

# 用 GPM 数据进行青藏高原雪水当量监测可行性分析

武胜利 杜今阳

(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** 在二阶积雪散射模型模拟结果的基础上,针对 GPM 的数据特点,提出一种利用 Ku 波段不同入射角下积雪散射特征差异进行雪水当量监测的方法,并以 TRMM/PR 数据为例,对青藏高原部分特征地区进行了分析,证实了该方法在理论上的可行性。

**关键词** 微波遥感;雪水当量

**中图分类号**:P237.9      **文献标识码**:A      **文章编号**:1000-3177(2006)05-0019-03

## 1 前言

青藏高原冬季积雪对东亚、东南亚以及南亚的夏季季风、降雨有直接而重要的影响,对于中国而言,青藏高原冬季积雪变化与长江流域降雨多寡之间的相关关系已经引起中外学者的广泛关注。为此,青藏高原地区积雪变化监测的重要性正在日益凸现。

使用遥感手段进行大范围积雪监测是一个很受关注的话题,对于可见光-近红外-红外遥感,归一化积雪指数(NDSI)是一个有效而使用广泛的指标,但是它有两个缺陷:一是大气影响难以消除,二是仅能体现积雪覆盖度信息而无法体现积雪深度信息。针对这两个缺陷,微波遥感都可以很好地解决。由于微波的波段特点,它可以穿透云雾并穿透一定深度的积雪,从而避免大气影响并且可以得到积雪深度、密度等相关信息。

GPM(Global Precipitation Measurement)是美国航空航天局与日本宇宙航空开发机构合作发起,欧空局、中国国家卫星气象中心等陆续加入的全球性降雨观测计划<sup>[1]</sup>。它包括 4 颗已确定的卫星(GPM Core,EGPM 等),10 颗很有可能被列入计划的卫星(DMSP F19/F20 等)以及 5 颗在轨或即将发射的卫星(TRMM,CORIOLIS 等)。该计划完成后将具备 3 小时完成一次全球降雨观测的能力。

作为 GPM 计划中的一员,TRMM 于 1997 年升空,它搭载了降雨雷达、辐射计以及可见光三种传感器,其中雷达(PR)的工作频率为 13.8GHz,入射角范围为 $\pm 18^\circ$ ,幅宽 220km,瞬时视场在天顶角情况下为 $4.3\text{km}\times 4.3\text{km}$ 。GPM Core 是 GPM 计划中的核心卫星,计划于 2009 年 10 月发射升空,它搭载了 Ku/Ka 双波段的降雨雷达(DPR)。

本文探讨在 TRMM/PR 以及 GPM Core/DPR 参数条件下进行积雪监测的可行性(本文中的积雪仅指干雪)。主要

介绍积雪覆盖地表的散射物理机制,2 阶积雪散射模型以及模拟结果,并将使用 TRMM/PR 数据针对青藏高原特定地区在时间序列上进行分析,并与 AMSR-E 的积雪产品变化趋势进行对比,以验证该方法的可行性。

## 2 积雪覆盖地表散射物理机制

在主动微波频段中,Ku 波段比较适合进行积雪监测<sup>[2]</sup>。利用 Ku 波段进行积雪监测的方法可以按照入射角的不同分为两类,一类是天顶角入射,一类是非天顶角入射。前者比较有代表性的是[3],而后者比较有代表性的是[2]。下面分别对两者的物理机制进行分析。

### 2.1 天顶角入射分析

在天顶角入射情况下,积雪的出现以及深度增加将使 Ku 波段的后向散射值减低,分析如下:

(1)雪层的双次衰减削弱了总的后向散射能量。

(2)由于积雪的出现,下垫面(土壤)的相对介电常数将由相对空气变为相对积雪,从而降低。相对介电常数的降低会直接导致后向散射能量的降低。

(3)微波进入雪层后,由于介电常数变大,波长将会相应变短,这将导致下垫面变得更加“粗糙”,在天顶角入射情况下,粗糙的散射界面将会使后向散射值降低。

### 2.2 非天顶角入射分析

在非天顶角入射情况下,积雪将会使后向散射值升高,主要有以下原因:

