

文章编号: 1007 4619( 2006) 04 0515 08

积雪辐射模型验证

蒋玲梅<sup>1 2</sup>, 施建成<sup>3</sup>, 张立新<sup>1 2</sup>

( 1. 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 遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875;  
2 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875  
3. 遥感科学图象重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所与北京师范大学, 北京 100101)

摘 要: 雪水当量是气候模型与大尺度水文模型中的一个重要参数。积雪容量对全球气候变化研究、大尺度径流估算与水资源管理等方面都有很重要的意义。因此研究积雪辐射模型模拟特征及模型验证显得极为重要。本文选用的积雪辐射模型是采用考虑多次散射的双矩阵法( Matrix Doubling Formulation)作为求解辐射传输方程的方法, 利用致密介质理论来考虑积雪的近场效应, 辐射传输方程的边界条件和下垫面辐射计算则采用高级积分方程模型( A IEM )。文中首先分析了辐射模型对下垫面参数特性和积雪颗粒特性的敏感性, 结果表明下垫面特性和积雪颗粒大小对当前人们采用的温度梯度雪水当量反演算法有着很大影响。另外, 本文利用瑞士 Weissfluh joch 试验区的地面实验数据, 对该积雪辐射模型在宽波段高频率和大角度的辐射信号模拟能力做了验证, 验证结果表明该模型模拟值与地面实测数据吻合很好, 说明积雪辐射模型能很好模拟自然地表的积雪辐射信号。

关键词: 干雪; 致密介质理论; 下垫面特性; 模型验证; AMSR E

中图分类号: TP722 6 /P426 63 文献标识码: A

Comparison of Dry Snow Em ission M odel  
w ith Experim ental M easurem ents

JIANG Lingmei<sup>1 2</sup>, SHI Jian cheng<sup>3</sup>, ZHANG Li xin<sup>1 2</sup>

( 1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Center of Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875 China;  
2 Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875 China;  
3 State key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China)

**Abstract** Snow is a key element in themeteorological and hydrological studies. The amount of regional snow plays an important role in the climate change and also affects themanagement ofwater resources, and estimate the runoff and flood forecasting. Thus, it is necessary to do sensitivity analysis of dry snow emission model, and compare this model with experimental data. In this study, firstly, we carried out the numerical simulations to evaluate the subsurface effects, including surface roughness and dielectric properties, on the brightness temperature differences of snow covered terrain at AMSR-E frequencies. We found that the ground dielectric constant and the surface roughness parameters such as RMS height and correlation length have a significant effect on the brightness temperature differences at AMSR-E frequencies. Then we evaluate the capability of a multi scattering microwave emission model that includes the Dense Media Radiative Transfer Model(DMRT) and A IEM in simulation of dry snow emission with Matrix Doubling approach. We compared the predictions of

this model with the ground experimental measurements on Dec. 21, 1995 at Weissfluhjoch (46°49' 83"N, 9°48' 62"E) in Davos, Switzerland. The comparison showed that our snow microwave emission model agreed well with the experimental measurements.

**Key words** dry snow; DMRT; underground properties; validation; AMSR-E

1 引 言

积雪监测对于全球气候变化研究和水资源管理都具有重要意义。积雪的多寡不仅是影响气候变化的重要因子,也是影响干旱和半干旱地区农牧业发展的重要因素。因此,多年来对积雪的研究一直受到地理学、气象气候学及水文学等学科科技工作者的广泛关注与重视。

传统获取积雪物理特性参数主要是通过实地钻孔取雪样得到的,这种点的测量不能代表积雪覆盖的时空变化特征,而且测点费时费力。过去 30 年航天被动微波遥感被广泛用于估算积雪覆盖和雪水当量<sup>[1-3]</sup>。目前用于估算雪层厚度和雪水当量主要采用半经验线性算法<sup>[1,2,5-7]</sup>。这些方法认为 19GHz (或 18GHz)和 37GHz 的亮温差与积雪深度之间存在线性关系。这种半经验线性算法也称之为静态算法,由于假设积雪颗粒大小和密度不随时间和空间变化而变化,因而不同的研究者采用该算法研究不同地区有着不同的经验系数。近来有研究表明这种静态算法在某些地区不适用,雪水当量与亮温差线性关系的系数随季节变化而变化<sup>[8,9]</sup>。此外,人们开始关注雪粒尺寸对亮温差线性算法的影响<sup>[10]</sup>等。另外, Wang<sup>[11]</sup>发现在积雪参数反演中若考虑地表粗糙度会使雪参数的估计更加可靠。

