观测平台发射电磁波,然后接收观测目标的回波信号。微波遥感可提供各种信息,如海浪高度、海面风力场、植被种类和生物量、土壤水分等。此外,通过微波信号中的相位信息进行干涉测量,还可以获取精确的地面高程信息,这也是光学、红外等其他遥感手段所不具备的。

微波遥感技术始于20世纪60年代,在最近20年发展迅速。可用于地表关键参数观测的卫星系统有:(1)1997年发射的TRMM卫星,其上所搭载的降雨雷达和微波成像仪,可用于反演降水和监测陆地表面土壤水分等参数,其中微波成像仪有9个通道(10.65—85.5GHz)用来观测地表,以及将来的全球降雨测量(GPM)系列卫星,它能反演每3小时的降雨量;(2)地球观测系统(EOS)的Terra和Aqua卫星和我国2008年发射的风云三号卫星,都搭载有可见光、近红外、热红外和微波传感器,可用于监测和反演入射太阳辐射、反照率、植被特征、地表温度、表面发射率、降水、大气水汽和气溶胶等参数。这些由光学遥感观测及反演所获取的地表和大气参数是区域及大尺度蒸散量模拟和估

算的必要参数。依靠微波频率反演的表面发射率可以用来估计地表特征、土壤水分和雪特征(覆盖范围和雪水当量);(3)中、低分辨率星载散射计,如ERS-1/2风散射计,由于重复周期短、观测尺度大且能对地表进行连续观测,已开始应用于地表特征监测的研究中。现有方法一般通过建立这些地表参数与所观测的后向散射系数之间关系的前向模型的反演,来获取地表几何参数和介电属性;(4)高空间分辨率的星载雷达观测可提供中、小尺度高空间分辨率的地表参数观测。现在轨的TerraSAR-X、ALOS/PALSAR、RADARSAT-2、COSMO-SkyMed和我国的HJ-1C小卫星,都可提供植被覆盖、土壤水分和积雪参数等地表参数信息的观测;(5)QuikSCAT卫星雷达散射计的测量数据曾被用来检测高纬度的冻融过程;(6)其他相关的运作卫星,像TOPEX-POSEIDON曾被用来反演地表水,Landsat和EO-1用作地表成像,SSM/I反演大气水汽和降水,AMSU和AIRS反演大气温度和水汽廓线;CloudSAT和CALIPSO,用来测量云的水平和垂直结构、降雪、气溶胶光学特性;(7)其他计划中的卫星项目,主要包括欧空局的SMOS项目和美国宇航局(NASA)的主、被动传感器相结合的SMAP计划。两个项目都拟利用L波段微波传感器对地表土壤水分和冻融状况进行有效监测。

3 微波遥感理论建模

前述星载微波传感器为地表参数的观测提供了大量、长时序的宝贵数据。而透过现象看本质,透过遥感观测数据反演获取准确的地表参数,还必须依赖精确的遥感物理模型和有效的遥感反演方法。遥感机理模型是遥感分析和反演的基石。只有建立精确的物理理论模型才能真正从物理机制上揭示地物的辐射传输规律,才能指导我们发展遥感定量反演方法;不仅如此,基于遥感机理模型发展形式简单、计算高效的快速辐射传输计算模型,可作为卫星数据同化系统中的观测算子,提高模式的预报精度。近30年来,研究人员针对随机粗糙表面、致密介质以及多种单散射体的散射、

消光特性及辐射传输机理开展了大量的研究。以下将对主、被动微波遥感建模理论进展做系统的介绍和评述。

3.1 随机粗糙面理论建模

对随机粗糙面的极化散射机制的建模一直是世界微波遥感领域的研究热点。早期的随机粗糙面散射模型,只能处理一些极端情况。最典型的是基尔霍夫模型(Kirchhoff Approximation, KA),只适用于频率比较高和粗糙面平均曲率半径较大的情形;而小扰动模型(Small Perturbation Model, SPM)只适用于低频和粗糙度不大的情形。近年发展起来的强调拓展适用范围的随机粗糙面散射模型越来越占有主导地位。代表性的模型有相位扰动理论(Phase Perturbation Theory, PPT)^[1]、全波方法(Full Wave Method, FWM)^[2]、小斜坡近似(Small-Slope Approximation, SSA)^[3]、积分方程模型(Integral Equation Model, IEM)^[4]及算子展开方法(Operator Expansion Method, OEM)^[5]等。

