



评述

雪水当量主被动微波遥感研究进展

施建成^{①*}, 熊川^①, 蒋玲梅^②^① 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 全球变化研究协同创新中心, 北京 100101;^② 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 全球变化研究协同创新中心, 北京 100875

* E-mail: shijc@radi.ac.cn

收稿日期: 2015-08-21; 接受日期: 2015-11-09; 网络版发表日期: 2016-03-24

中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA04061200)和国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2015CB953701)资助

摘要 全球尺度大范围准确定量雪水当量信息对于气象、水文、水循环和全球变化等研究都具有非常重要的意义, 对融雪径流预报、水资源管理以及洪水控制方面也具有重要作用。陆面过程模型和积雪过程模型等可以一定程度上模拟雪水当量分布, 但是在时间和空间上存在很大的不确定性, 还远未达到有效应用的需求, 因此现今大范围的雪水当量获取主要依靠遥感手段。自 1978 年雨云-7 卫星发射后, 雪水当量微波遥感经历了 30 多年的发展, 相关学者在雪水当量遥感方面做了大量研究工作, 包括电磁散射/辐射建模、地面和机载实验、反演算法研究等方面, 为未来的全球高分辨率雪水当量遥感观测计划奠定了很好的基础。本文将从电磁散射/辐射建模和雪水当量反演等方面总结近年来相关研究的现状和进展。

关键词 积雪, 微波遥感, 模型, 反演, 综述

1 引言

雪水当量(积雪深度与密度之积)是地球系统中一个非常重要的变量, 全面和准确掌握雪水当量对于气象、水文、水资源、水循环和全球变化研究都具有非常重要的意义。欧亚大陆和北美洲地区在冬季至少有 80% 的范围被积雪所覆盖, 北半球 1 月份平均积雪面积大约有 4650 万平方公里, 而在 8 月份也有 380 万平方公里(Robinson 等, 1993)。积雪信息可作为水文模式的初始输入参数, 也可用于气候模式的验证; 积雪也是众多河流的主要补给和地下水的重要

补充, 积雪面积、雪面温度、雪深以及雪水当量的监测对于融雪径流预报、水资源管理以及洪水控制方面都具有重要的作用(Clissold 等, 2008)。

全球大部分积雪位于气候、交通条件恶劣的两极和高山地区, 传统观测难以企及。陆面过程模型和积雪过程模型等可以一定程度上利用驱动数据模拟积雪水当量的发展过程。但是模型模拟雪水当量在时间和空间上存在很大的不确定性, 还远未达到有效应用的要求。例如, 在 Slater 等(2001)中对不同陆面过程模型模拟的雪水当量与实测值进行了比较, 发现不同模型模拟的雪水当量存在很大的不确定性。因

中文引用格式: 施建成, 熊川, 蒋玲梅. 2016. 雪水当量主被动微波遥感研究进展. 中国科学: 地球科学, 46: 529–543, doi: 10.1360/N072015-00031

英文引用格式: Shi J C, Xiong C, Jiang L M. 2016. Review of snow water equivalent microwave remote sensing. Science China Earth Sciences, 59: 731–745, doi: 10.1007/s11430-015-5225-0

此,为了获取全球高分辨率的雪水当量信息,还需要在遥感观测手段方面做进一步提升。

遥感作为可用于大尺度监测地球表面的新手段,克服了传统积雪参数点测量的不足,把传统的“点”测量方法获取得有限代表性的信息扩展为“面”信息,这使我们真正地对地表参数进行定量分析成为可能。尤其对于积雪参数,其高时间和空间动态性使得只有通过遥感手段才能获得精确的空间连续、时间连续的大范围动态地表参数,并为全球或区域尺度气候模式与水循环提供有效定量积雪参数。NOAA AVHRR传感器可提供每天的积雪分布数据,但其空间分辨率很低(1km左右)。随着更多可见光近红外传感器卫星(如MODIS, Landsat等)的发射,基于卫星的积雪遥感监测能力得到了发展,尤其是对于积雪覆盖面积的估算。

由于微波信号对地面积雪层的穿透能力,使得微波遥感可以用于积雪深度信息的监测。此外,微波传感器在大气中的高透过率,克服了可见光近红外遥感的大气效应以及云对积雪的混淆作用。被动微波遥感中,当地表出现积雪时,土壤表面和积雪内部的微波发射能量会被散射和衰减,因此被动微波传感器接收到的亮度温度包含积雪信息,如积雪密度、温度、深度、粒径以及粒径分布等(Armstrong等, 1993)。被动微波遥感用于积雪监测始于1978年搭载多通道扫描微波辐射计(SMMR)的雨林-7卫星发射,此后经历了SSM/I和AMSR-E等传感器。但是由于星载辐射计的低空间分辨率,只能在大尺度下均匀地表状况下应用,对于山区等地形起伏地区,需要利用更高空间分辨率的主动微波遥感传感器进行积雪监测。通常利用C波段SAR进行湿雪覆盖制图,而利用更高频率的主动微波遥感进行雪水当量的反演。

通过光学遥感手段,积雪覆盖面积可以以较高精度获取,但是对于雪水当量,尽管其对于科学、经济和社会发展具有十分重要的意义,高时空分辨率的准确雪水当量信息现今还缺乏有效手段获取。近年来,积雪遥感领域学者在雪水当量的微波遥感研究方面做了大量研究工作,包括电磁散射/辐射建模、地面和机载实验、反演算法研究等方面,为后续的全球高分辨率雪水当量遥感观测计划奠定了很好的基础,本文将从电磁散射/辐射建模和雪水当量反演等方面总结近年来相关研究的现状和进展。

2 微波积雪模型发展

干雪是一种由冰和空气组成的混合介质,积雪下垫面通常是粗糙土壤表面。积雪微波遥感前向模型需要准确地模拟积雪覆盖地表场景的微波散射和辐射特性。通过30多年的发展,积雪微波散射和辐射模型已经形成了基于多种理论基础的不同模型种类。简单地,这些模型可以分为半经验模型、解析理论模型和数值计算模型3类。半经验模型基于有限实测样本数据得出,其适用性存在局限性,但是简单、稳定、实用。解析理论模型直接从麦克斯韦方程导出,有坚实的物理理论基础,且输入参数有明确的物理意义,其缺陷为对积雪几何结构进行了简化。数值计算模型直接通过对积雪结构的数值电磁计算得到积雪的微波散射特性,可自由控制介质的几何结构,且舍去了解析理论模型中的一些基本假设,直接从麦克斯韦方程计算散射特性。从物理上说,数值计算模型理论最为完备、模拟最精确,但是需要大量的计算资源。早期计算机能力有限,因此追求简单解析模型,而现今计算机飞速发展,因此计算能力问题并非重要问题。

通常,基于辐射传输理论的积雪的微波散射/辐射模型包含两个方面,第一为计算积雪介质的微波散射/辐射特性(如有效介电常数、消光系数、散射系数和散射相位矩阵等),用于描述微波在积雪介质中的传播。这些特性由积雪本身的几何特性和介电特性决定。第二为模拟微波在积雪-土壤系统内传播,这需要考虑积雪-土壤系统内界面的反射、透射,以及土壤粗糙面等的影响,模型中通常利用辐射传输方程进行描述。

2.1 半经验模型

HUT模型(Pullainen等, 1999)是一种基于辐射传输的零阶半经验模型,其本质是基于对标量被动辐射传输方程的解算,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(Hallikainen等, 1987)上的半经验公式描述,即为

$$\kappa_e = 0.0018 f^{2.8} d_0^{2.0}, \quad (1)$$

式中, κ_e 为dB单位消光系数, f 为频率(GHz), d_0 为粒子直径(mm)。吸收系数由干雪的介电常数计算得出,

其中积雪介电常数实部由Mätzler(1987)得出, 虚部由Polder-van Santen混合介电模型(Hallikainen等, 1986)得到. HUT模型最大的问题为对积雪散射相位函数的简化, 其假设散射能量的绝大部分集中于前向, 此外, 其消光系数与频率和粒径的关系固定. Roy等(2004)在Rayleigh散射基础上对大粒径的消光系数公式做了修正.

MEMLS模型(Wiesmann和Mätzler, 1999)为一种针对分层积雪的辐射模型, 适用于5~100GHz频率范围. MEMLS模型基于对辐射传输方程的六流近似解, 考虑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, 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介电特性得出. Mätzler等(1999)利用improved Born approximation将MEMLS模型扩展到了较大粒子尺寸情况下.