有雪覆盖地表的微波辐射主要包括雪盖本身的辐射、积雪下覆地表的辐射及积雪与地表之间相互作用。干雪的电磁辐射特性随积雪深度、颗粒大小、密度和结构的变化而变化,这是被动微波遥感探测积雪信息的物理基础。在微波低频波段,干雪盖的发射主要受雪盖下地表特性的影响。而在高频波段,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<sup>[12,13]</sup>。

本文用积雪辐射理论模型研究了积雪覆盖地表辐射特性,针对 AMSR-E 辐射计 55°入射角和 3 个频段 (10.7GHz, 18.7GHz, 36.5GHz)传感器参数,分析了积雪下覆表面地表参数和积雪自身参数对亮温梯度算法的影响。在此基础之上指出了当前的卫星雪水当量算法中存在的问题。对不同参数与积雪总辐射

的敏感性分析有利于发展雪水当量物理反演算法。

本文首先给出积雪辐射理论模型描述;然后具体阐述积雪下覆地表参数特性和积雪自身特性对积雪的微波辐射的影响。重点考察地表粗糙度特性与介电特性(土壤水分)、积雪颗粒大小等参数随积雪深度变化,对总辐射亮温与亮温梯度 (18—36GHz)的响应。文中第四部分给出利用实验数据对积雪辐射模型进行的验证。最后部分是本文的结论。

2 积雪辐射模型描述

本文所采用的积雪辐射理论模型包括了考虑多次散射的双矩阵方法 (Matrix Doubling Formulation)<sup>[14]</sup>,用于求解矢量辐射传输方程。在该模型中,采用 Mie 散射假设的致密介质模型来描述雪层的消光和发射特性<sup>[15]</sup>,用 A IEM 模型<sup>[16]</sup>来处理地表发射及矢量辐射传输模型的边界条件。因此,该辐射模型包括了地表粗糙度效应。

积雪层被看作是紧密排列的不规则非均匀介质层(图 1)。积雪层主要有三个辐射源:积雪层内向上辐射和向下辐射,积雪下垫面半无限空间向上的辐射。所有这三个辐射源都要经历下述过程到达传感器:体散射、面散射、衰减、体一面相互作用和在不规则边界的穿透作用。因此,非均匀介质层的总辐射可表示为:

$$u_t = L_u u_u + L_d u_d + L_l u_l \tag{1}$$

式中,  $L_i$  是多次散射运算符;  $u_u$  为介质层向上总辐射;  $u_d$  为介质层向下总辐射;  $u_l$  为介质层下覆半无限空间向上辐射。

双矩阵法是求解辐射传输方程的一种数值解法,它能同时计算面散射和体散射,且这种方法也基

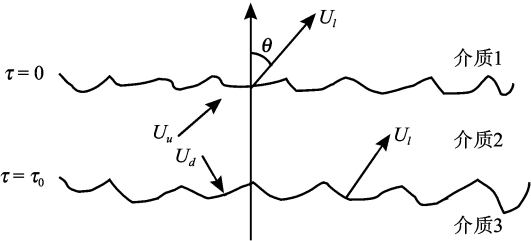


图 1 介质层辐射示意图

Fig 1 Geometry of the single layer emission problem

于能量守恒。若非均匀介质层的光学厚度较大, 则用双矩阵法将更有效, 更适用。

致密介质内部颗粒密集排列, 且占有相当的体积百分比。致密介质粒子间的相关性必须予以考虑, 这已被实验室试验和蒙特卡罗求解麦克斯方程所证实。随机介质的电磁波散射取决于颗粒间的位置。积雪由于其颗粒大小和波长相比拟, 且冰颗粒占有一定体积百分比, 因而积雪作为致密介质, 必须考虑其颗粒间的近场效应, 本文则采用致密介质理论来计算积雪层的消光特性和发射特性<sup>[15]</sup>, 应用分布函数描述颗粒之间位置的相关性。有研究表明, 平均颗粒大小是决定积雪颗粒散射特性的关键因素<sup>[17]</sup>, 因此本文采用平均颗粒大小来表征雪层内的不同颗粒大小散射特征。