IEM模型在一些应用场景中显现了具有一定精度又易于计算的特点,而成为处理随机粗糙面电磁波极化散射的通用模型。该模型所做主要假设如下:菲涅尔反射系数对局域入射角的依赖性用实际入射角或镜面反射角来近似;在交叉极化中,用于计算基尔霍夫场的反射系数由平行极化和垂直极化反射系数之差的一半来近似;边缘衍射项被忽略;补充场系数由格林函数的Weyl谱表征中,对相位项中 z 分量对应的绝对值项舍弃,及对格林函数的梯度矢量中出现的 $\pm$ 项舍弃来进行近似。这些假设使得该模型在某些应用场合,尤其是在双站(bistatic)散射方面理论预测值与数值仿真或实验数据有不容忽视的误差^[6]。

针对上述假设,各国学者相继提出各种完善方法。Chieh等人^[7]提出了IEMM模型,考虑了在格林函数的Weyl谱表征中,对相位项中绝对值项的保留。这样,补充场系数 F_{qp} 对应的电磁场就分解为上行和下行场。但在该方法中,单次散射系数较IEM无变化,仅对多重散射进行了处理。德

国宇航局的学者Alvarez-Perez^[8]提出了二阶多重散射积分方程模型(Integral Equation Model for Second-Order Multiple Scattering, IEM2M),考虑了在格林函数的Weyl谱表征中,对相位项中绝对值项的保留以及对格林函数的梯度矢量中出现的 $\pm$ 项做了保留。同时根据随机粗糙面上方和下方介质的格林函数及其梯度对 F_{qp} 做了分拆。表面法向量的两个斜率分量在由分部积分确定时,也根据随机粗糙面上方和下方介质的格林函数Weyl谱表征加以区别。这种处理方法受到Fung等人的批评^[9],认为当随机粗糙面下方介质为损耗介质时会引起振荡。台湾学者Chen等人在文献[10]中,考虑了在格林函数的Weyl谱表征中,对相位项中绝对值项的保留以及对格林函数的梯度矢量中出现的 $\pm$ 项做了保留,但并不根据随机粗糙面上方和下方介质的格林函数及其梯度对 F_{qp} 进行分拆。这一分拆是在Chen等人^[11]在先进积分方程模型(Advanced Integral Equation Model, AIEM)中完成的。其中,表面法向量的两个斜率分量在由分部积分确定时,仅由随机粗糙面上方介质的格林函数Weyl谱表征来进行。后面的两种方法都用到了过渡函数来对菲涅尔反射系数进行修正。

虽然上述模型都显示了比最初IEM模型在随机粗糙面的电磁场极化散射预测方面的改善,特别是在双站散射方面,但仍存在不足,主要有3个方面:一是对补充分量的非相干功率的计算不够精确;二是由相位项中的绝对值符号引起的积分区间的改变,导致对误差函数未加考虑;三是在由分部积分来确定随机粗糙面上任意点处表面法向量的两个斜率分量时,是否应对涉及随机粗糙面下方介质的对应项亦做同样处理,若是,对有损介质引起的振荡问题如何解决没有足够的分析,更没有明确的结论。

扩展先进积分方程模型(Extended Advanced Integral Equation Model, EAIEM)^[12]可视作AIEM和IEM2M的扩展。这种扩展体现在两方面:一是



其对补充散射系数进行估值时引入的假设与以上模型相比数量较少且限制条件较为宽松;二是通过在交叉及补充散射系数中引入了误差函数而使整个结果更为严谨,与误差函数有关的项可视为修正项。EAIEM模型在这两方面的扩展都有特定意义。前者预示着即使误差函数相关项被忽略不计,该模型也会更精确更通用。后者表明如果粗糙面上下层都是无耗的话,误差函数引入的修正项在交叉散射系数中消失,但在补充散射系数中依然存在,因而在对比结果中显示了更高的精度。

3.2 积雪理论建模

积雪散射、辐射建模需考虑冰晶颗粒的微观结构的影响,以及粒子间电磁耦合,模型中的相位矩阵较为复杂。具有代表性的理论是华盛顿大学Tsang研究组1985年提出的致密介质传输理论模型(Dense Media Radiative Transfer, DMRT)^[13],在DMRT模型中,相干场采用准晶格近似QCA(Quasi-Crystalline Approximation)处理,非相干场采用相关阶梯近似^[14,15],微粒位置间的相关分布用PY(Percus-Yevick)近似等分布函数得到,此模型可用于研究主被动微波遥感的多径散射作用^[16]。DMRT模型与其他理论进行结合,如整合麦克斯韦三维数值仿真模型(Numerical Maxwell Model of Three-Dimensional Simulations, NMM3D)的DMRT理论模型,与实验数据有很好的吻合^[17]。