2.2 理论模型

理论模型为直接从解析公式得到积雪的散射特性. 早期理论模型中, 积雪层的散射建模是基于传统矢量辐射传输方程的. 最初, 模型将积雪层描述为无相干散射作用的圆球形或椭球形粒子, 单个粒子的散射场利用球形或椭球瑞利散射理论解算, 粒子之间的散射相互独立, 总散射强度等于各个粒子散射强度的总和. 这种理论即为独立散射理论, 其直接忽略了积雪粒子之间的集合散射作用. 对于积雪介质, 在微波波段, 单个波长尺度内存在多个散射粒子, 且粒子介电常数与背景介电常数显著不同, 这时独立散射理论模型和传统辐射传输理论是不恰当的. 为了考虑积雪介质的致密散射特性, Tsang等(1985)提出了致密介质传输理论模型(Dense Media Radiative Transfer, DMRT). 致密散射理论及其在微波遥感前向模型中的应用在Tsang等(2001)的专著中有详细论述. 传统矢量辐射传输方程是由能量守恒推导出的现象性方程, 考虑强度的叠加, 而不考虑散射场的相干性. 粒子散射独立的假定在密集分布粒子的辐射传输中是不成立的. 密集分布的粒子的散射相干性使得以往矢量辐射传输方程中独立散射的假定会过高估计了散射. 从波的解析理论来建立矢量辐射传输方程是矢量辐射传输方程的基础性问题. 在波的

解析理论中, 描述场的一阶矩和二阶矩的分别是Dyson方程和Bethe-Salpeter方程, 它们是严格的方程, 也满足能量守恒, 但这两个方程只能近似求解, 因此对这些方程所做的近似有可能导致能量守恒不再成立. Tsang等证明, 当在相干散射场的Dyson方程中采用准晶近似相干位(QCA-CP)(Lax, 1952; Tsang和Kong, 1980), 且在非相干散射场的Bethe-Salpeter方程中采用修正梯形近似时, 能量守恒得到满足. 所谓相关梯形近似(correlated ladder approximation)就是在普通梯形近似中引入对分布函数(Pair Distribution Function), 以描述粒子位置之间的相关性. 从这一理论出发, 他们证明了致密介质辐射传输方程(DMRT)具有与传统矢量辐射传输方程相同的形式, 但它包括了有效传播常数 $K=K'+K''j$. 因此, 通过修正有效传播常数, 从而实现了对消光系数、单次散射反照率和散射相矩阵的致密化修正.

Tsang等(2000)发展了在无小粒子假设(波数与粒子直径乘积远小于1)情况下的QCA-DMRT模型. 这种扩展对于高频(>10GHz)情况下的积雪遥感十分必要, 因为在此频段, 积雪粒子尺寸不再满足小粒子假设. 此外, 黏性和非黏性粒子情况下的散射特征也进行了研究. 结果表明, 黏性粒子情况下的积雪散射频率特性更接近自然积雪.

考虑到积雪中冰粒子粒径的分布, Tsang等(2003)将积雪建模为具有粒径分布的致密粒子. 此模型中, QCA理论被用来计算积雪介质的吸收、散射和辐射. 多粒径的Percus-Yevick近似被用来表征粒子之间几何位置的相关性. Tan等(2004, 2005)将此模型扩展为黏性粒子介质. 此外, 本模型中土壤散射用数值电磁计算方法计算(NMM3D), DMRT方程的边界条件用随机粗糙面的双站散射系数描述.

QCA模型的模拟结果与早期传统的独立散射模型结果有以下几个显著不同: (1) 消光系数随着占空比增大而上升后下降, 而非持续升高; (2) 散射系数与频率的关系弱于瑞利散射理论所预测的四次方; (3) 散射相位矩阵的余弦平均为非零, 且散射相位矩阵中前向散射大于后向散射, 而非球形Mie理论及瑞利散射理论所预测的前向与后向散射相等. Tsang等(2007)利用QCA-DMRT模型模拟积雪覆盖地表的主动微波观测. 此模型中, DMRT方程利用特征值方法解算, 土壤表面边界条件被假设为平面.

Du等(2010)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(Shi等, 2005; Jiang等, 2007). 在此模型中,电磁波在积雪层的传播用DMRT进行模拟,并用双矩阵法(Matrix Doubling, MD)方法求解积雪的多次散射作用(Jiang等, 2007),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当的计算效率. 基于类似的研究思路,该研究组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(Du等, 2010). 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微波遥感观测的快速模拟.

上述基于致密辐射传输理论(DMRT)的模型中,积雪粒子被处理为离散的散射体,整个积雪层可视为基于离散体的随机介质. 与此对应的模型则为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起伏用特定的相关函数进行描述,方差描述了起伏的幅度,而相关长度描述了起伏的尺度. 从波的解析理论出发,波的强起伏理论在广义的Born近似下, Tsang等(1981)和Jin等(1984)计算了单次和两次散射场的二阶矩. 在强起伏理论中,考虑了平均并矢格林函数的奇异性,引进了强起伏的统计相关特征,并计算了波的有效传播常数. 但是波的解析理论难以实现多次散射强度的数值计算. 金亚秋(1990)利用波的强起伏理论来推导了矢量辐射传输方程的相矩阵和散射系数,并重新确定描述各向异性的强起伏随机介质中并矢格林函数源点项Delta函数的系数以及待定的有效介电常数零级近似的介电常数. 由此获得的矢量辐射传输方程适用于强起伏(也包括弱起伏)连续随机介质中辐射强度的多次散射、传输和热辐射的计算. 在Tsang等(1982)中,强起伏理论被扩展为三种介质混合物,这种理论被用来模拟湿雪的散射和辐射特性.

2.3 数值计算模型

第三类模型即为数值计算模型,该类模型中,积雪介质的结构首先用计算机模拟的方法模拟,然后

利用数值电磁计算方法计算积雪介质的散射特性. 在Tsang等(2013)中对此类模型有很好的总结. 在Chen等(2003)中,积雪粒子被模拟为随机分布的球形冰粒子,粒子位置由deposition and bonding蒙特卡罗算法产生,由于本算法中粒子为球形,可以采用球谐展开表示Foldy-Lax多次散射方程,通过解算大型线性方程组方法解算吸收系数、散射系数和散射相位矩阵等. 该研究中,生成了黏性粒子和非黏性粒子进行散射计算,计算结果表明,黏性粒子配置下的频率依赖系数(Frequency dependence)小于非黏性粒子配置情况和独立散射理论所预测的频率系数,与实验结果更为吻合. Ding等(2010)提出一种基于Bicontinuous介质的积雪散射模型. 该模型利用对高斯随机场的阈值切割实现对积雪介质的微结构模拟(Berk等, 1991),该模拟介质与真实积雪微结构有很大的相似性,避免了很多模型中对理想粒子形状的假设. 随后利用DDA(离散偶极子近似)方法计算计算机模拟结构的散射场,通过多次DDA计算将相干与非相干散射场分离,随后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. Xu等(2012)利用bicontinuous模型结合辐射传输理论模拟了积雪覆盖地表在X和Ku波段的后向散射,并用TerraSAR-X和机载Ku波段数据进行了验证. 由于在数值电磁计算方法中直接进行麦克斯韦方程解算,散射相位矩阵中交叉极化元素为非零,这点与QCA系列模型不同. 在bicontinuous模型中,介质的非对称性也会产生交叉极化信号,且通过数值计算包含了散射粒子之间的集簇散射作用,因此,配合辐射传输方程的多次散射解, bicontinuous模型在预测积雪介质的交叉极化散射方面能力更强. Bicontinuous模型的粒径输入参数包括平均粒径参数 ζ 和粒径分布参数 b ,这两个参数很难通过测量获得. Xiong等(2012)利用实验测量积雪切片图像相关函数与bicontinuous介质相关函数匹配的方法获得Bicontinuous模型的平均粒径参数 ζ 和粒径分布参数 b . Xu等(2014)通过具有球形粒子粒径分布的QCA模型和bicontinuous模型模拟的散射系数匹配,从而确定Bicontinuous模型的粒径分布参数 b .

在以往的模型发展历程中,无论是体散射模型还是粗糙面散射模型,研究者往往利用各种理论和

方法对散射问题进行一定简化,以追求解析解和计算的高效性.近来计算机硬件快速发展,我们可以较少地去考虑计算资源问题.利用大型并行计算机,大规模电磁散射数值计算问题可以在较短时间内完成.因此,对散射问题进行简化和假设较少的数值计算模型是今后发展的趋势.

在自然界中,由于陆续的降雪过程,地面积雪会形成较明显的水平分层特性.由于在自然形成条件下的不同,每层积雪的几何特性会不同,如密度、粒径等,此外,每层积雪的温度等特性也不相同.多层积雪的散射和辐射特性建模可通过多层辐射传输方程实现,辐射传输方程的多层边界用面散射边界条件描述.如Liang等(2007, 2008)利用多层辐射传输理论模拟了多层积雪的微波后向散射和亮度温度.

由于辐射传输理论只由Feynman diagrams的ladder terms导出,其多次散射解未考虑后向散射增强效应.后向散射增强效应只在主动观测中存在,而对被动微波观测基本无影响.为了考虑在积雪覆盖地表雷达观测中的后向散射增强效应,特别对于高频情况,Tan等(2015)利用bicontinuous模型,在辐射传输多次散射解的基础上增加了对后向散射增强效应的考虑,在实测数据验证中,用相同的输入参数同时获得了散射计和辐射计观测的准确模拟.

以上介绍的半经验模型、解析理论模型和数值计算模型三类积雪微波散射和辐射模型在实际应用中均发挥了重要作用.半经验模型较为简洁,且部分参数通过实验测量结果得出,因此模型模拟较为稳定、实用,在许多雪水当量反演中实现了成功的应用.解析理论模型以致密介质散射理论和强起伏理论等为代表,在模型建立过程中做了较多假设,而数值计算模型中的假设较少,与实际问题的更为接近,但是需要大量的计算.今后随着计算机能力的继续发展,数值计算模型的计算问题可以更好地解决,因此基于大规模数值电磁计算的积雪微波散射/辐射模型为今后发展的趋势.

3 反演方法

微波遥感用于雪水当量反演主要由两种方式,包括被动微波遥感雪水当量和主动微波遥感雪水当量.下面将分别进行叙述.