不同介质边界的散射特性主要取决于界面的粗糙度特性和两种介质介电特性的不连续性。描述地表散射特性的传统理论模型有小扰动模型、物理光学模型和几何光学模型等等, 这些模型都有各自的适用范围。陈昆山等人<sup>[16]</sup>发展了高级积分方程模型 (A IEM), 能描述从较光滑表面到粗糙表面的散

射特征。A IEM 模型的适用范围已经过蒙特卡罗模拟验证和地面试验数据验证<sup>[18-19]</sup>。A IEM 能计算和模拟包括更宽范围的介电常数、粗糙度和频率等参数的地表辐射信号。因此本文利用 A IEM 模型来处理辐射传输方程的边界条件和模拟地表的发射。

3 积雪辐射模型敏感性分析

3.1 地表土壤湿度对积雪覆盖地表辐射响应的影响

首先来分析积雪下覆地表参数——地表土壤水分对积雪覆盖地表辐射的影响。模型模拟输入参数见表 1。自然界裸露地表的土壤水分变化范围可从 2%至 44%, 甚至更大 (达 60%)。因而在有雪覆盖的情况下, 土壤水分仍有可能在 2%—44%之间变化, 地表粗糙度均方根高度取 0.5 cm, 相关长度取 5.0 cm, 相关函数均采用高斯相关函数 (下同)。

模拟结果如图 2所示。积雪总辐射亮温和亮温差随土壤水分变化在 V极化和 H极化时变化趋势一致, 因此文中只给出一个极化——H极化的变化情况。

表 1 随土壤水分变化的积雪覆盖地表辐射的模拟数据

Table 1 Model inputs for snow covered surface with soil moisture varying

积雪温度 /K	地表温度 /K	积雪密度 /(kg /m <sup>3</sup> )	积雪厚度 /cm	平均颗粒半径 /mm	下表面粗糙度 sig. /cm	土壤湿度 /%
268.0	272.0	300	50	0.5	0.5 5.0	2—44

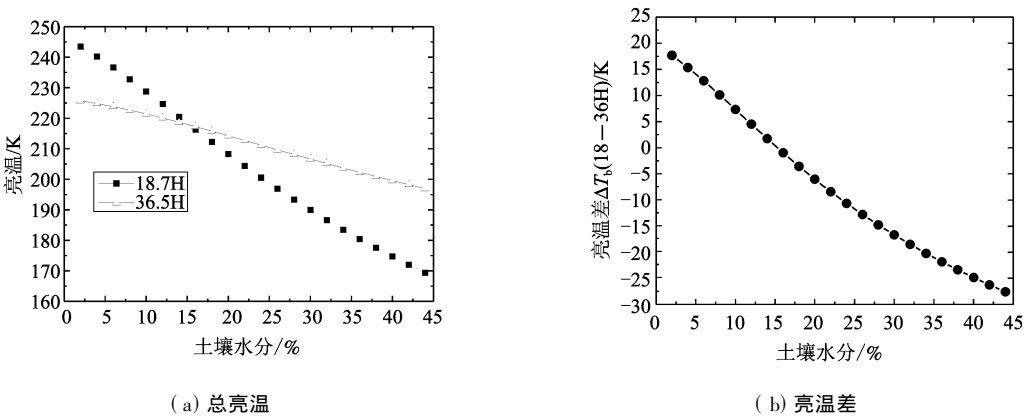


图 2 下表面土壤水分与 H 极化亮温的关系

Fig 2 The effects of ground soil moisture on snow layer emission at H-pol

从图 2中可看出, 随土壤水分增加, 18.7GHz与 36.5GHz的亮温都降低。其中在 18.7GHz频段随土壤水分变化下降很快, 说明地表土壤水分参数对低频 18.7GHz影响要大。土壤水分增加, 地表的辐射随之减弱, 因而反应到积雪总辐射亮温也下降。

对于 18.7GHz频段, 土壤水分从 2%到 44%变化, 亮温变化可达到 70K。而 36.5GHz频率随土壤水分变化引起的亮温变化幅度相对要小的多, 仅 20多 K。同时也说明了地表参数——土壤水分的变化对低频较为敏感。

此外,图 2( a)中可看出,在土壤水分达到 15%之前,18.7GHz 的亮温要高于 36.5GHz,因此它们的亮温差  $\Delta T_b$  (18—36H)为正。当土壤水分超过 15%之后,18.7GHz 频率的亮温下降幅度快,因而 36.5GHz 频率的亮温高于 18.7GHz 频率的亮温。这是由于随着土壤水分的增加,地表的辐射贡献越来越小,而积雪的体散射贡献主要跟频率有关,频率越高,积雪的体散射作用越强,因而 36.5GHz 频率的体散射大于 18.7GHz 的体散射,因此在地表土壤水分含量很大的情况下,36.5GHz 的亮温值要高于 18.7GHz。

