

文章编号: 1008-2786-(2014)3-307-07

# 基于微波遥感数据的雪情参数反演方法

张显峰<sup>1</sup>, 包慧漪<sup>1</sup>, 刘羽<sup>1</sup>, 郑旭荣<sup>2</sup>

(1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003)

**摘 要:** 微波遥感传感器在 36.5 GHz 通道会因雪深超过其穿透深度而出现信号饱和, 从而导致雪深被低估。针对该问题, 首先建立了 18.7 GHz 与 36.5 GHz 通道亮温差和 10.7 GHz 与 18.7 GHz 通道亮温差相结合的积雪深度分层反演新方法, 然后利用 GCOM-W1 星上搭载的 AMSR2 传感器数据估算了 2012 年 12 月至 2013 年 2 月新疆每日积雪深度。结合同期的气象站点观测数据与野外实测数据对遥感反演结果进行了评价。结果表明, 所建立模型能够很好识别新疆地区积雪的空间分布状况, 雪深的估算结果明显优于常用的 Chang 模型。

**关键词:** 积雪深度; 被动微波; 亮温差; AMSR2; 新疆

**中图分类号:** TP722.5

**文献标志码:** A

积雪作为一种重要的地球表层覆盖物, 不仅影响全球和大尺度范围气候变化、地表辐射平衡与能量交换以及水资源的利用, 还能影响局部和流域范围天气、工农业和生活用水资源、环境、寒区工程等一系列与人类活动有关的要素<sup>[1]</sup>。积雪深度作为描述积雪性质的重要参数之一, 在雪灾监测与灾情评估、气候水文模拟、地表辐射平衡、水资源评估中都发挥着至关重要的作用<sup>[2-3]</sup>。

微波遥感由于具有一定的穿透云雨的能力和全天候特性成为获取大尺度积雪覆盖与深度信息的有效方法<sup>[4]</sup>。近年来, AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer, AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS)、AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) 等一系列多频率、双极化被动微波辐射计发射升空, 为开展积雪深度、雪灾评估等方面的研究提供了长时间连续的全球范围观测数据。利用该数据在积雪动态变化监测等领域进行了大量的科研工作, 发展了多种积雪被动微波遥感模型以及雪深和雪水当量反演算法, 其中大

多数的雪深研究都是基于 Chang 等提出的“亮温梯度”半经验算法<sup>[5]</sup>。但是, 由此建立的全球雪深反演模型的参数化方案在我国西部并不完全适用<sup>[6]</sup>, 且多项研究<sup>[4, 7-8]</sup>表明当雪深超过一定深度时, 该类模型的雪深反演结果存在较大偏差, 深雪会被明显低估。同样, Tedesco 和 Narvekar<sup>[9]</sup> 研究也发现, 虽然 18.7 GHz 和 36.5 GHz 的亮温差和雪深有很强的相关性, 但会出现饱和, 当雪深到一定深度时亮温差就不再增加。因此, 如何充分利用微波传感器的不同通道获取的微波信息, 提高积雪深度的估算精度成为该研究领域的难点<sup>[10]</sup>。

本文以新疆为实验区, 利用 AMSR-E 低频通道亮温差与气象台站雪深观测数据, 通过分层模拟和统计回归方法建立适合新疆区的域雪深反演模型, 并利用 AMSR2 数据对模型精度进行检验, 以期新疆雪灾遥感监测与灾情评价提供科学依据。

## 1 研究区与数据

收稿日期(Received date): 2013-07-25; 改回日期(Accepted): 2013-08-28。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划项目(No. 2012BAH27B03 & 2012BAH27B02), 国家自然科学基金项目(No. 41071257)。[Key project by the China Ministry of Science and Technology, No. 2012BAH27B03 & 2012BAH27B02; Research grant by National Natural Science Foundation of China, No. 41071257.]

作者简介(Biography): 张显峰(1967-), 男, 四川达州人, 副教授, 博士, 主要研究领域: 生态与环境参数遥感反演、数据同化、灾害评价等。[Zhang Xianfeng (1967-), male and born in Dazhou, Sichuan Province, Associate Professor & Ph.D., Main research interests: quantitative retrieval of ecological and environmental variables from remotely sensed data, data assimilation, and disaster assessment.]