3.1 被动微波遥感雪水当量反演

积雪覆盖地表微波辐射主要包括积雪自身的辐射和其下覆地表的辐射(Chang等, 1987).积雪的电磁辐射特性随积雪的容积(积雪深度)、结构和液态水含量的变化而变化(Stiles等, 1981),这是被动微波遥感探测积雪信息的物理基础.理论和实验研究均表明积雪的微波亮温随雪深增加而表现出减小的趋势(Armstrong等, 1993).此外,雪粒的大小和液态水含量也对微波亮温有较大的影响.在微波高频波段,由于雪颗粒的体散射起着重要作用,积雪辐射对雪水当量和雪颗粒大小很敏感(Hofer和Mätzler, 1980; Rott和Sturm, 1991).而在微波低频波段,干雪的辐射主要受积雪下面地表特性的影响.当积雪开始融化时,由于冰和液态水在微波波段的介电常数差异很大,而观测信号主要来自近雪层表面,因而雪层发射信号将显著增强(Hallikainen, 1987).干雪在高频波段表现为很强的散射体,但其吸收特性却很弱.因此在高频波段,在积雪的衰减作用(散射与吸收系数之和)中,散射占主导作用(Ulaby和Stiles, 1980),积雪的散射作用大大减弱了积雪的直接辐射.这种随频率增加散射作用增强,从而减弱积雪辐射的特性,可用来探测地表积雪的存在和积雪深度.

自1978年美国雨云气象卫星携带的SMMR发射上天至今,已有多个传感器包括SSM/I, AMSR-E, AMSR2和FY3/MWRI等星载辐射计对陆表积雪进行探测.国内外学者对被动微波遥感积雪机理和算法进行了大量的研究,主要包括理论模型(Mätzler, 1987; Tsang和Kong, 1982; Jiang等, 2007)、地面测量(Wiesmann等, 1998; Brogioni等, 2008)、机载实验(Kurvonen和Hallikainen, 1997; Kruopis等, 1999; Stankov等, 2008; Jiang等, 2011; Cline等, 2009; Lemmetyinen等, 2009; Li等, 2009, 2013)与星载实验(Chang等, 1987; Rango等, 1989; Goodison和Walker, 1994; Chang等, 1997; Foster等, 1997; Pulliainen等, 1999; Pulliainen, 2006).中国从20世纪90年代开始开展被动微波遥感积雪研究(曹梅盛等, 1993; 李培基, 1999).结合中国区域地面台站观测的雪深数据和星载SSM/I, AMSR-E等数据,发展了适用于中国区域的雪深反演算法(车涛和李新, 2004; Che等, 2008; 孙之文, 2006; 蒋玲梅等, 2014).目前用于反演雪深(雪水当量)的算法主要可以归纳为以下几种:半经验算

法、迭代算法、基于物理模型的统计反演算法、神经网络算法和同化算法。利用被动微波遥感反演雪深(雪水当量)的主要算法总结如下:

(1) 雪水当量静态半经验反演算法。雪水当量静态反演算法是目前国际上应用较为广泛的积雪反演算法之一。该方法为线性亮温梯度算法,把积雪深度(雪水当量)与亮温梯度之间的关系用线性关系表示。已有学者(Rango等, 1979; Künzi等, 1982; Chang等1987; Aschbacher, 1989; Goodson等, 1994)利用卫星数据发展的积雪深度和雪水当量半经验或经验算法。其基本形式可表达为

$$SWE = A + B \cdot \Delta T_B, \quad (2)$$

式中, SWE 为雪水当量, A 和 B 是雪水当量与亮温差之间经验关系式的截距(mm)和斜率(mm/K)。由于所采用实验数据的不同,不同的研究者得到不同的经验参数 A 和 B 。 ΔT_B 是一个高频(37或85GHz)和低频(18或19GHz)的亮温差,可以是水平或垂直极化。

植被层的存在增加了卫星数据反演积雪深度(或雪水当量)的难度。由于植被削弱了植被下雪层的微波辐射,而冠层自身的发射增加了卫星传感器接收信号值。因此,如果不考虑植被影响,反演算法将会低估森林地区的雪水当量。为改进森林地区雪水当量的反演精度, Foster等(1997)和Chang等(1997)引入森林覆盖度参数来提高雪深(或雪水当量)的反演精度。Foster(1997)算法为森林覆盖地区提供了简单的修订方案,在北美将雪水当量反演误差从50%减小到15%。该算法忽略了不同地区森林物理温度、森林类型和冠层疏密等的差异,简单假设森林在18和37 GHz水平极化对亮温的贡献相等。当冠层变密时,微波将无法穿透森林,辐射特征将由森林主导,而来自林下雪盖的辐射信息越来越少,误差也会增大。此外,在此基础上Foster等(2005)引入两个随时间变化的动态参数分别表示森林覆盖率和雪粒径的影响,并且强调了先验知识:雪的分类数据库和土地覆盖类型数据库的作用,并建立新的雪水当量反演方法。Derksen等(2003, 2005)发展了考虑裸地、针叶林、落叶林和稀疏森林等4种不同地表类型敏感的雪深反演算法,并发现森林覆盖度不能作为加拿大的北方针叶林/苔原交错带地区雪深低估的系统校正因子,若要提高算法精度则需要结合森林蓄积量和郁闭度等

影响微波辐射的因素。

除19和37GHz外,其他频率微波亮温以及微波数据以外的地表参量也被用于雪水当量静态算法中。由于10.7GHz穿透雪盖的能力比18.7GHz强, Derksen (2008)在研究加拿大北方针叶林下的深雪时,利用2004~2007年期间的地面数据回归了不同频率组合亮温差与雪水当量的关系,有明显深霜层的深雪在18.7 GHz同样具有体散射效应,亮温随雪深的增加而降低。此外,针对之前反演效果不佳的加拿大苔原区, Derksen等(2010)采用2002/03~2006/07的冬季数据重新建立了只依靠37V极化亮温的反演方法。

在中国区域的雪深和雪水当量反演算法的研究中,曹梅盛等(1993, 1994)将中国西部分为5个地貌单元(高原、高山、低山、丘陵和盆地),利用可见光积雪数据(OLS)对SMMR反演的积雪深度数据进行了订正。Che等(2008)以Chang算法为基础,结合气象站点观测数据,分别修正了中国区域的SMMR(1980年和1981年气象站点观测雪深数据)、SMM/I(2003年气象站雪深观测数据)雪深算法系数,得到SMMR和SMM/I的雪深反演回归算法。

Sun(2007)和Chang等(2009)引入积雪覆盖度来发展中国地区的雪深半经验算法。其中, Sun(2007)将全国分为三大积雪区(新疆; 东北、内蒙古和华北平原地区; 青藏高原),根据各积雪区不同的积雪特点,结合地面观测雪深数据,分别建立各区的雪深反演算法。此外,在新疆地区,引入MODIS8天合成积雪覆盖度产品进行计算,结果表明,雪深统计回归算法精度有所提高。Chang等(2009)利用MODIS地表覆盖产品(MOD12Q1 V004)把中国地区下垫面地表分为4类:草地、裸土(包含农田)、森林、灌木,除了使用18.7与36.5GHz的亮温差外,同时引入了89GHz与18.7、36.5GHz的频率差来反映浅雪层信息,利用2002~2005年的地面观测数据,分别建立了四种主要下垫面的雪深回归反演算法,提高了中国区域的算法精度,但该算法适合于3cm以上的雪深反演。由于采用MODIS 8天合成的雪盖产品(MYD10A2),该算法的时效性较差,不能直接用于实时积雪业务监测。为了摒弃积雪覆盖度在雪深反演中的作用,蒋玲梅等(2014)利用2002~2009年的AMSR-E数据和气象台站的常规观测资料,建立考虑不同地表覆盖类型对雪深反演影响的算法。目前该算法已作为中国风云卫星三号

微波成像仪的雪深业务化监测算法.

(2) 雪水当量动态反演算法. Kelly等(2003)发展的动态雪水当量反演算法使用了半经验模型来描述积雪颗粒大小、密度随时间变化过程,通过致密介质辐射传输理论模型(DMRT)模拟亮温差与雪深的关系,设定雪温可得到二次多项式回归方程.当雪深在50~100cm,37GHz数据会出现饱和,为此设置亮温差阈值来确保反演在DMRT模型范围内.经1992~1995年及2000~2001年全球WTO-GTS站点验证结果表明,该算法对Chang静态算法的改进有限,虽然误差均值更接近零,但比Chang静态算法大,效果不如Foster等(2005)算法.Josberger等(2002)发展了温度梯度指数TGI(temperature gradient index)动态算法,该算法解释了积雪内部特性的时间和空间变化,尤其是颗粒大小的变化.作者通过美国北部大平原的地面观测发现,当雪深达到最大值后开始下降时,亮温差仍继续增长,这与静态算法原理不符,原因可能是积雪粒径的变化.亮温梯度SG(the spectral gradient)与TGI之间在某些站点有很好的线性关系,根据该关系可反演出雪深.虽然TGI算法引入了积雪变化的物理过程,但该算法仅限于美国阿拉斯加、西伯利亚和加拿大等地区极冷地区积雪区,且由于每一年积雪变质过程不同,算法中的经验系数会随年际变化而不稳定.

Grippa等(2004)则结合积雪季节积雪颗粒变化特征把上述的静态与动态算法进行结合来估算雪水当量.该算法应用到长时间的气候变化尺度(月)结果相对较好,但在某些区域仍不适合,如针叶林地区.