在图 2(b)中,土壤水分从 2%变化到 44%,亮温差  $\Delta T_b$  (18—36H)从接近 20K 变化到 -30K (H

极化的亮温差要大于 V 极化的亮温差),因此地表参数——土壤水分的变化不可以忽略,不可以把地表土壤水分参数作为常数处理。

3 2 地表粗糙度对积雪覆盖地表辐射响应的影响

接下来分析积雪下覆地表参数——地表粗糙度对积雪覆盖地表辐射的影响。模型模拟输入参数见表 2。文中用均方根高度大小的变化来表征地表的粗糙度变化。均方根高度范围为 0.5—3.0m。土壤水分取 10%和 44%两组进行模拟和分析。模拟结果如图 3 所示。

表 2 随地表粗糙度变化的积雪覆盖地表辐射的模拟数据

Table 2 Model inputs for snow covered surface with ground roughness varying

积雪温度 /K	地表温度 /K	积雪密度 /(kg /m <sup>3</sup> )	积雪厚度 /cm	平均颗粒半径 /mm	下表面粗糙度 sig cl/cm	土壤水分 %
268.0	272.0	300	50	0.5	0.5~3.0 10.0	10,44

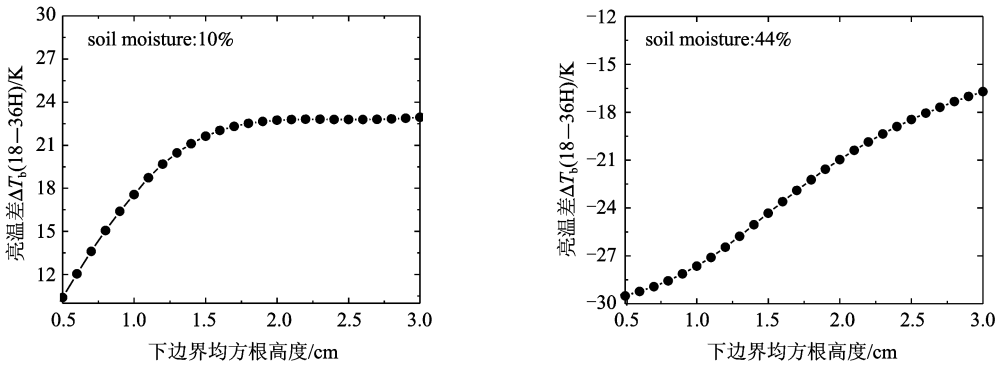


图 3 下表面粗糙度与 H 极化亮温的关系

Fig. 3 The effects of ground roughness on snow layer emission at H pol

从图 3 可看出,当土壤水分比较小(如 10%)的时候,随着地表粗糙度增加,亮温差增加,若随着粗糙度继续增加,亮温差增加到一定程度后接近饱和。而大土壤水分 44%时,则随着地表粗糙度增加亮温差一直增加,这说明不同土壤水分条件下的亮温差随粗糙度变化的特征不同。亮温差与土壤水分的关系正如图 2 所示,小土壤水分(10%)亮温差  $\Delta T_b$  (18—36H)为正,大土壤水分(44%)亮温差为负。

随土壤水分增加,H 极化的亮温差  $\Delta T_b$  (18—36H)减小;而随着地表粗糙度增加,H 极化的亮温差增加。

另外,随粗糙度从小变化到大粗糙度,亮温差最多只变化 15K,相对土壤水分变化引起的亮温差要小的多。因而土壤水分比粗糙度参数对积雪辐射影响更大,即地表土壤水分比粗糙度对积雪总辐射更

敏感,利用被动微波辐射计来反演土壤水分就是利用辐射计对土壤水分更敏感这一特性来实现的。

同样,随粗糙度变化的 H 极化的亮温差  $\Delta T_b$  要高于 V 极化的亮温差。

3 3 积雪颗粒对积雪覆盖地表辐射响应的影响

下面主要分析积雪自身参数——平均颗粒大小——对有一定厚度积雪覆盖的地表辐射的影响。模型模拟输入参数见表 3。颗粒半径分为 3 组:0.3mm,0.8mm,1.5mm。积雪层厚的范围为 5—300cm。