1.1 研究区概况

新疆位于  $34^{\circ} \sim 48^{\circ} \text{N}$ ,  $73^{\circ} \sim 96^{\circ} \text{E}$ , 北部为阿尔泰山, 南部为昆仑山系, 天山横贯中部, 形成南疆的塔里木盆地和北疆的准噶尔盆地, 属于明显的温带大陆性气候, 冬季降雪较多, 可占全年降水量的 15%<sup>[11]</sup>。降雪时空分布不均, 导致新疆北部阿勒泰地区、西北部塔城地区、西部伊犁地区、巴音布鲁克大草原、南疆西部山区等局部地区每年均有大的降雪, 平均雪深都在 10 cm 以上, 最深能达 60 cm 以上<sup>[11]</sup>。雪灾是新疆冬春季的主要自然灾害, 每年 10 月至次年 4 月时常发生雪灾造成大雪封山、牲畜死亡、低温冷害、交通、电力中断等, 给人民生活、生活以及生命财产带来巨大损失。

1.2 数据获取与处理

AMSR-E 被动微波辐射计搭载在 Aqua 卫星上于 2002 年发射升空, 超期服役 9 a, 并于 2011 年 5 月因故障停止运行。AMSR-E 的后继传感器 AMSR2 已于 2012 年 5 月由 GCOM-W1 (Global Change Observation Mission-Water) 卫星发射升空, 并且与 Aqua 卫星处于相同的轨道, 主要任务是建立全球的长期水循环和气候观测系统。除了新增的 7.3 GHz 通道外, AMSR2 和 AMSR-E 传感器的通道中心频率、极化方式等仪器参数设置基本一致<sup>[12]</sup> (表 1)。AMSR2 是在 AMSR-E 的基础上改进设计的, 为了提高空间分辨率, AMSR2 的天线直径由 AMSR-E 的 1.6 m 增大至 2 m, 扫描带宽由 1 457.8 km 加宽至 1 617.6 km, 亮温数据的像元采样大小由原来的 25 km 提高到 10 km, 并且新增了 7.3 GHz 通道用于消除电磁波干扰, 同时升级了定标系统。AMSR-E 和 AMSR2 传感器都能测量来自 6.9, 10.7, 18.7, 23.8, 36.5 和 89.0 GHz 六个频率的水平和垂直极化亮温数据<sup>[12]</sup>。

本研究从美国国家冰雪中心网站下载获得 AMSR-E 每日升降轨 10.7、18.7 和 36.5 GHz 的水平

和垂直极化亮温数据, 时间为 2006 至 2010 年每年 12 月 1 日至次年 3 月 1 日, 4 个积雪季共计 668 幅每日亮温影像数据, 投影方式为 EASE-Grid-North, 空间分辨率为 25 km。同时为了验证模型的合理性, 从日本宇航局 GCOM-W1 的数据服务中心下载了全球 2012-12-01—2013-03-01 的每日升降轨 L3 级亮温数据, 空间分辨率为 10 km, 投影方式为 EQR。

此外, 收集了 2006—2013 年新疆 71 个气象台站的积雪深度观测资料, 数据项包括台站号、台站地理坐标、积雪深度、最低气温及出现日期等。其中, 2006—2010 年 4 个积雪季的数据用于雪深模型的建立, 2012—2013 年的积雪数据用于雪深模型的精度分析。2013-01-12—17 在阿勒泰地区实地进行了积雪参数测量, 获取了共 27 个样方的雪深数据, 同样用于模型的误差分析。

将 AMSR-E 与 AMSR2 数据统一由 HDF 格式转换为 ENVI 标准格式, 为了解决 AMSR-E 单日升降轨数据的裂隙问题, 采用升降轨数据平均合成法<sup>[13]</sup>以获得每日可完整覆盖新疆区域的 AMSR-E 与 AMSR2 亮温数据。以气象站点的地理坐标从图像中提取新疆 71 个气象台站相应位置的像元亮温值, 为回归分析准备数据。上述预处理在 ENVI/IDL 环境下编程实现, 以便实现 4 个冬季 AMSR-E 与 AMSR2 的每日亮温数据的批处理。

2 雪深反演模型的建立

2.1 雪深与亮温关系分析

雪层越深, 雪粒对微波辐射的散射强度就越强, 而到达传感器的辐射强度就越弱; 频率越高, 散射作用也越强。36.5 GHz 通道对于积雪的散射作用相当敏感, 而 18.7 GHz 通道在一定雪深范围内的散射作用比较弱; 随着雪深的增加, 36.5 GHz 的亮温值下

表 1 AMSR-E 与 AMSR2 的仪器参数比较

Table 1 Comparison of the specification of the instrument AMSR-E and AMSR2

传感器	卫星	中心频率 /GHz	6.925	7.3	10.65	18.7	23.8	36.5	89
AMSR-E (2002.5-2011.10)	Aqua	IFOV /km × km	43 × 75	-	29 × 51	16 × 27	18 × 32	8.2 × 14.4	3.7 × 6.5
		波束宽度 /MHz	350	-	100	200	400	1 000	3 000
		灵敏度 /K	0.3	-	0.6	0.6	0.6	0.6	1.1
AMSR2 (2012.5- )	GCOM-W1	IFOV /km × km	35 × 62	35 × 62	24 × 42	14 × 22	15 × 26	7 × 12	3 × 5
		波束宽度 /MHz	350	350	100	200	400	1 000	3 000
		灵敏度 /K	0.34	0.43	0.7	0.7	0.6	0.7	1.2