(1)根据 Snell 定律,非天顶角入射的雷达波在进入雪层后的折射角将会小于初始的入射角(即雷达入射角),当其他条件相同的情况下,小入射角的后向散射值更高(不考虑极端情况)。

(2)下垫面将会变得更“粗糙”(原因与天顶角入射相同),在非极小入射角情况下,粗糙的界面将会使后向散射值升高(不考虑极端情况)。当然,也有一些因素导致后向散射值降低,比如相对介电常数的降低,但是由

收稿日期 2005-10-18      修订日期 2005-11-24  
基金项目:国家自然科学基金重点项目“青藏高原近 20 年土壤水分及雪水当量的参数反演研究”(90302008/D0119)  
作者简介:武胜利(1980~),男(汉族),中科院遥感所博士研究生,主要从事微波遥感方面研究。

于冬季下垫面冻结,介电常数普遍较低,因此该因素并非主导,具体情况可见下一部分的数值模拟结果。

2.3 新方法的提出

在以上分析的基础上,我们可以看到,在 Ku 波段情况下,天顶角入射与非天顶角入射对积雪的响应恰好相反,如果用前者减去后者,结果将会对积雪的出现与加深更加敏感。下一部分将用 2 阶积雪模型进行模拟,以验证该方法的正确性。

3 理论模型与模拟结果

3.1 理论模型介绍

本研究中使用的 2 阶积雪模型基于辐射传输理论,将传感器得到的后向散射能量分为 4 个部分<sup>[4]</sup>,即积雪上表面散射、积雪体散射、积雪-土壤分界面散射、积雪-土壤相互作用。其中积雪上表面散射与积雪-土壤分界面散射使用 AIEM 模型<sup>[5]</sup>,积雪体散射使用瑞利相位矩阵进行模拟,散射体为长短轴可控的椭球体,积雪-土壤相互作用部分则分别使用上述两模型——涉及分界面散射部分用 AIEM,涉及积雪体散射部分用瑞利相位矩阵。该模型相比于 1 阶积雪模型能够更加准确地描述积雪体散射,对于 Ku 波段来说,这是相当重要的。

3.2 模拟结果与分析

考虑到自然界常见的积雪参数以及青藏高原的具体情况,参数选择如表 1

表 1 模拟输入参数

传感器参数	
频率 (GHz)	13.8
极化	VV
入射角 (°)	0°,18°
积雪参数	
深度 (m)	0~1.0 步长=0.1
颗粒直径 (m)	0.3e-3~1.0e-3 步长=0.1e-3
冰体积百分比 (%)	25
积雪表面粗糙度	均方根高度=0.1e-2m 相关长度=2.0e-2m
土壤参数	
土壤含水量 (%)	0.05
土壤粗糙度	均方根高度=0.5e-2m 相关长度=1.0e-1m

特别需要提出的是土壤含水量以及下垫面粗糙度两个参数的选择。对于土壤含水量,本研究主要关注青藏高原 12 月~1 月之间的积雪覆盖情况,在此期间,青藏高原绝大部分区域的地表温度在 0°以下,土壤处于冻结状态,在此前提下,土壤含水量设定为 5%。下垫面粗糙度的选择主要依据是国际合作项目“全球能量水循环之亚洲季风青藏高原实验”(Game-Tibet),该项目于 1997 年开始执行,于 1997 年 7~9 月以及 1998 年 4~9 月之间进行了藏北高原不同地区土壤水分、地表粗糙度以及其他大量参数的观测。通过对该项目中 7 个实测点地表粗糙度测量的统计,得到了地表均方根高

度的分布情况,如图 1 所示。由此可见,大部分地表情况的地表均方根高度位于 0~1cm 之间。因此,在模拟中使用 0.5cm 作为地表均方根高度。在此参数条件下,得到的模拟结果如图 2 所示。

图 2(a)为 0°入射角得到的后向散射模拟结果,图 2(b)为 18°入射角得到的后向散射模拟结果。我们可以从中清楚地看到,在 0°入射角情况下,总后向散射值随积雪深度的增加而逐渐减小,在 18°入射角情况下,总后向散射值则随积雪深度的加深而逐渐增加。这样的结果与我们前面的散射物理机制分析相符。