图 4 给出了不同颗粒大小(小颗粒 0.3mm,中等颗粒 0.8mm,大颗粒 1.5mm)情况下随积雪厚度变化的亮温差的变化情况,该图反映了不同频率对颗粒大小的敏感性。

表 3 随颗粒大小变化的积雪覆盖地表辐射的模拟数据

Table 3 The model inputs for snow covered surface with grain size varying

积雪温度 /K	地表温度 /K	积雪密度 /(kg /m <sup>3</sup> )	积雪厚度 /cm	平均颗粒半径 /mm	下表面粗糙度 sig cl/cm	土壤水分 /%
268.0	272.0	300	5—300	0.3 0.8 1.5	1 10	10

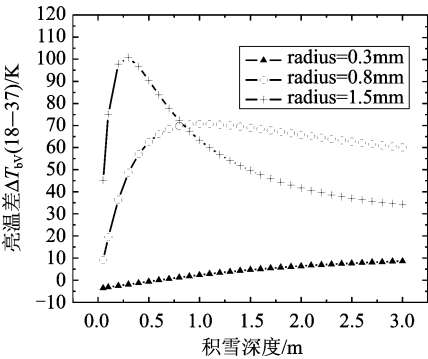


图 4 不同大小颗粒随积雪厚度变化  
V 极化亮温差的变化

Fig 4 The brightness temperature difference with  
grain size varying against snow depth

从图 4 可看出,对于不同大小颗粒,随积雪厚度增加亮温差变化趋势完全不同。不同颗粒大小对  $\Delta T_b(18-36\text{GHz})$  有很大影响,亮温差与积雪深度之间并非简单的线性关系。这与现在人们使用的半经验线性反演模型不一致。对于小颗粒(0.3mm)随积雪深度增加亮温差一直增加,可近似认为他们之间是线性关系。而当颗粒增大时,如图 4 所示,若为中等颗粒(0.8mm),随着积雪厚度增加亮温差先增后减小,对于大颗粒这种趋势更为明显。同时从图上还可看出,不同颗粒大小随着积雪深度增加,亮温差接近饱和的程度也不相同,颗粒越大饱和越快,对于大颗粒(1.5mm)不到 0.5m,亮温差已趋于饱和。

此外从图上还可看出,在小颗粒时,亮温差  $\Delta T_b(18-36\text{GHz})$  会出现负温,随着厚度增加,亮温差增加,不存在多解问题。而对于中等颗粒和大颗粒,亮温差  $\Delta T_b(18-36\text{GHz})$  则存在多解问题。若积雪深度在 0.5m 以内,则在这几种不同颗粒大小情况下均可认为是简单线性关系,但实际地表积雪深度都远远超出 0.5m 深度。因此,本文认为当前人们使用的半经验线形模型形式过于简单,不能正确反应出积雪辐射亮温特征。积雪下覆地表的介电特性和粗糙度特性均对亮温差有影响,不同颗粒大小使得亮温差与积雪深度之间并非存在简单线性关系。这

些特征在积雪深度(或雪当量)反演中都需要考虑。

4 模型验证

为了对上述干雪积雪辐射理论模型做验证,本文选用了瑞士 Weissfluhjoch 试验区的地面实验数据<sup>[20]</sup>,包括积雪参数测量和相应配套地基辐射计测量。下面对试验区的数据和情况概要介绍如下。

4.1 试验区介绍

Weissfluhjoch 位于瑞士 Davos (46°49'83"N, 9°48'62"E)。该地区地形起伏较大,地表主要由石头和岩石组成。辐射计数据包括 4 个频率,各 2 个极化,频率为 11GHz、21GHz、35GHz、94GHz。该试验区的辐射数据是由带 5 个频率线形极化的 Dicke 辐射计<sup>[21-22]</sup>提供的。辐射计工作频率为:11、21、35、48、94GHz。21、35、94GHz 3 个频率的天线是标准矩形,11、48GHz 频率是圆形喇叭天线。极化是靠绕天线轴旋转辐射计产生的。

在该实验中,辐射计固定在带旋转框的特定雪橇上,离地 160cm 高,雪橇前面的金属平板用作镜子,以减少雪橇的阴影影响。

该试验的辐射计校正是采用 Weisse<sup>[23]</sup>描述的基于倾斜性曲线<sup>[24]</sup>和黑体测量值。每次测量前后都对辐射计进行校正。选用的辐射计入射角范围从 20°到 70°,角度取样间隔为 5°。