降,而 18.7 GHz 通道的亮温则基本保持不变,因此,二者的亮温差越大,雪深就越深。但是当雪深达到一定深度时,36.5 GHz 的亮温不再继续下降,而在 18.7 GHz 开始与积雪相互作用产生体散射,两个通道的亮温差反而开始随积雪深度增加而减小,导致深雪区域的雪深被低估。如图 1 所示,浅雪与 18.7 GHz 与 36.5 GHz 的亮温差有较好的线性关系,相关系数平方为 0.52(图 1 a),而深雪与这两通道的亮温差之间不存在明显的相关性,且亮温差随雪深增加而减小(图 1 b)。出现这种饱和现象,是由于雪深超出了 36.5 GHz 的最大积雪穿透深度。理论上,低频通道(6.9、10.7、18.7 GHz)波长更长,其穿透能力更强,可以用来探测更深的积雪信息。有研究表明,干雪对于 6.7 GHz 几乎是“透明”的<sup>[9]</sup>,而 10.7 GHz 与 18.7 GHz 在深雪探测方面极具潜

力<sup>[14]</sup>。如图 2 所示,10.7 GHz 亮温基本上不随雪深发生变化,即使雪深超过 60 cm 也对积雪体散射不敏感;而 18.7 GHz 在雪深超过大致 30 cm 时亮温随雪深增加而递减,体散射非常明显,但在浅雪区相关性不明显,说明 18.7 GHz 对浅雪不敏感,但与超过 30 cm 左右的雪深具有良好的相关性。因此 10.7 GHz 与 18.7 GHz 的亮温差可以去除大气与温度的影响,用来探测深雪信息。

基于以上分析,本文提出了一种采用 18.7 GHz 与 36.5 GHz 亮温差和 10.7 GHz 与 18.7 GHz 亮温差相结合的分层反演积雪深度的新方法,即采用 18.7 GHz 与 36 GHz 亮温差反演浅雪区雪深,采用 10.7 GHz 与 18.7 GHz 亮温差反演深雪区雪深,以求最大限度上避免由于 36.5 GHz 饱和造成的雪深低估。

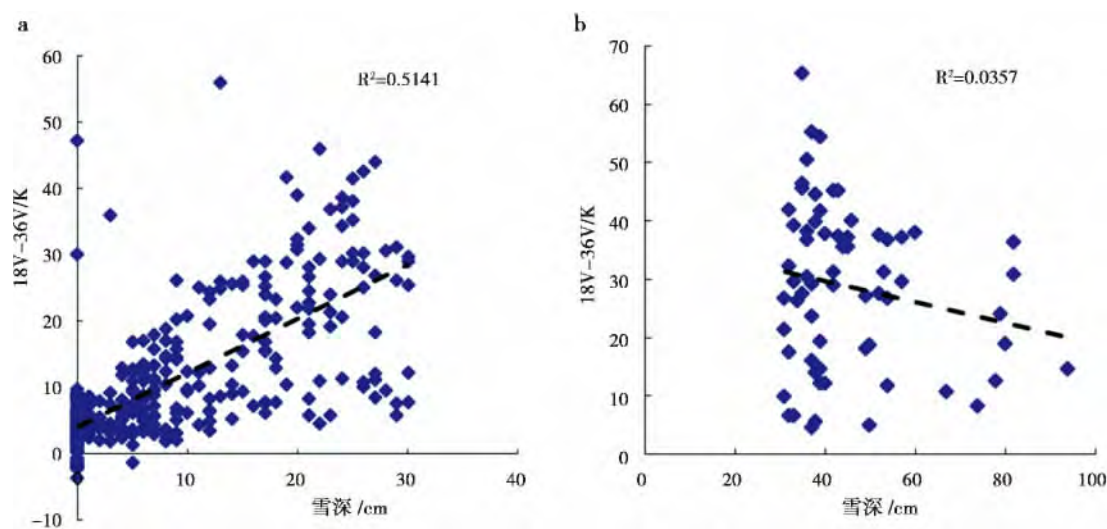


图 1 2009—2010 年 AMSR-E18.7 GHz 与 36.5 GHz 垂直极化亮温差与浅雪(a)和深雪(b)的散点图

Fig. 1 Scattering plots between TB18.7V - 36.5V and snow depth less than 30 cm (a), snow depth greater than 30 cm (b)