在DMRT模型中,由于积雪粒子被处理为离散的散射体,整个积雪层可视作基于离散体的随机介质。与此对应的模型则把积雪层处理为连续介质,其中由于积雪粒子位置的随机性,而把积雪层视作非均匀的随机介质,不同位置处介电常数的波动用特定的相关函数进行描述。若再考虑并矢格林函数的奇异性,则得出强波动理论模型(Strong Fluctuation Theory, SFT)^[18]。在自然界中积雪上下界面总是粗糙的,为改进对积雪上下粗糙表面的面散射与积雪层的体散射相互作用过程的建模,研究人员进一步提出了适用于粗糙界面的DMRT-AIEM-MD微波辐射模型,并发展了多频极

化参数化辐射模型^[19,20]。在此模型中,电磁波在积雪层的传播用DMRT进行刻画,并用双矩阵法(Matrix Doubling, MD)方法求解积雪的多次散射作用^[20],而积雪层上下粗糙表面的散射贡献用AIEM进行计算。该模型进而结合零阶辐射传输模型的形式,分析得到了参数化模型。所获得的参数化模型具有和理论模型相当的精度及与零阶模型相媲美的计算效率。基于类似的研究思路,研究人员针对主动微波积雪遥感,发展了考虑积雪垂直分层和多次散射作用的积雪散射理论模型及参数化模型^[21]。验证表明,该模型与测量数据吻合得很好,可用于积雪参数的反演算法和雷达信号的快速仿真。此外,还有如HUT模型、MEMLS模型等基于实验测量的简化经验积雪辐射模型。赫尔辛基工业大学HUT模型^[22]是基于对标量被动辐射传输方程的解算,其散射相函数被简化为只有前向散射(即为一个狄拉克函数),积雪的消光系数关于粒径的函数由实验基础上的经验公式描述^[23],从而推导出HUT积雪辐射模型。MEMLS模型^[24]为一种针对分层积雪的辐射模型,适用于5—100 GHz频率范围。MEMLS模型是基于对辐射传输方程的六流近似解,顾及了分层界面上的全反射、相干以及非相干反射等作用,其中的积雪散射系数与积雪密度、相关长度的关系由根据实验测量的经验公式得出^[25],吸收系数、有效介电常数以及分层界面的反射系数等由物理模型和实验测量冰介电特性得出。

作为积雪散射模型的最新发展,Ding Xu & Tsang(2010)提出一种基于Bi-continuous介质的积雪散射模型^[26]。该模型利用Berk(1991)对高斯随机场的level-cut实现对积雪介质的微结构模拟^[27],该模拟介质与真实积雪微结构有很大的相似性。积雪微结构模拟出来之后,利用DDA(离散偶极子近似)计算其散射场,通过多次计算将相干与非相干散射场分离,利用非相干散射场计算辐射传输方程所需的散射相位矩阵、散射系数等量,与辐射传输方程耦合实现主被动微波遥感的模拟计算。由

于Bi-continuous模型中的积雪几何结构为非规则结构,且与真实积雪微结构有最大相似性,顾及了由非规则结构产生的交叉极化信号,提高了对交叉极化散射信号模拟的准确性。

3.3 植被理论建模

植被散射建模涉及对植株间、植株上各组分间、植株与地表间一系列复杂电磁交互做出深刻的认识。近年来,众多学者为此进行了大量工作,建立了许多植被散射理论模型。一些早期的模型,往往将植被描述为介电常数随机起伏的连续随机介质,植被的平均散射系数从介电常数的起伏方差及相关函数中得到。这些模型的计算相对简单,但是这种连续随机介质模型的参数不能直接与植被物理参数相联系,因而其应用受到了很大限制。

鉴于此,许多学者又提出了基于植被物理参数的离散随机介质模型。该模型将植被看成由离散的散射体组成的离散随机介质,其散射特性通过对离散散射体的尺寸、取向、介电特性等随机量取平均得到。典型的模型如Lang等人^[28]提出的基于变形波恩近似的单层随机离散介质模型,以及Ulaby等人^[29]在辐射传输方程(Radiative Transfer Equation, RTE)方法的基础上所提出的密歇根微波散射模型(Michigan Microwave Canopy Scattering Model, MIMICS)。该模型将植被分成树冠层、树干层及地面层,最终结果是基于RTE的一阶解,其主要优点:(1)在地面散射及地面与植被层的相互作用散射项中考虑了地面粗糙度的影响;(2)考虑了多种树枝的尺寸及空间取向;(3)是全极化散射模型。随后,Karam等人^[30]对此模型进行了改进,主要考虑了植被层中的二次散射场,但其求解方法仍是基于强度叠加的RTE理论。上述这些模型在建模过程中忽视了植株结构中各组分之间的相互干涉,在低频的时候往往会给散射结果带来较大的影响。Sun and Ranson等人提出了三维森林雷达后向散射模型。与MIMICS不同,该模型建立在三维森林场景的基础上,考虑了森林的三维空间结构对雷达后向散射的影响^[31]。Ni等人进一步将ma-