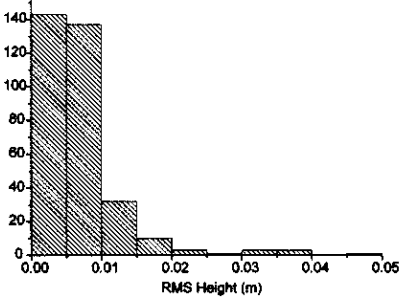


图 1 GAME-Tibet 中的地表均方根高度实测值分布

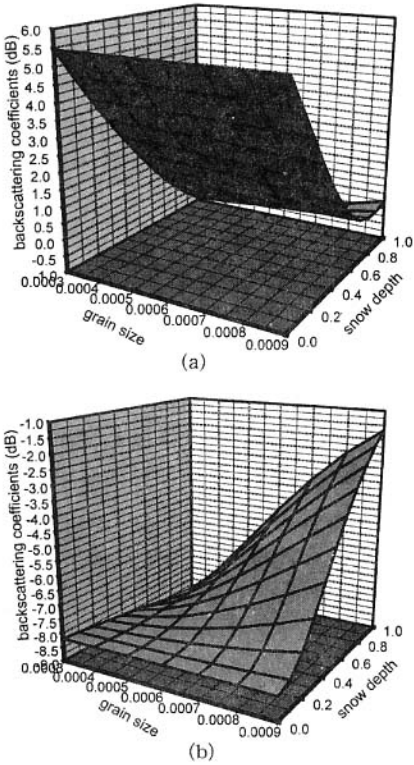


图 2 模拟结果,坐标轴分别为雪粒子直径,积雪深度以及后向散射系数

从图 2 中,我们同样可以看到积雪粒径对后向散射的影响同样显著,在实际情况下,积雪粒径除与雪层持续存在时间相关外,还与众多环境变量相关,如:温度、湿度、风速等,因此在将此理论应用于实际反演时,需要根据实测结果建立积雪粒径与上述环境变量的相关关系,从而根据不同的积雪粒径选取反演参数。

4 卫星实测数据验证

我们使用了两套数据对上述理论进行验证,分别是:

①2003 年 1 月到 2004 年 4 月的 TRMM/PR 数据;

②2003 年 1 月到 2004 年 4 月的高级微波辐射计(AMSR-E)全球 25 公里网格雪水当量产品。

验证工作选取了青藏高原 2 个特征地区:那曲、唐古拉山南部,它们分别属于高原内部冬季积雪偏少地区以及大型山脉南麓冬季主要积雪地区。

图 3 显示了 2 个地区 TRMM/PR 数据以及 AMSR-E 雪水当量产品的数间序列,其中 TRMM/PR 分别使用了 0°~1°入射角的数据以及 15°~17°入射角的数据。