地面数据测量与辐射计测量同步进行。地面测量数据包括积雪高度、分层特性、颗粒形状、密度、温度、介电常数及天气状况等。通常,积雪廓线参数每隔 10cm 测量一次,然而颗粒形状、介电常数和密度每层都有测量。介电常数则采用同轴共振仪测量。颗粒形状按照 Cobek<sup>[25]</sup>的标准进行分类。地面测量数据有温度、介电常数、密度和湿度剖面。温度廓线是在靠近天线视场未被动过的积雪处测量的。因此与辐射计测量的积雪温度可能会有差异。

本文选取 1995 年 12 月 21 日位于 Switzerland 的 Davos 的 Weissfluhjoch (46°49'83"N, 9°48'62"E) 的测量数据来对干雪辐射模型做验证和比较。采用

的观测角是从 20°到 70°。地面积雪测量参数见表 4。

表 4 积雪剖面参数<sup>[20]</sup>

Table 4 Snow profile data from 21 December 1995						
Layer#	$T_{\text{snow}}$ /K	$W$ /%	$\rho$ /(kg m <sup>-3</sup> )	$D$ /cm	Grain shape	
1	273.0	0.0	259.0	25.0	□	□
2	272.0	0.0	177.0	15.0	/	\
3	271.8	0.0	400.0	0.3	+	+
4	271.4	0.0	70.0	20.0	+	+

表 4 中,  $T_{\text{snow}}$  为雪层温度,  $W$  为积雪湿度含量,  $\rho$  为雪层密度,  $d$  为雪层厚度。积雪分层层数是从最底土壤层往上算。雪层总厚度是 60cm, 最上层是 20cm 厚的新雪, 往下是薄的坚硬雪, 最下层是大颗粒组成的雪。

其他观测数据是:  $T_{\text{sky}}$  (120°) [K]: 12.8 41.2 50.2 114.0  $T_s$  (积雪物理温度) [K]: 272.2 天气状况: 晴天; 空气温度 (10:00): -2.7℃; 观测时间 11:04

因而根据实验点特征和测量数据, 本文采用模型所需的输入参数为:

- 雪层密度: 0.22g/cm<sup>3</sup>,
- 颗粒半径: 0.48mm,
- 积雪厚度: 0.603m,
- 雪层温度: 272.2K,
- 地表粗糙度 (均方根高度, 相关长度): 1cm, 20cm
- 地表土壤水分: 10%

考虑到天空辐射  $T_{\text{sky}}$  的影响, 对辐射计测量的 Em issivity 做了相应的校正:

$$e = \frac{T_b - T_{\text{sky}}}{T_s - T_{\text{sky}}} \tag{2}$$

式中,  $T_b$  是观测的辐射亮温,  $T_s$  为雪层的物理温度,  $e$  是发射率。

4 2 验证结果

积雪微波辐射模型与实测数据比较结果如图 5 所示,  $x$  轴为频率,  $y$  轴为相应的雪层总发射率。曲线表示模型模拟值, 圆圈和三角形点表示地面实测值。图 5 表示 50°入射角下不同频率在 V, H 极化的比较结果。

从图 5 可知, 辐射计测量的和模型计算的积雪发射率均为频率和入射角的函数。从模拟结果和实

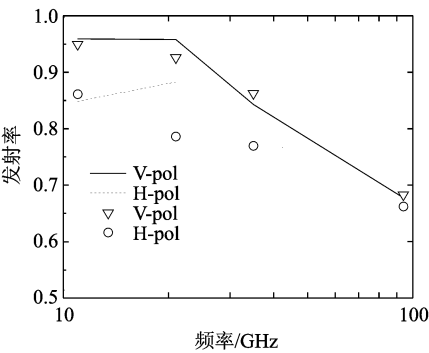


图 5 50°观测角下测量的发射率(圆圈和三角形)与模型模拟值(曲线)的比较结果

Fig 5 Em issivity versus frequency at  $\theta = 50^\circ$  Measured ( circles and triangles) and simulated ( curves) data of the snow pack of 21 December 1995