(3) 迭代反演算法. 该算法较为典型的应用是使用HUT(The Helsinki University of Technology)模型(Pullianinen等, 1999)作为正向迭代模型. Pullianinen等(1999)使用HUT模型通过有条件约束的最小二乘法迭代法反演雪水当量. HUT模型模拟得到的亮温与积雪的试验数据和机载的SSM/I观测的亮温数据有很好的-致性,基于HUT模型的反演算法的反演精度比传统的静态算法精度高. 但该算法也存在一些不足,一些大气参数、植被冠层参数、土壤的干燥度,要通过经验半经验的公式求得,故这些参数有很强的地域性.

(4) 基于物理模型的雪水当量统计反演算法. Jiang等(2007)使用多次散射的双矩阵方法(Matrix

Doubling approach)求解雪层矢量辐射传输方程. 在该模型中,使用Mie散射假设的致密介质模型描述雪层消光和发射特性,并用AIEM模型处理地表发射及作为矢量辐射传输模型的边界条件. 由于考虑多次散射的双矩阵模型方程形式复杂,其为辐射传输方程的数值解,不能直接应用于反演. 因此, Jiang等(2007)通过对包含多次散射作用的模型分析与零阶模型比较,发展了包括多次散射的参数化模型. 在该参数化模型基础上, Jiang等(2011)发展了基于模型的雪水当量统计反演算法. 该算法假设地表与积雪温度均已知,借助不同频率不同极化下的地表辐射率之间存在的相关性以消除卫星观测总信号中地表的影响,进而提取出积雪信号,并反演雪水当量. 利用辐射模拟数据库和美国寒区试验在科罗拉多开展的CLPX2003试验的机载飞行数据进行了验证,同时将其与AMSR-E的基本算法(Chang等, 1997)与实测数据进行比较. 结果表明,这两种方法均高估地面的雪水当量测量值. 但是,新发展的物理统计反演算法精度要优于国际现有AMSR-E算法精度. 但该算法目前只适用于植被稀少地区.

(5) 神经网络算法. 神经网络技术已被广泛用于地表参数反演. Davis等(1993)利用神经网络训练致密介质辐射传输理论模型(DMRT)来反演积雪参数,作者使用5个测量值来反演4个参数,即平均颗粒大小、积雪密度、积雪温度和积雪深度. 此外, Tedesco等(2004)采用神经网络技术反演雪水当量和积雪深度. Santi等(2012)采用神经网络算法同时反演土壤水分和雪深,并利用地面观测数据对算法进行校正. 但神经网络反演算法存在的问题: 首先神经网络的输入端必须是相关性很小的独立参数,否则训练的结果会有很大误差;其次,神经网络训练算法和神经网络的结构也是网络训练成功与否的关键,这些都限制了神经网络反演算法的应用.

(6) 同化算法(Data Assimilation methods). Liston等(1999)和 Rodell等(2004)最早采用直接插入(direct-insertion)的方法更新雪深,即直接用观测替代模型估计,将积雪观测在耦合的陆面-大气模拟中直接代入模拟结果来改进雪水当量的模拟. 在有些情况下可以提高雪水当量的模拟(Liston等, 1999; Rodell等, 2004),但模拟的水量(streamflow)结果可能会变差(Slater和Clark, 2006). Brasnett(1999)用最优插值将

全球雪深观测同化到一个简单的雪累积与消融模型, 将观测和模型的误差当成先验, 当有新的观测时, 误差仍然为常数, 因此也会带来一定误差. Sun等(2004)将扩展Kalman滤波应用到基于流域陆面模型中, 但仍处于积雪数据同化预研究阶段(Foster等, 2005; Tedesco等, 2010; Slater和Clark, 2006). Andreadis等(2006)使用1999~2003年冬季的MODIS雪盖产品, 运用集合卡尔曼滤波将遥感的积雪观测耦合到VIC (Variable Infiltration Capacity)中尺度水文模型中, 根据简单的积雪消融模型, 得到雪水当量-雪盖的反演. 结果表明, 不使用和使用MODIS积雪产品进行同化, 估算积雪覆盖度的绝对误差分别是0.128和0.106. Andreadis等(2006)使用AMSR-E的雪水当量产品开展同化研究. 研究表明, 由于AMSR-E无法反演很深的积雪厚度或雪水当量, 因此, 当雪深值较大时, 引入的遥感的雪水当量反而会降低模式模拟精度.

Durand等(2006)将SSM/I和AMSR-E被动微波亮温数据以及宽波段albedo同化到简化的简单生物圈模型(Simplified Simple Biosphere, SSiB3)中内置的简化积雪-大气-土壤模型(Simple Snow-Atmosphere-Soil, SASTI)模型, 以此检验估算雪水当量的可行性, 有效提高了雪水当量估算精度. Durand等(2006)发现, 在所有SSM/I和AMSR-E 6.925~89GHz的所有微波频段中, 10.65GHz能够在同化技术中提供最多的估计雪水当量的信息. Pulliainen(2006)在HUT模型基础上, 采用同化微波观测亮温的方法, 利用贝叶斯技术给卫星观测与地面台站测量的积雪深度赋予不同权重系数, 通过同化技术来提高雪水当量与雪深反演精度, 目前该方法已用于欧洲芬兰气象研究所生产的北美雪深和雪水当量反演算法(Takala等, 2011). 此外, Che等(2014)利用MEMLS多层积雪辐射半经验模型结合陆面模式CLM中的积雪模块进行了积雪参数间接同化研究. 由于点测量数据和卫星反演雪深数据本身存在一定的误差, 因此会对最后同化的结果有一定影响. 而采用间接同化, 借助辐射传输模型与积雪物理过程模型建立关系, 同化的是卫星观测亮温, 则可以有效减小卫星观测中给积雪物理过程带来的误差. Tedesco等(2010)以线性回归算法为基准, 通过同化的方法利用积雪物理过程模型动态更新积雪颗粒大小, 从而反演雪深, 该算法目前还不能推广全球使用, 这是由于该算法选用的微波辐射模型与积雪

过程模型在全球的适用性仍有待检验.

目前星载被动微波辐射计的雪水当量算法不能满足像元尺度上的足够精度, 尤其对于业务化水文应用(Foster等, 1997; Hallikainen和Jolma, 1992; Kelly等, 2003; Koenig和Forster, 2004). 即使在某些区域和季节能较准确的估计雪水当量, 但星载辐射计反演雪水当量仍存在时间和空间上的偏差. 除了区域性的系统误差, 现有算法低估厚雪的雪水当量, 如采用亮温梯度算法在估算厚雪时产生的误差(Derksen等, 2005). 积雪的空间异质性, 以及卫星像元不同地物的组成即混合像元问题对星载雪水当量估计都带来很大的难题和挑战(Derksen等, 2005). 由于星载微波辐射计的空间分辨率很低, 其像元是几种地物的混合体. 对于星载辐射计观测, 其亮温往往包括裸土、植被和水体等的贡献, 像元内不同土地覆盖类型的辐射特征、温度和面积比都对卫星测量信号有影响, 而在模型研究中经常针对的是纯雪像元, 忽略了混合像元的影响. 这必然降低了积雪参数反演精度. 因此混合像元问题对于被动微波反演雪深(雪水当量)的精度起着主导影响. Derksen等(2009)和Lemmetyinen等(2009)的工作均已表明湖泊面积与积雪覆盖亮温之间有良好的关系, 即湖泊面积对现有雪水量亮温梯度算法有着很大的影响. 在此基础上, Lemmetyinen等(2011)利用HUT模型模拟了多湖泊区的积雪覆盖地表亮温, 并对模型进行了精度检验. 利用线性混合像元分解思路, 在像元内亮温考虑湖泊面积进而来校正现有被动微波雪水当量反演算法以提高反演精度. 由于水体、湖冰与积雪的发射率存在极大差异, 若像元内存在大量的水体或湖冰, 则必然会影响现有雪水当量算法反演精度. 因此我们需要用考虑不同下垫面类型为背景的辐射模型来评估不同地物类型的存在对雪水当量反演精度的影响.

Gu等(2014)利用FY3/MWRI数据通过线性混合像元分解, 假设 9×9 像元内同类地物亮温相同, 将25 km的亮温数据先重采样到10km, 然后在10km的基础上通过线性混合分解方法推算1km的亮温反演得到东北地区1km的亮温, 利用地面实测数据对比和分析了Chang算法(Chang等, 1987), NASA96算法(Foster等, 1997)和FY3雪深算法(蒋玲梅等, 2014). 对于积雪较少年份, 则FY3算法表现出较好的反演精度, 通过混合像元分解后精度提高很明显, 可达27%; 对于积

雪较厚年份, 则NASA96算法表现出较好性能; 而对于森林区则Chang算法较好. 由于该方法假设9×9像元内同类地物亮温相同, 实际情况很难满足该条件, 该假设所带来的误差不可估量. 此外将25km的亮温数据重采样到10km, 该采样误差同样存在, 也会对后续的反演带来影响.

被动微波辐射计数据源稳定可靠, 适用于大范围积雪参数的反演. 但由于其空间分辨率较低(几十公里像元), 一般不能提供积雪分布的细节信息. 相对而言, 主动微波遥感通过有源传感器(成像雷达、散射计和高度计等)发出电磁波, 再接收经过地物反射或散射的电磁波信号, 反演地表特性. 相对被动微波遥感而言, 主动微波遥感不仅对雪水当量等积雪参数十分敏感, 具有全天时、全天候的特点, 同时具有高空间分辨率的优点, 对定量反演空间上高度异质的积雪参数, 特别是雪水当量, 有着巨大潜力.