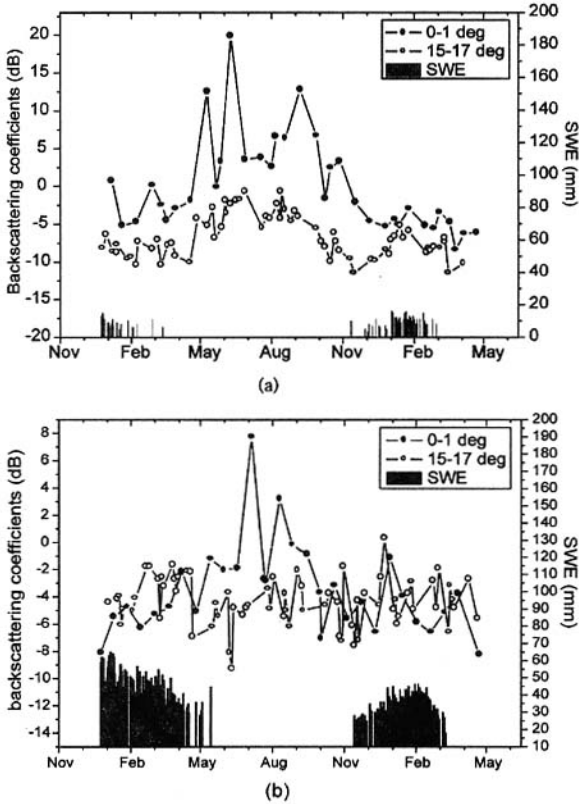


图 3 (a)那曲 (b)唐古拉山南部 TRMM/PR 与 AMSR-E 雪水当量产品对比时间序列图

从图 3 中我们可以看到,那曲地区由于冬季积雪较少,因此 0°~1°入射角后向散射值( $\sigma_{0-1}$ )始终高于 15°~17°入射角后向散射值( $\sigma_{15-17}$ ),唐古拉山南部地区是典型的冬季积雪区,因此在冬季两个角度下的后向散射值相当接近, $\sigma_{15-17}$ 在某些情况下甚至高于  $\sigma_{0-1}$ 。这样的结果我们从表 2

中可以更加清晰地看到。

表 2 那曲、昆仑山南部 2003 年冬季 ( $\sigma_{0-1}-\sigma_{15-17}(\Delta\sigma)$ )结果对比

那曲		昆仑山南部	
日期	$\sigma_{0-1}-\sigma_{15-17}$	日期	$\sigma_{0-1}-\sigma_{15-17}$
031006	12.33	031027	1.23
031017	6.42	031108	-3.78
031023	12.48	031120	0.58
031104	11.85	031128	2.83
031117	11.93	031203	-0.59
031123	9.3	031212	-2.77
031214	5.13	031221	-1.94
040102	3.02	040104	-1.43
040114	2.17	040110	3.84
040121	0.14	040120	1.49
040224	3.56	040126	-0.17
040306	2.39	040206	-0.95
040313	4.72	040229	-3.71
040319	3.54	040314	-3.22
040325	6.82	040328	0.94

从表 2 中我们可以看到,对于  $\Delta\sigma$  值而言,那曲与昆仑山南部在冬季有显著不同,那曲地区  $\Delta\sigma$  的最小值为 0.14,最大值为 12.48,平均值为 6.39;而昆仑山南部的  $\Delta\sigma$  最小值为 -3.78,最大值为 3.84,平均值为 -0.51。由此可以看出由于积雪状况的不同,  $\Delta\sigma$  存在很大的差异,从而定性的证明了我们提出的理论——利用 Ku 波段雷达天顶角与非天顶角后向散射值差异可以估算雪水当量。

5 结论与讨论

本文针对 TRMM/PR 数据提出一种反映雪水当量信息的全新方法,该方法综合考虑了天顶角入射以及非天顶角入射情况下雪层对 Ku 波段微波的不同散射特性,从而大大增加了雷达回波中的积雪信息,为利用下一步全球降雨观测计划(GPM)系列卫星数据进行积雪参数反演打下基础。

该方法同时也存在如下问题:

- (1)积雪自身参数(雪粒子直径、积雪密度)需要进一步精确刻画;
- (2)需要消除地形影响;
- (3)该方法仅在 GAME-Tibet 实验区实测地表粗糙度条件下进行了模拟验证,其他地表粗糙度条件还需要进一步验证。

下一步我们将针对积雪自身参数进行进一步研究,并用青藏高原积雪实测数据对反演结果进行验证与分析。

参考文献

1 S. W. Bidwell, W. J. Adams, I. K. Bibyk, D. F. Everett, E. A. Smith. Validation and error characterization for the global precipitation measurement [A]. IGARSS 03[C].

2 Son V. Nghiem, and W. Y. Tsai. Global snow cover monitoring with spaceborne ku-band scatterometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(10):2118~2134.

3 F. Papa, B. Legresy, N. M. Mognard, E. G. Josberger, and F. remy. Estimation terrestrial snow depth with the topex-poseidon altimeter and radiometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(10):2162~2169.

4 Jinyang Du, Jiancheng Shi and Shengli Wu. A comparison of a Second-order snow model with field observations [A]. IGARSS 03[C].