测值来看, 35GHz 以下频率的极化差异很明显。测量的小角度发射率偏高是由于地基辐射计在雪盖表面产生的阴影造成的<sup>[26]</sup>。

从比较结果和模型模拟情况来看, 地表的粗糙度特征和土壤水分状况不会影响高频 94GHz 的发射信号, 而其信号对积雪密度非常敏感。另外, 不同地表粗糙度和土壤水分对低频 11GHz 的发射影响很大, 进而表明低频信号主要受地表状况影响。在 11, 35 和 94GHz 这 3 个频率上, 辐射模型与实测数据无论是数值还是极化差趋势都吻合得很好。通常, 随频率增加, 极化差会越来越小, 这是由于地表信号减弱, 雪层信号增强的缘故。但是, 本文的模型低估了极化差, 原因可能有:

首先, 采用的理论模型假设颗粒是球形的, 因此计算的积雪体散射是与极化无关的。然而, 在实际情况下体散射在 H 极化下可能会更强, 尤其当积雪颗粒呈水平排列(新雪会有这种情况)时。此外, 更重要的是, 雪层的密度廓线用的是平均值, 假设层内密度都相同, 没有垂直变化, 因此交界面的反射率会被低估, 这对水平极化会产生很大影响。

其次, 在 21GHz 频段, 模型模拟值明显高于实测数据, 这可能是由于 21GHz 正好处于水汽吸收带, 受大气状况影响, 本文未将该因素考虑在内。另外, 可能是实测数据存在不确定性。通常, 多次散射作用会使 H 极化随角度变化下降缓慢, 而 V 极化不受影响<sup>[14]</sup>。从测量值来看, 随角度变化的极化差在 21GHz 最大, 21GHz 的 V 极化的发射率略高于 11GHz 的发射率, 而 21GHz 的 H 极化的发射率在超过 40°角后却很接近 35GHz 的发射率。显然, 这与

通常的认识相违背。

综上所述, 考虑多次散射的积雪辐射模型能很好解释实测数据, 为下一步反演积雪厚度 (或者雪当量) 提供了可靠的前向模型。

## 5 结 论

本文利用积雪辐射理论模型分析研究了积雪覆盖地表的辐射特性, 在此基础上进行了敏感性分析, 考察了不同频率和极化方式的微波发射率对土壤和积雪参数的敏感程度, 最后用实测数据对该模型做了验证。

文中分析了地表粗糙度和土壤湿度这两个地表参数对积雪总辐射和亮温差  $\Delta T_b$  (18—36GHz) 的影响。模拟结果表明, 地表粗糙度和土壤湿度对积雪总辐射亮温影响很大, 不能忽略地表粗糙度和介电特性的影响。另外, 利用模型模拟了积雪平均颗粒大小对积雪总辐射随积雪深度变化的影响。颗粒很小时 (0.3mm), 18.7GHz 频率的亮温随积雪厚度增加略有增加, 但对于 36.5GHz 无论是什么样的颗粒大小情况, 积雪深度增加, 亮温值都下降, 而且很快饱和。颗粒大小不同时, 积雪深度与亮温差之间并非简单的线性关系。只有颗粒很小时, 较接近线性关系。而对于中等颗粒和大颗粒, 随着积雪厚度增加, 亮温差存在非惟一解, 因此不能用简单的线性关系 (亮温差与积雪深度的关系) 来估算积雪深度 (或雪水当量)。