3.2 主动微波遥感雪水当量反演

利用雷达观测反演雪水当量研究始于SIR-C/X-SAR. 多个地面测量实验证实了不同的雷达后向散射系数与雪水当量(SWE)之间的关系. 例如, Ulaby等(1980)的实验表明, 在8.2和17.0GHz的后向散射系数与SWE成正相关关系. 同样, Kendra等(1998)的实验也表明在平坦下垫面情况下后向5.3和9.5 GHz散射系数与SWE呈正相关. 另外, 也有实验表明在相似波段(5.3、9.6GHz)情况下后向散射系数与SWE呈负相关(Strozzi等, 1999). Rott和Mätzler(1987)实验表明无雪和有雪情况下10.4GHz后向散射系数无明显区别. 由于每次实验的积雪参数和土壤参数均不同, 且正相关和负相关关系的同时存在表明, 后向散射数据与SWE之间的关系十分复杂. 季节性积雪地表微波后向散射通常可用一个简单模型描述:

$$\sigma_{pq}^t(f) = \sigma_{pq}^a(f) + \sigma_{pq}^v(f) + \sigma_{pq}^{sv}(f) + T_p T_q L_p L_q \sigma_{pq}^s(f), \quad (3)$$

式中, 包括 σ_{pq}^a 为积雪表面散射, σ_{pq}^v 积雪体散射, σ_{pq}^{sv} 积雪体散射与面散射相互作用项, σ_{pq}^s 积雪下垫面散射, T 为透过率, L 表示积雪层对信号的衰减, p, q 为极化方式. 必须通过准确的后向散射模型, 理解其散射机制基础上发展积雪参数的反演算法. 该类以多频率多极化微波后向散射系数为基础的雪水当量

反演算法中以Shi等(2000a, 2000b)发展的多频率(L、C、X波段)和双极化(VV、HH)数据反演雪水当量SWE的算法为代表.

基于SAR数据对积雪和土壤表面参数在不同频率、极化上响应的差异, Shi等(2000a)首先利用L波段数据估计积雪密度和土壤介电常数以及粗糙度参数. 然后利用C波段和X波段数据, 通过将土壤参数对于测量结果的影响最小化来估计积雪深度和粒子大小, 进而获得雪水当量. 这种方法需要利用SIR-C/X-SAR的所有3个频率数据. 具体方法为首先利用L波段数据估计积雪密度和土壤介电常数以及粗糙度参数, 再由C波段和X波段数据反演得积雪深度等参数. 在L波段, 由于积雪粒子远小于入射波长, 干雪的体散射和消光作用很小. 当电磁波通过积雪层再入射到土壤表面, 与直接入射到土壤表面相比, 发生了入射角变小、入射波长更小、土壤表面反射率减小以及入射到土壤表面的能量变小等改变. 基于一系列基于对积雪密度对L波段雷达后向散射测量的影响的理解, Shi等(2000a)发展了一种利用粗糙面散射对入射角度和入射波长响应机制的积雪密度反演算法. 这包括利用IEM模型(Fung等, 2002)模拟了在各种积雪密度(100~550kg/m³)、入射角度、介电常数、粗糙度状况和入射波长情况下的后向散射. 然后, HH极化和VV极化在不同表面介电常数和粗糙度状况下, 在同一入射角度和入射波长情况下的相互关系用回归分析表示. 算法中, 给定一组L波段VV、HH极化SAR数据, 即可计算积雪介电常数. 这种算法不需要积雪下垫面的任何先验知识. 再利用Looyenga经验公式即可通过积雪介电常数计算积雪密度. 积雪密度、土壤介电常数和均方根高度从L波段SAR数据反演得到之后, Shi等(2000b)通过对模型模拟数据的分析, 利用面散射信号在不同频率之间关系和通过参数化模型描述的积雪在C波段和X波段散射特性之间的关系, 反演积雪深度和粒径大小的算法, 并最终得到雪水当量的估算.

上述雪水当量反演算法需要5个测量值: L波段VV、HH用于估算积雪密度和土壤表面粗糙度、介电常数, C波段VV、HH和X波段VV用于估算积雪深度和粒径大小. 敏感性分析表明, C波段测量主要受土壤表面参数影响, 来自积雪本身的信号所占HH、VV极化信号比例较小. 因此, 通过C波段反演积雪参数,

需要准确分离土壤表面散射信号. 在X波段或更高频率波段, 雷达后向散射对积雪参数更敏感, 对积雪参数反演算法更为有效. 高频率微波后向散射对雪水当量的敏感性在机载和地面实验中得到了证实, 如Yueh等(2009)利用机载Ku波段散射计测量了美国科罗拉多州某积雪覆盖地区的多极化后向散射, 与地面实测雪水当量联合分析表明, 当雪水当量增长1 cm情况下同极化后向散射增加0.15~0.5dB. 这种敏感性存在地区差异, 与各地区自身情况相关, 如积雪粒径、积雪下垫面土壤特性、植被覆盖特征、地形等因素. King等(2013)利用地基X和Ku波段散射计观测了积雪覆盖高寒苔原地区的后向散射, 其结果表明在有雪情况下Ku波段同极化后向散射增加了5~9dB, X波段同极化后向散射增加了1~2dB. 国际新一代区域及全球积雪雷达监测项目, 如欧空局的星载合成孔径雷达项目CoReH2O, 以及美国宇航局(NASA)的冰雪及寒地过程项目(SCLP)都采用了较高频率SAR(X和Ku波段)多极化观测的方案.

对于高频率(X和Ku波段)极化SAR配置下的雪水当量反演算法, 已有研究团队展开了一系列理论和实验研究. 如前所述, 雪水当量与雷达后向散射强度之间的关系非常复杂, 这取决于在自然积雪覆盖地表环境下的各种变量, 主要有: 积雪深度、温度、积雪结构特性(包括密度、粒径和粒径分布等)、积雪水平分层结构、积雪-土壤界面特性和植被覆盖等. 基于雷达观测的雪水当量反演算法的核心为对雪水当量以外的其他对雷达后向散射观测有影响的因素去除和校正. 首先需要考虑的问题是如何在观测信号中剔除或估算粗糙土壤表面后向散射信号的影响. Rott等(2010)利用下雪前最近一次观测作为粗糙土壤表面后向散射信号, Shi(2006)利用交叉极化观测分离总后向散射信号中的体散射信号和土壤粗糙面散射信号. 散射模型模拟表明, 积雪粒径对后向散射的影响非常大, 甚至大于雪水当量对后向散射的影响, 因此在雪水当量反演算法中如何有效去除积雪粒径的影响是一项关键工作之一. 在X和Ku波段VV、HV极化配置下, 利用X和Ku波段对积雪特性的不同敏感性可对粒径参数进行估算. 如在Rott等(2010)中, 利用积雪消光特性在X和Ku波段的相关性和统计反演算法估算积雪单次散射反照率和雪水当量, 其中单次散射反照率与积雪粒径直接相关. 植被覆盖对反演

存在较大影响, 如Macelloni等(2012)的模拟表明, 森林生物量、树高和森林植被覆盖度等对后向散射对雪水当量的敏感性有一定影响, 在生物量较大、树高较高和覆盖度较大时较为明显, 达到一定程度时(生物量大于150m³/ha或者森林覆盖度大于0.3~0.4), 后向散射对雪水当量的敏感性甚至基本消失. 因此, 在反演算法中, 较大覆盖度或者生物量较大森林不适于雪水当量反演, 对于较小覆盖度或者生物量较小森林覆盖区, 必须运用一定的算法将植被效应进行校正.

前面所述反演方法依赖于极化后向散射强度观测, 而另一种SWE反演方法为利用干涉SAR测量数据. 由于积雪产生的干涉相移可直接用于雪水当量的估算(Rott等, 2003)或其变化量的估算(Guneriussen等, 2001). 这种方法已经用于较低频段的C波段(Guneriussen等, 2001; Engen等, 2004; Rott等, 2003)和L波段干涉数据(Rott等, 2003). 有雪和无雪情况下的入射情况, 积雪的存在使雷达散射几何条件发生了变化, 从而对相位产生影响. 利用相位偏移信息, 可估算雪水当量. 由于降雪或风吹雪造成的时间去相关是阻碍这种方法应用的最大因素. 在C波段, 这种作用可以在几天时间内造成完全去相关. 由于时间去相关对L波段的影响比C波段小, 因此更适合于应用这种方法.

Bernier等(1998)发展了一种利用时间序列C波段SAR估算浅雪覆盖区域雪水当量的算法. 其基本物理机制为: 积雪的热阻性等特性R会影响积雪下土壤的温度; 对于特定气象条件下, 积雪导热性越好, 土壤温度越低(小于0度条件下). 当土壤温度低于0度时(冻结状态), 其介电常数主要受到温度的影响, 温度越低, 介电常数越低; 土壤表面后向散射系数受到其介电常数影响; 在C波段, 对于干浅积雪地区, 积雪体散射作用很小, 雷达测量后向散射系数主要来自土壤表面散射, 因此受到积雪热阻性的影响. 该方法虽有在局部地区的成功应用(Bernier和Fortin, 1998), 但是其实质为间接性测量, 受到许多与地区相关的因素的影响. Sun等(2015)将此方法应用于中国西部山区, 结合C波段雷达后向散射系数和实地测量数据反演了山区雪水当量分布.