trix-doubling方法引入到该模型中,提高了模型对交叉极化的预测能力^[32]。

鉴于上述非相干模型的缺陷,近年发展起来的强调植物结构和相干相位的植物散射模型越来越占有主导地位。总体来讲,相干散射模型考虑由植被结构带来的相干性,一般分两个层面:一是单株植株各组件之间的相干性,二是植株之间的相干性。在不考虑近场效应的相干模型中,植株组件之间以及植株之间的相干性主要由相对位置来决定。各组件一般通过较典型的几何体来建模,比如对单株的大豆植株,主茎、枝干和豆荚可以用有限长介质圆柱体来建模,对于叶片,可以近似为薄介质圆盘。植株内部各组分都具有不同的空间取向。相干模型能够更为精确地描述植被的散射机理,但其模拟精度受以下因素的制约:(1)对典型几何体如有限长介质圆柱体或薄介质椭圆盘的电磁极化散射的计算精度;(2)对地表随机粗糙面电磁散射的计算精度;(3)这些典型几何体对于真实场景的近似程度;(4)近场效应或组件间耦合的重要程度;(5)地面实况参数表征的准确程度,譬如叶片倾角的分布。上述精度制约因素在植被理论建模中需要进一步予以考虑。

4 展望

遥感机理模型是遥感反演地表参数的理论基础和方法依据。历经几十年的发展,已有模型可较好地描述从单散射体、随机粗糙表面到积雪、植被等典型地物的微波散射和辐射特性。随着遥感科学的不断深入,观测手段的日益丰富,微波机理模型也将进一步得到完善。特别是具有普适性的宽频理论模型,将为多源传感器自然地表现观测提供具有一致性和准确性的理论描述,从而提高定量遥感反演算法和数据同化观测算子的精度,服务于全球尺度关键地表参数的遥感观测及地球系统的模拟和分析。

参考文献

- 1 Shen J, Maradudin A A. Multiple scattering of waves from random rough surfaces. *Phys Rev B*, 1980, 22: 4234-4240.



- 2 Bahar E. Full wave solutions for the depolarization of the scattered radiation fields by rough surfaces of arbitrary slope. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1981, 29: 443-454.
- 3 Voronovich A G. Small-slope approximation in wave scattering by rough surfaces. *Soviet Physics - JETP*, 1985, 62: 65-70.
- 4 Fung A K, Li A Q, Chen K S. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1992, 30: 356-369.
- 5 Milder D M. An improved formalism for wave scattering from rough surfaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1991 (89): 529-541.
- 6 Licheri M, Floury N, Borgeaud M et al. On the scattering from natural surfaces: the IEM and the improved IEM. *Proc. IGARSS*, 2001: 2911-2913.
- 7 Hsieh C Y, Fung A K, Nesti G et al. A further study of the IEM surface scattering model. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1997, 35: 901-909.
- 8 Alvarez-Perez J L. An extension of the IEM/IEMM surface scattering model. *Waves in Random Media*, 2001, 11: 307-329.
- 9 Fung A K, Liu W Y, Chen K S. A comparison between IEM-based surface bistatic scattering models. *Proc. IGARSS*, 2002, 441-443.
- 10 Chen K S, Wu T D, Tsay M K et al. A note on the multiple scattering in an IEM model. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2000, 38: 249-256.
- 11 Chen K S, Wu T D, Tsang L et al. The emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with a comparison to a three-dimensional moment method simulations. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2003, 41: 90-101.
- 12 Du Y. A new bistatic model for electromagnetic scattering from randomly rough surfaces. *Waves in Random and Complex Media*, 2008, 18: 109-128.
- 13 Tsang L, Kong J A, Shin R T. *Theory of microwave remote sensing*. Wiley Interscience, 1985.
- 14 Tsang L, Kong J A, Ding K H. *Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications*. Wiley, 2000.
- 15 Tsang L, Chen C, Chang A T et al. Dense media radiative transfer theory based on quasicrystalline approximation with applications to passive microwave remote sensing of snow. *Radio Sci*, 2000, 35: 731-749.
- 16 Tsang L, Pan J, Liang D et al. Modeling active microwave remote sensing of snow using Dense Media Radiative Transfer (DMRT) theory with multiple-scattering effects. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2007, 45: 990-1004.
- 17 Xu X, Liang D, Tsang L et al. Active remote sensing of snow using NMM3D/DMRT and comparison with CLPX II airborne data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3: 689-697.
- 18 Stogryn A. A study of the microwave brightness temperature of snow from the point of view of strong fluctuation theory. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1986, 24: 220-231.
- 19 Shi J, Jiang L, Zhang L et al. A parameterized multifrequency-polarization surface emission model. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2005, 43: 2831-2841.
- 20 Jiang L, Shi J, Tjuatja S et al. A parameterized multiple-scattering model for microwave emission from dry snow. *Remote Sens Environ*, 2007, 111: 357-366.
- 21 Du J, Shi J, Rott H. Comparison between a multiple-scattering and multi-layer snow scattering model and its parameterized snow backscattering model. *Remote Sens Environ*, 2010, 114: 1089-1098.
- 22 Pulliainen J T, Grandell J, Hallikainen M T. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval. *Trans Geosci Remote Sensing*, 1999, 37: 1378-1390.
- 23 Hallikainen M T, Ulaby F T, Vandeventer T E. Extinction behavior of dry snow in the 18-to 90-GHz range. *Trans Geosci Remote Sensing*, 1987, 6: 737-745.