5 Wu T. D., K. S. Chen. A reappraisal of the validity of the IEM model for backscattering from rough surfaces [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4):743~753.

26℃之间,其次就是城区边缘地带,地表温度略高一点,在30~35℃之间。城区中心地带温度相对偏高,温度基本上高于40℃,部分地区达到45~50℃。东城、西城、崇文、宣武四城区平均温度为41.67℃,朝阳、海淀、丰台和石景山四城区平均温度为37.42℃,两者地表温度相差4.25℃,城市热岛效应非常明显。前门、大栅栏、西客站、东铁营以及三环西南部分等地区都表现出明显的热岛效应,仅北海、玉渊潭、紫竹院、动物园、龙潭公园和天坛等绿地集中的园林体现出了难得的“凉岛”。

## 4 结束语

Landsat TM 热红外波段空间分辨率为 120m,明显高于

MODIS 和 AVHRR ,对于地面分辨率要求较高的应用研究来说 ,比如分析城市的地气相互作用以及能量交换 ,具有明显的优势。目前 ,国内外许多学者正在致力于地表真实温度的模型反演 ,并且取得了不少成果。利用覃志豪等提出的单窗算法对 TM 影像进行温度反演 ,当所需的参数含有中等程度的误差时 ,地表温度反演的误差一般都在可接受的  $1.5^{\circ}\text{C}$  范围之内<sup>[7]</sup> ,能满足大多数应用的精度需要。本文在这里着重探讨了 TM 热红外波段  $10.4\sim 12.5\mu\text{m}$  范围内地表比辐射率的估算方法 ,然后利用单窗算法对北京城八区进行了温度反演验证 ,得到了较为合理的地表比辐射率估算和地表温度反演结果 ,该方法具有一定的推广应用价值。

## 参考文献

- 1 Qin Zhihao, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel - Egypt border region[J]. Int. J. Remote Sens. 2001, 22(18): 3719~3746.
- 2 覃志豪, Zhang M, Karnieli A 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456~466.
- 3 赵英时, 等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 科学出版社, 2003.
- 4 张仁华. 对于定量热红外遥感的一些思考[J]. 国土资源遥感, 1999(1): 1~6.
- 5 Valor E, Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African and South American areas[J]. Remote Sensing of Environment, 1996(57): 167~184.
- 6 Jimenez-Munoz J C, Sobrino J A, Paolini L. Land surface temperature retrieval from landsat TM 5[J]. Remote Sens. Environ., 2004(90): 434~440.
- 7 覃志豪, Li W, Zhang M 等. 单窗算法的基本大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003(2): 37~43.
- 8 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2003(3): 28~32.

## The Estimation of Land Surface Emissivity for Landsat TM Thermal Infrared Band

WU Hua , LI Tong

( Research Center for Remote Sensing and GIS , School of Geography , Beijing Normal University , Beijing ,100875 , China )

**Abstract** Land surface emissivity (LSE) is an absolutely necessary parameter for land surface temperature (LST) retrieval from thermal remote sensing data. At present, laboratory or field spectral measurements can only give broadband (8-14  $\mu\text{m}$ ) integrated emissivities which are different from the effective emissivity of TM thermal band (10.4-12.5  $\mu\text{m}$ ). The objective of this study was to examine the estimation of land surface emissivity equivalent to that required for LST retrieval from TM thermal band data. Using mono-window algorithm, we also present an example of LST retrieval in the paper to show the spatial variation of LST in Beijing, the capital of China. The result shows that the method can yield a reasonable estimation of LST of that area.

**Key words** : land surface temperature retrieval ; land surface emissivity ; mono-window algorithm ; Landsat TM

(上接第21页)

## The Potential of SWE Monitoring with GPM in the Tibetan Plateau

WU Sheng-li , DU Jin-yang

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

**Abstract** :This paper presents a method to monitor the snow water equivalent (SWE) change in the Tibetan plateau. The method is based on a second order snow model with the parameters of GPM data. Beside the numerical simulation, two typical areas of Tibetan plateau were chosen for the validation using the TRMM/PR data, which proved that the method is feasible.

**Key words** :microwave ; snow water equivalent