最近, Leinss等(2014)利用X波段的TerraSAR-x数据估算了芬兰某地区积雪深度分布, 其基本原理为VV与HH极化后向散射信号的相位差改变与新降积雪的相关性. 由于新降落积雪结构主要为水平结构,

而在随后的积雪结构发展中,逐渐向垂直型结构演变,因此VV与HH极化后向散射信号的相位差可直接反应出新降积雪和积雪老化的过程.模型模拟分析表明,在没有相位缠绕的情况下,更高频率观测数据可以提供更高精度的积雪深度反演.此方法开创了一种新的探测地面降雪的方法,但也受到许多不确定因素的影响,如地表覆盖类型差异、积雪微结构差异等,因此还需要进一步深入研究.

在利用主动微波遥感进行雪水当量遥感研究方面,虽然已有很多研究,包括散射模型和理论、反演算法以及地基、机载实验等,但是现阶段还未有在时间和空间上可满足全球雪水当量观测要求的卫星. Shi等(2014)提出一项旨在进行全球水循环要素综合观测的卫星计划,以在时间、空间和要素全面性上满足水循环研究要求.在雪水当量观测方面,主要利用X和Ku波段双频率多极化散射计,辅助利用L, Ku和Ka波段辐射计.这些传感器能实现大幅宽观测,保证了较短的重访周期(2~3天),且可提供公里级散射计观测数据,因此在时空分辨率上能满足雪水当量观测的要求,多传感器主被动联合探测也使得雪水当量的反演更可靠、更准确.

4 总结与展望

雪水当量的微波遥感研究已经历时数30余年,随着近年来对全球生态环境和气候变化的持续关注,相关研究仍在持续进行中.积雪微波散射/辐射前向模型方面,已有大量针对主被动微波遥感的模型被提出,但是未来仍然需要进行进一步发展,以对积雪覆盖地表的微波辐射和散射机制和特征进行进一步理解和模拟.当前的星载被动微波遥感雪水当量算法均采用半经验算法,是从有限的实验数据中发展而来.这些算法在同一套数据中应用时反演效果很好,但把该算法应用于其他数据时则有待进一步考证.尽管Jiang等(2011)利用积雪辐射参数化模型,发展了基于统计的雪水当量物理反演算法,但只适合纯雪覆盖下垫面地表,将其应用到全球仍存在很多问题,其存在的难点是对被动微波混合象元的处理.当前人们在处理被动微波混合象元时,把植被覆盖度因子考虑进去.对于被动微波几十公里的象元,除

了植被覆盖度影响外,其他地物的存在也都会影响反演的雪水当量精度.对于同一地物,不同波段的辐射之间必然有着某种联系,因此可以通过建立热红外辐射温度(如MODIS)和被动微波遥感地表温度(如AMSR-E, AMSR2)之间统计关系,来试图消除混合象元中非雪信号的干扰.已有AQUA/GCOM-W和FY-3卫星上同时载有MODIS(MERSI)和AMSR-E/AMSR2(MWRI)传感器,因此可获得同步数据来进行检验.此外,将理论反演算法应用到图像数据中的具体实施过程中仍存在问题,比如如何从图像上判断积雪是厚雪还是浅雪.浅雪通常出现在冬季的早期和晚期,深度小于或等于10cm的浅雪,对微波波段几乎是全透明的,星载辐射计的89GHz频率可用来探测浅雪,但使用89GHz需要考虑大气的影响.因此,如何开展微波波段大气纠正有待进一步研究.此外,被动微波测量山区雪水当量的问题主要是辐射计空间分辨率较粗的问题.空间分辨率通常是几十公里,像元大小比地形几何参数尺度大的多,传感器测得的信号无法反映出局地积雪参数变化和地形的复杂性.因此,获取复杂地形山区的积雪深度对低分辨率的被动微波传感器来说是个挑战.

相对于被动微波遥感积雪研究,目前并没有较为成熟的星载雷达积雪反演产品.这主要是因为现有星载雷达系统的观测频率一般不高于X波段,而较低频率的雷达观测对干雪雪体不敏感,不利于雪深等参数的反演.国际上新一代区域及全球积雪雷达监测项目,如欧空局星载合成孔径雷达计划CoReH2O(于2013年3月被取消),美国宇航局(NASA)的冰雪及寒地过程项目(SCLP),这两个卫星计划均采用了较高频率SAR(X和Ku波段)多极化观测的研究方案,有助于探测雪深和雪水当量,并有望改进被动微波探测雪深和雪水当量空间分辨率较低的不足.此外,中国科学院战略性先导科技专项水循环卫星(WCOM)目前正在背景型号论证阶段(Shi等, 2014),其设计了双频率散射计(DFPSCAT, X与Ku波段),其载荷配置可以实现比以往任何传感器的更高反演精度和时空分辨率的积雪水当量观测.WCOM卫星同时搭载多频段辐射计(PMI),WCOM搭载的主被动传感器结合(PMI与DFPSCAT),有望提高历史雪水当量反演精度和空间分辨率.

参考文献

- 曹梅盛, 李培基, Robinson D A, Spies T E, Kukla G. 1993. 中国西部积雪SMMR微波遥感的评价与初步应用. 环境遥感, 8: 260–269
- 曹梅盛, 李培基. 1994. 中国西部积雪微波遥感监测. 山地研究, 12: 230–234
- 车涛, 李新. 2004. 被动微波遥感估算雪水当量研究进展与展望, 地球科学进展, 19: 204–210
- 蒋玲梅, 王培, 张立新, 杨虎, 杨俊涛. 2014. FY3B-MWRI中国区域雪深反演算法改进. 中国科学: 地球科学, 44: 531–547
- 金亚秋. 1990. 强起伏连续随机介质的辐射传输理论. 中国科学A辑, 33: 535–544
- 李培基. 1999. 1951~1997年中国西北地区积雪水资源的变化. 中国科学D辑: 地球科学, 29: 63–69
- 孙知文, 施建成, 蒋玲梅, 杨虎, 张立新. 2006. 被动微波遥感反演中国西部地区雪深、雪水当量算法初步研究. 地球科学进展, 21: 1364–1369
- Andreadis K M, Lettenmaier D P. 2006. Assimilation remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model. Adv Water Resour, 29: 872–886
- Armstrong R L, Chang A, Rango A, Josberger E. 1993. Snow depth and grain size relationships with relevance for passive microwave studies. Ann Glaciol, 17: 171–176
- Aschbacher J. 1989. Land surface studies and atmospheric effects by satellite microwave radiometry. PhD Dissertation. Innsbruck: University of Innsbruck
- Berk N F. 1991. Scattering properties of the lev-eled-wave model of random morphologies. Phys Rev A, 44: 5069
- Bernier M, Fortin J P. 1998. The potential of times series of C-Band SAR data to monitor dry and shallow snow cover. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 36: 226–243
- Brasnett B. 1999. A global analysis of snow depth for numerical weather prediction. J Appl Meteorol, 38: 726–740
- Brogioni M, Macelloni G, Palchetti E, Paloscia S, Pampaloni P, Pettinato S, Santi E, Cagnati A, Crepaz. 2008. Monitoring snow characteristics with ground-based multifrequency microwave radiometry. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 47: 3643–3655
- Chang A T C, Foster J L, Hall D K. 1987. Nimbus-7 derived global snow cover parameters. Ann Glaciol, 9: 39–44
- Chang A T C, Grody N, Tsang L, Basist A, Goodison B, Walker A, Carroll T, Armstrong R, Josberger E, Sun C. 1997. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for AMSR-E snow water equivalent algorithm. NASA/GSFC, November
- Chang S, Shi J, Jiang L, Zhang L, Yang H. 2009. Improved snow depth retrieval algorithm in China area using passive microwave remote sensing data. Proc IGRASS, 2: II614–II617
- Che T, Li X, Jin R, Huang C. 2014. Assimilating passive microwave remote sensing data into a land surface model to improve the estimation of snow depth. Remote Sens Environ, 143: 54–63
- Che T, Li X, Jin R, Richard A, Zhang T. 2008. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. Ann Glaciol, 49: 145–154
- Chen C, Tsang L, Guo J, Chang A T C, Ding K. 2003. Frequency dependence of scattering and extinction of dense media based on three-dimensional simulations of Maxwell's equations with applications to snow. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 41: 1844–1852
- Cline D, Yueh S, Chapman B, Stankov B, Gasiewski A, Masters D, Elder K, Kelly R, Painter T H, Miller S, Katzberg S, Mahrt L. 2009. NASA cold land processes experiment (CLPX 2002/03): Airborne remote sensing. J Hydrometeorol, 10: 338–346
- Clissold P. 2008. Candidate earth explorer core missions: Reports for assessment: CoReH2O-COLD REgions Hydrology high-resolution observatory ESA SP-1304. ESA Communication Production Office, European Space Agency
- Davis D T, Chen Z, Tsang L, Hwang J N, Chang A. 1993. Retrieval of snow parameters by iterative inversion of a neural network. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 31: 842–852
- Derksen C, Walker A, Goodison B. 2003. A comparison of 18 winter seasons of *in situ* and passive microwave derived snow water equivalent estimates in Western Canada. Remote Sens Environ, 88: 271–282
- Derksen C, Walker A, Goodison B. 2005. Evaluation of passive microwave snow water equivalent retrievals across the boreal forest/tundra transition of western Canada. Remote Sens Environ, 96: 315–327
- Derksen C. 2008. The contribution of AMSR-E 18.7 and 10.7 GHz measurements to improved boreal forest snow water equivalent retrievals. Remote Sens Environ, 112: 2700–2709
- Derksen C, Sturm M, Liston G, Holmgren J, Huntington H, Silis A, Solie D. 2009. Northwest Territories and Nunavut snow characteristics from a sub-Arctic traverse: Implications for passive microwave remote sensing. J Hydrometeorol, 10: 448–463
- Derksen C, Toose P, Rees A, Wang L, English M, Walker A, Sturm M. 2010. Development of a tundra-specific snow water equivalent retrieval algorithm for satellite passive microwave data. Remote Sens Environ, 114: 16992–1709
- Ding K, Xu X, Tsang L. 2010. Electromagnetic scattering by bicontinuous random microstructures with discrete permittivities. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 48: 3139–3151
- Du J, Shi J, Rott H. 2010. Comparison between a mul-ti-scattering and multi-layer snow scattering model and its parameterized snow backscattering model. Remote Sens Environ, 114: 1089–1098
- Durand M, Margulis S A. 2006. Feasibility test of multifrequency radiometric data assimilation to estimate snow water equivalent. J Hydrometeorol, 7: 443–457
- Engen G, Guneriusson T, Overrein O. 2004. Delta-K interferometric SAR technique for snow water equivalent (SWE) retrieval. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 1: 57–61