最后, 在模型理论分析的基础上, 利用地面实测数据对模型进行了验证, 模型模拟结果和趋势与实测数据基本一致。在低频主要受地表粗糙度和介电特性影响, 而在高频由于体散射增加积雪总辐射对下垫面参数渐渐不敏感, 而对积雪参数颗粒大小和密度变得敏感。因此可以利用不同频率之间的辐射差异特征来进行雪水当量反演研究。本文利用前向模型研究了积雪覆盖地表的辐射特征并对模型进行了验证, 建立了利用被动微波反演雪水当量的理论基础。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Goodison B, Walker A. Canadian Development and Use of Snow Cover Information from Passive Microwave Satellite Data [A]. Choudhury B, Kerr Y, Njoku E, et al. Passive Microwave Remote Sensing of Land-Air Interactions [C]. Utrecht: VSP BV, 1994.
- [2] Chang A T G, Foster J L, Hall D K, et al. Snow Parameters Derived from Microwave Measurements During the BOREAS Winter Field Campaign [J]. *J. Geophys. Res.* 1997, **102** (D24): 29663—29671.
- [3] Göta K, Walker A E, Goodison B E. Algorithm Development for the Estimation of Snow Water Equivalent in the Boreal Forest Using Passive Microwave Data [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2003, **24**: 1097—1102.
- [4] Singh R, Gan T Y. Retrieval of Snow Water Equivalent Using Passive Microwave Brightness Temperature Data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2000, **74**: 275—286.
- [5] Hallikainen M T, John P A. Comparison of Algorithms for Retrieval of Snow Water Equivalent from Nimbus 7 SSM/R data in Finland [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, **30**: 124—131.
- [6] Chang A T G, Foster J L, Hall D K. Nimbus 7 Derived Global Snow Cover Parameters [J]. *Annals of Glaciology*, 1987, **9**: 39—44.
- [7] Kunzi K F, Patil S, Rott H. Snow Cover Parameters Retrieved from Nimbus 7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) Data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1982, **GE 20**(4): 452—467.
- [8] Rosenfeld S, Grody N. Anomalous Microwave Spectra of Snow Cover Observed from Special Sensor Microwave Imager Measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (D11): 14913—14925.
- [9] Rosenfeld S, Grody N. Metamorphic Signature of Snow Revealed in SSM/I Measurements [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2000, **38**: 53—63.
- [10] Tsang L, Chen G, Chang A T G, et al. Dense Media Radiative Transfer Theory Based on Quasicrystalline Approximation with Applications to Passive Microwave Remote Sensing of Snow [J]. *Radio Science*, 2000, **35**: 731—749.
- [11] Wang J R, Chang A T G, Sharma A K. On the Estimation of Snow Depth from Microwave Radiometric Measurements [J]. *IEEE Trans. Remote Sensing*, 1992, **30**(4): 785—792.
- [12] Hofer R, Mätzler C. Investigation of Snow Parameters by Radiometry in the 3- to 60mm Wavelength Region [J]. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**: 453—460.
- [13] Rott H, Sturm K. Microwave Signature Measurements of Antarctic and Alpine snow [A]. In Proc. 11th EARSeL Symp [C], Graz, Austria, 1991.
- [14] Fung A K. Microwave Scattering and Emission Models and their Applications. Norwood MA: Artech House, 1994.
- [15] Tsang L, Kong J A. Scattering of Electromagnetic Waves from a Dense Medium Consisting of Correlated Mie Scatterers with Size Distributions and Applications to Dry Snow [J]. *J. EM Waves and Applications*, 1992, **6**: 265—286.
- [16] 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 [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003, **41**(1): 90—101.
- [17] Shi J, Davis R E, Dozier J. Stereological Determination of Dry Snow Parameters for Discrete Microwave Modeling [J]. *Annals of*

*Glaciology*, 1993 **17**: 295—299

[ 18] Shi J, Chen K S, Li Q, *et al*. A Parameterized Surface Reflectivity Model and Estimation of Bare Surface Soil Moisture with L-band Radiometer[ J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002 **40**( 12): 2674—2686

[ 19] Shi J, Jiang L M, Zhang L X, *et al*. A Parameterized Multi-Frequency Polarization Surface Emission Model[ J]. *IEEE TGRS*, 2005.

[ 20] Wiesmann A, Stozzi T, Weise T. Passive Microwave Signature Catalogue of Snow covers at 14, 24, 35, 48 and 94 GHz. IAP Research Report 96-8[M]. University of Bern, Switzerland, 1996

[ 21] Reber B. Distinct Microwave Signatures of Snow and Soil Related to Model Theory[D]. University of Bern, 1990.

[ 22] Wiesmann A, Amacher W, Mätzler C. FORA Manual[R]. *Research Report 95-2*. Institute of Applied Physics, University of Bern, Siedlerstr. 5, 3012 Bern, Switzerland, 1995.

[ 23] Weise T. Radiometric and Structural Measurements of Snow[D]. University of Bern, Siedlerstr. 5, 3012 Bern, Switzerland, 1996

[ 24] Mätzler C. Ground-based Observations of Atmospheric Radiation at 5, 10, 21, 35 and 94 GHz[J]. *Radio Science*, 1992 **27**: 403—415

[ 25] Colbek S. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground[A]. International Commission on Snow and Ice of the International Association of Scientific Hydrology[C]. 1990

[ 26] Wiesmann A, Mätzler C. Microwave Emission Model of Layered Snowpacks[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999 **70**: 307—316