- 24 Wiesmann A, Mätzler C. Microwave Emission Model of Layered Snowpacks. *Remote Sens Environ*, 1999, 70: 307-316.
- 25 Wiesmann A, Mätzler C, Weise T. Radiometric and structural measurements of snow samples. *Radio Sci*, 1998, 33:273-289.
- 26 Ding K H, Xu X, Tsang L. Electromagnetic scattering by bicontinuous random microstructures with discrete permittivities. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2010, 48: 3139-3151.
- 27 Berk N F. Scattering properties of the leveled-wave model of random morphologies. *Phys Rev A*, 1991, 44: 50-69.
- 28 Lang R H. Electromagnetic backscattering from a sparse distribution of lossy dielectric scatterers. *Radio Sci*, 1981, 16:15-30.
- 29 Ulaby F T, Elachi C. *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*. Artech House, 1980.
- 30 Karam M A, Fung A K, Lang R H et al. A microwave scattering model for layered vegetation. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1992, 30:767-784.
- 31 Sun G, Ranson K J. A three-dimensional radar backscatter model of forest canopies. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1995, 33: 372-382.
- 32 Ni W J, Guo Z F, Sun G Q. Improvement of a 3D radar backscattering model using matrix-doubling method. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2010, 53: 1029-1035.

施建成 中科院遥感与数字地球所研究员, 博士生导师, 遥感科学国家重点实验室主任。1955 年出生。兼任《IEEE 地球科学与遥感》杂志副主编; IGARSS、PIERS、SPIE 国际遥感研讨会分会主席;《国际地球科学与遥感》等权威刊物评审专家。“千人计划”特聘专家, 长期从事遥感与水循环的基础理论研究。主持过近 20 项 NASA、ESA、JAXA 研究项目。发表论文 240 余篇, 其中 *SCI* 期刊论文 80 余篇。E-mail: jshi@irsa.ac.cn

The Progresses of the Theoretical Models for Microwave Remote Sensing

Shi Jiancheng

(The Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract In the context of the global environment changes, highly accurate observations on the earth surface are urgently needed for the studies of the water, carbon, and energy cycles at the regional and global scales. As the rapid development of remote sensing techniques, remote sensing has achieved the capacity of monitoring many factors of the Earth land surface. Especially for the space-borne microwave remote sensing systems, they have been widely used in the quantitative monitoring of global snow, soil moisture, and vegetation parameters with their all-weather, all-time observation capabilities and their sensitivities to the characteristics of land surface factors. Accurate microwave physical models are essential for the understanding of the remote sensing observations, the development of the inversion algorithm and the improvement of the observation operator in the data assimilation systems. Based on the electromagnetic theories and microwave radiative transfer equations, researchers have achieved great successes in the microwave remote sensing fields in the recent thirty years and established theoretical scattering and emission models for a wide range of observation targets and land features, such as the single scatterers, rough surfaces, snow, and vegetation. This article systematically reviews the progresses on the microwave theoretical modelling. As the further enrichment of remote sensing datasets and the development of remote sensing theories and inversion techniques, remote

(转至 144 页)