- Foster J L, Chang A T C, Hall D K. 1997. Comparison of snow mass estimation from a prototype passive microwave algorithm, a revised algorithm and a snow depth climatology. *Remote Sens Environ*, 62: 132–142
- Foster J L, Sun C, Walker J P, Kelly R, Chang A, Dong J, Powell H. 2005. Quantifying the uncertainty in passive microwave snow water equivalent observations. *Remote Sens Environ*, 94: 187–203
- Fung A K, Liu W Y, Chen K S. 2002. A comparison between IEM-based surface bistatic scattering models. *Proc IGRASS*, 1: 441–443
- Goodison B, Walker A. 1994. Canadian development and use of snow cover information from passive microwave satellite data. In: Choudhury B, Kerr Y, Njoku E, et al, eds. *Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions*. Utrecht: VSP BV. 245–262
- Grippa M, Mognard N, Le Toan T, Josberger E G. 2004. Siberia snow depth climatology derived from SSM/I data using a combined dynamic and static algorithm. *Remote Sens Environ*, 93: 30–41
- Gu L, Ren R, Zhao K, Li X. 2014. Snow depth and snow cover retrieval from FengYun3B microwave radiation imagery based on a snow passive microwave unmixing method in northeast china. *J Appl Remote Sens*, 8: 084682
- Guneriussen T, Hogda K A, Johnsen H, Lauknes I. 2001. InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 39: 2101–2108
- Hallikainen M, Jolma P. 1992. Comparison of algorithms for the retrieval of snow water equivalent from NIMBUS-7 SMMR data in Finland. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 30: 124–131
- Hallikainen M T, Ulaby F T, Van Deventer T E. 1987. Extinction behavior of dry snow in the 18- to 90-GHz range. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 13: 737–745
- Hallikainen M T, Ulaby F, Abdelrazik M. 1986. Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range. *IEEE Trans Antennas Propag*, 34: 1329–1340
- Hofer R, Mätzler C. 1980. Investigation of snow parameters by radiometry in the 3- to 60-mm wavelength region. *J Geophys Res*, 85: 453–460
- Jiang L M, Shi J C, Tjuatja S, Dozier J, Chen K S, Du J, Zhang L X. 2011. Estimation of snow water equivalence using the polarimetric scanning radiometer from the cold land processes experiments (CLPX03). *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 8: 359–363
- Jiang L M, Shi J C, Tjuatja S, Dozier J, Chen K, Zhan L. 2007. A parameterized multiple-scattering model for microwave emission from dry snow. *Remote Sens Environ*, 111: 357–366
- Jin Y, Kong J. 1984. Strong fluctuation theory for electromagnetic wave scattering by a layer of random discrete scatterers. *J Appl Phys*, 55: 1364–1369
- Josberger E G, Mognard N M. 2002. A passive microwave snow depth algorithm with a proxy for snow metamorphism. *Hydrol Process*, 16: 1557–1568
- Kelly R E, Chang A T, Tsang L, Foster J L. 2003. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 41: 230–242
- Kendra J R, Sarabandi K, Ulaby F T. 1998. Radar measurements of snow: Experiment and analysis. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 36: 864–879
- King J, Kelly R, Kasurak A, Gunn G, Duguay C, Mead J. 2013. UW-Scat A ground-based dual frequency scatterometer for observation of snow properties. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 10: 528–532
- Koenig L S, Forster R R. 2004. Evaluation of passive microwave snow water equivalent algorithms in the depth hoar dominated snowpack of the Kuparuk River Watershed, Alaska, USA. *Remote Sens Environ*, 93: 511–527
- Kruopis N, Praks J, Arslan A N, Alasalmi H M, Koskinen J T, Hallikainen M T. 1999. Passive microwave measurements of snow-covered forest areas in EMAC'95. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 37: 2699–2705
- Kurvonon L, Hallikainen M T. 1997. Influence of land-cover category on brightness temperature of snow. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 35: 367–377
- Kunzi K F, Patil S, Rott H. 1982. Snow-cover parameters retrieved from Nimbus-7 scanning multichannel microwave radiometer (SMMR) data. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, GE-20: 452–467
- Lax M. 1952. Multiple scattering of waves II. The effective field in dense systems. *Phys Rev*, 85: 621–629
- Leinss S, Parrella G, Hajnsek I. 2014. Snow height determination by polarimetric phase differences in X-band SAR data. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens*, 7: 3794–3810
- Lemmetyinen J, Derksen C, Pulliainen J, Strapp W, Toose P, Walker A, Tauriainen S, Phlfllyckt J, Karna J, Hallikainen M T. 2009. A comparison of airborne microwave brightness temperatures and snowpack properties across the boreal forests of Finland and Western Canada. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 47: 965–978
- Lemmetyinen J, Kontu A, Kärnä J P, Vehviläinen J, Takala M, Pulliainen J. 2011. Correcting for the influence of frozen lakes in satellite microwave radiometer observations through application of a microwave emission model. *Remote Sens Environ*, doi: 10.1016/j.rse.2011.09.008
- Li X, Li X W, Li, Z Y, Ma M G, Wang J, Xiao Q, Liu Q, Che T, Chen E X, Yan G J, Hu Z Y, Zhang L X, Chu R Z, Su P X, Liu Q H, Liu S M, Wang J D, Niu Z, Chen Y, Jin R, Wang W Z, Ran Y H, Xin X Z, Ren H Z. 2009. Watershed allied telemetry experimental research. *J Geophys Res*, 114: 22103
- Li X, Cheng G, Liu S, Xiao Q, Ma M, Jin R, Che T, Liu Q, Wang W, Qi Y, Wen J, Li H, Zhu G, Guo J, Ran Y, Wang S, Zhu Z, Zhou J, Hu X, Xu Z. 2013. Heihe watershed allied telemetry experimental research (hiwater): Scientific objectives and experimental design.

- Bull Amer Meteor Soc, 94: 1145–1160
- Liang D, Tsang L, Yueh S, Xu X. 2008. Modeling active microwave remote sensing of multilayer dry snow using dense media radiative transfer theory. *Proc IGARSS*, 3: III39–III42
- Liang D, Xu X, Tsang L, Andreadis K M, Josberger E G. 2007. Modeling multi-layer effects in passive microwave remote sensing of dry snow using Dense Media Radiative Transfer Theory (DMRT) based on quasicrystalline approximation. *Proc IGARSS*, 1215–1218
- Liston G E, Pielke S R A, Greene E M. 1999. Improving first-order snow-related deficiencies in a regional climate model. *J Geophys Res*, 104: 19559–19567
- Macelloni G, Brogioni M, Montomoli F, Fontanelli G. 2012. Effect of forests on the retrieval of snow parameters from backscatter measurements. *Eur J Remote Sensing*, 45: 121–132
- Mätzler C, Wiesmann A. 1999. Extension of the microwave emission model of layered snowpacks to coarse-grained snow. *Remote Sens Environ*, 70: 317–325
- Mätzler C. 1987. Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover. *Remote Sensing Review*, 2: 259–391
- Pulliainen J T, Grandell J, Hallikainen M T. 1999. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 37: 1378–1390
- Pulliainen J. 2006. Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations. *Remote Sens Environ*, 101: 257–269
- Rango A, Chang A T C, Foster J L. 1979. The utilization of spaceborne microwave radiometers for monitoring snowpack properties. *Nord Hydrol*, 10: 25–40
- Rango A, Martine J, Chang A T C, Foster J L, van Katwijk V. 1989. Average areal water equivalent of snow in a mountain basin using microwave and visible satellite data. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 27: 740–745
- Robinson D A, Dewey K F, Heim R R. 1993. Global snow cover monitoring: An update. *Bull Amer Meteorol Soc*, 74: 1689–1696
- Rodell M, Houser P R, Jambor U, Gottschalk J, Mitchell K, Meng C, Arsenault K, Cosgrove B, Radakovich J, Bosilovich M, Entin J K, Walker J P, Lohmann D, Toll D. 2004. The global land data assimilation system. *Bull Amer Meteorol Soc*, 85: 381–394
- Rott H, Mätzler C. 1987. Possibilities and limits of synthetic aperture radar for snow and glacier surveying. *Ann Glaciol*, 9: 195–199
- Rott H, Nagler T, Scheiber R. 2003. Snow mass retrieval by means of SAR interferometry. In: *Proceedings of FRINGE 2003 Workshop*. European Space Agency ESA, Frascati, Italy
- Rott H, Sturm K. 1991. Microwave signature measurements of Antarctic and Alpine snow. In: *11th EARSeL Symposium*, Graz, Austria. 140–151
- Rott H, Nagler T, Scheiber R. 2003. Snow mass retrieval by means of SAR interferometry. In: *Proceeding of FRINGE 2003 Workshop*. European Space Agency ESA, Frascati, Italy. http://earth.esa.int/fringe03/proceedings/papers/46_rott.pdf
- Rott H, Yueh S H, Cline D W, Duguay C, Essery R, Haas C, Heliere F, Kern M, Macelloni G, Malnes E, Nagler T, Pulliainen, Jouni, Rebhan H, Thompson A. 2010. Cold regions hydrology high-resolution observatory for snow and cold land processes. *Proc IEEE*, 98: 752–765
- Roy V K, Goita A, Royer A E, Walker B, Goodison. 2004. Snow water equivalent retrieval in a Canadian boreal environment from microwave measurements using the HUT snow emission model. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 42: 1850–1858
- Santi E, Pettinato S, Paloscia S, Pampaloni P, Macelloni G, Brogioni M. 2012. An algorithm for generating soil moisture and snow depth maps from microwave spaceborne radiometers: HydroAlgo. *Hydrol Earth Syst Sci*, 16: 3659–3676
- Shi J, Dong X L, Zhao T J, Du J Y, Jiang L M, Du Y, Liu H, Wang Z Z, Ji D B, Xiong C. 2014. WCOM: The science scenario and objectives of a global water cycle observation mission. *Proc IGARSS*, 3646–3649
- Shi J C, Dozier J. 2000a. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, part I: Inferring snow density and subsurface properties. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 38: 2465–2474
- Shi J, Dozier J. 2000b. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, part II: Inferring snow depth and particle size. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 38: 2475–2488
- Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, Chen K S, Wigneron J P, Chanzy A. 2005. A parameterized multifrequency-polarization surface emission model. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 43: 2831–2841
- Shi J C. 2006. Snow Water Equivalence Retrieval Using X and Ku band Dual-Polarization Radar. *Proc IGARSS*. 2183–2185
- Slater A G, Clark M P. 2006. Snow Data assimilation via an ensemble Kalman filter. *J Hydrometeorol*, 7: 478–493
- Slater A G, Schlosser C A, Desborough C E, Pitman A J, Henderson-Sellers A, Robock A, Ya Vinnikov K, Entin J, Mitchell K, Chen F, Boone A, Etchevers P, Habets F, Noilhan J, Braden H, Cox P M, de Rosnay P, Dickinson R E, Yang Z L, Dai Y J, Zeng Q, Duan Q, Koren V, Schaake S, Gedney N, Gusev Y M, Nasonova O N, Kim J, Kowalczyk E A, Shmakin A B, Smirnova T G, Verseghy D, Wetzel P, Xue Y. 2001. The representation of snow in land-surface schemes: Results from PILPS 2(d). *J Hydrometeorol*, 2: 7–25
- Strozzi T, Wegmuller U, Mätzler C. 1999. Mapping wet snow covers with SAR interferometry. *Int J Remote Sens*, 12: 2395–2403
- Stankov B B, Cline D W, Weber B L, Gasiewski A J, Wick G A. 2008. High-resolution airborne polarimetric microwave imaging of snow cover during the NASA cold land processes experiment. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 46: 3672–3693
- Stiles W H, Ulaby F T, Rango A. 1981. Microwave measurements of snowpack properties. *Nordic Hydrol*, 12: 143–166
- Sun C, Walker J P, Houser P R. 2004. A Methodology for Snow Data

- Assimilation in a Land Surface Model. *J Geophys Res*, 109: D08108.1–D08108.12
- Sun S, Che T, Wang J, Li H, Hao X, Wang Z, Wang J. 2015. Estimation and analysis of snow water equivalents based on C-band SAR data and field measurements. *Arct Antarct Alp Res*, 47: 313–326
- Sun Z W. 2007. Estimate snow depth and snow water equivalent algorithm for FY-3 MWRI and development of system. Master Thesis. Beijing: Beijing Normal University
- Takala M, Luojus K, Pulliainen J, Derksen C, Lemmetyinen J, Kärnä J P, Koskinen J, Bojkov B. 2011. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements. *Remote Sens Environ*, doi: 10.1016/j.rse.2011.08.014
- Takala M, Pulliainen J, Metsamäki S, Koskinen J. 2009. Detection of snowmelt using spaceborne microwave radiometer data in Eurasia from 1979 to 2007. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 47: 2996–3007
- Tan S, Chang W, Tsang L, Lemmetyinen J, Proksch M. 2015. Modeling both active and passive microwave remote sensing of snow using dense media radiative transfer (DMRT) theory with multiple scattering and backscattering enhancement. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens*, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2469290
- Tan Y, Li Z, Tsang L, Chang A T C, Li Q. 2004. Modeling passive and active microwave remote sensing of snow using DMRT theory with rough surface boundary conditions. *Proc IGARSS*, 3: 1842–1844
- Tan Y, Li Z, Tse K K, Tsang L. 2005. Microwave model of remote sensing of snow based on dense media radiative transfer theory with numerical Maxwell model of 3D simulations (NMM3D). *Proc IGARSS*, 1: 578–581
- Tao C, Dai L, Wang J, Zhao K, Liu Q. 2012. Estimation of snow depth and snow water equivalent distribution using airborne microwave radiometry in the Binggou Watershed, the upper reaches of the Heihe River basin. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 17: 23–32
- Tedesco M, Pulliainen J, Takala M, Hallikainen M, Pampaloni P. 2004. Artificial neural network-based techniques for the retrieval of SWE and snow depth from SSM/I data. *Remote Sens Environ*, 90: 76–85
- Tedesco M, Reichle R, Loew A, Markus T, Foster J. 2010. Dynamic approaches for snow depth retrieval from spaceborne microwave brightness temperature. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 48: 1955–1967
- Tsang L, Chen C T, Chang A T C, Guo J, Ding K H. 2000. Dense media radiative transfer theory based on quasicrystalline approximation with application to passive microwave remote sensing of snow. *Radio Sci*, 35: 731–49
- Tsang L, Ding K H, Chang A T C. 2003. Scattering by densely packed sticky particles with size distributions and applications to microwave emission and scattering from snow. *Proc IGARSS*, 4: 2844–2846
- Tsang L, Ding K, Huang S, Xu X. 2013. Electromagnetic computation in scattering of electromagnetic waves by random rough surface and dense media in microwave remote sensing of land surfaces. *Proc IEEE*, 101: 255–279
- Tsang L, Kong J A, Newton R W. 1982. Application of strong fluctuation random medium theory to scattering of electromagnetic waves from a half-space of dielectric mixture. *IEEE Trans Antennas Propag*, 30: 292–302
- Tsang L, Kong J A, Shin R T. 1985. *Theory of Microwave Remote Sensing*. New York: Wiley
- Tsang L, Kong J A. 1980. Multiple scattering of electromagnetic waves by random distribution of discrete scatterers with coherent potential and quantum mechanical formalism. *J Appl Phys*, 57: 3465–3485
- Tsang L, Kong J A. 1981. Scattering of electromagnetic waves from random media with strong permittivity fluctuations. *Radio Sci*, 16: 303–320
- Tsang L, Kong J A. 2001. *Scattering of Electromagnetic Waves. Volume 3: Advanced Topics*. Hoboken: John Wiley & Sons
- Tsang L, Pan J, Liang D, Li Z, Cline D W, Tan Y. 2007. Modeling active microwave remote sensing of snow using dense media radiative transfer (DMRT) theory with multiple-scattering effects. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 45: 990–1004
- Ulaby F T, Stiles W H. 1980. The active and passive microwave response to snow parameters: 2 Water equivalent of dry snow. *J Geophys Res*, 85: 1045–1049
- Wiesmann A, Mätzler C, Weise T. 1998. Radiometric and structural measurements of snow samples. *Radio Sci*, 33: 273–289
- Wiesmann A, Mätzler C. 1999. Microwave emission model of layered snowpacks. *Remote Sens Environ*, 70: 307–316
- Xiong C, Shi J C, Brogioni M, Tsang L. 2012. Microwave snow backscattering modeling based on two-dimensional snow section image and equivalent grain size. *Proc IGARSS*, doi: 10.1109/IGARSS.2012.6351615
- Xu X, Tsang L, Chang W, Yueh S. 2014. Bicontinuous DMRT model extracted from multi-size QCA with application to terrestrial snowpack. General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 2014 XXXIth URSI. 1–3
- Xu X, Tsang L, Yueh S. 2012. Electromagnetic models of co/cross polarization of bicontinuous/DMRT in radar remote sensing of terrestrial snow at X- and Ku-band for CoReH2O and SCLP applications. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens*, 5: 1024–1032
- Yueh S H, Dinardo S J, Akgiray A, West R, Cline D W, Elder K. 2009. Airborne Ku-band polarimetric radar remote sensing of terrestrial snow cover. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 47: 3347–3364