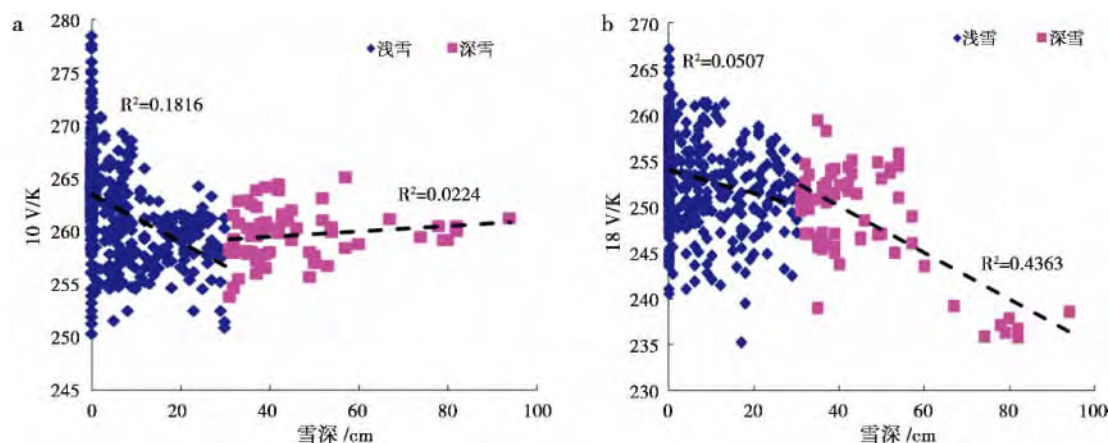


图 2 2009—2010 年 AMSR-E10.7 GHz 和 18.7 GHz 垂直极化亮温差与浅雪(a)与深雪(b)的散点图

Fig. 2 Scattering plots between TB10.7V - 18.7V and snow depth less than 30 cm (a), snow depth greater than 30 cm (b)

2.2 新疆雪深反演模型的建立

降雨、冻土、寒漠具有与积雪类似的散射特征，因此可能干扰积雪深度的反演。为了获得可信的积雪样本，需要剔除这些相似的非积雪像元。此外，湿雪中含水量较高，会造成雪层对微波辐射的吸收作用增强，体散射急剧下降，导致雪深反演精度降低。同时，积雪中液态水也影响雪粒径与形状。Grody 的微波积雪识别方法<sup>[13]</sup>利用散射、极化的亮温差以及亮温本身的不同，分离不同的散射体，逐步剔除沙漠、冻土和降水的影响。Grody 只使用了上午的 AMSR-E 降轨数据以避免下午积雪融化形成湿雪，考虑到空间的连续性我们同时使用了升轨与降轨的数据，因此在 Grody 算法基础上，还采用 Walker 的方法<sup>[15]</sup>添加了湿雪判别。为了使该方法更好地适应新疆的区域性，根据气象站点观测值对判识因子的阈值进行了相应的调整。

规则 1 散射指数:  $scat = \max(Tb18V - Tb36V, Tb23V - Tb89V)$

规则 2 湿雪判别:  $Tb36V - Tb36H \geq 10$  且  $scat < 5$

规则 3 寒漠判别:  $scat > 5, Tb18V - Tb36V \leq 13, Tb36V - Tb89V \leq 13$  且  $Tb18V - Tb18H \geq 18$

规则 4 冻土判别:  $scat > 5, Tb18V - Tb36V \leq 7, Tb23V - Tb89V \leq 10$  且  $Tb18V - Tb18H \geq 8$

规则 5 降水判别:  $scat > 5, Tb23V > 260$  或  $Tb23V \geq 168 + 0.49 \times Tb89V$  或  $260 \geq Tb23V \geq 254$  且  $scat \leq 7$

该方法用于筛选有效数据以及确定雪盖分布范围，制作雪盖掩膜雪深反演结果，避免积雪的误判带来的误差。

将地面气象站点的雪深数据与采用上述筛选方法得到的有效样本的每日亮温差( $Tb18V - Tb36V, Tb10V - Tb18V$ )进行拟合分析。将样本分为深雪与

浅雪，我们发现，当雪深大约超过 30 cm 时，18.7 GHz 与 36.5 GHz 的亮温差出现饱和，而 18.7 GHz 亮温开始受散射影响发生衰减（图 1、图 2）。Markus 的研究<sup>[16]</sup>也表明当雪水当量大约超过 80 mm，也就是雪深 30 cm 左右，可视使用 10.7 GHz 与 18.7 GHz 亮温差的分界点。因此，对  $Tb18V - Tb36V$  与小于 30 cm 的站点实测雪深数据和  $Tb10V - Tb18V$  与大于 30 cm 的站点实测雪深数据，分别进行回归统计分析，计算 12 月、1 月、2 月的深雪与浅雪的拟合系数，建立不同月份的雪深分层反演模型（表 2）。

2006—2010 年期间 12 月未发生特大降雪，且 12 月处于积雪季的初期，雪深达到 30 cm 以上的样本很少，因此未能建立 12 月的深雪模型，仅建立了浅雪模型用于反演 12 月雪深。由表 2 可知，各模型的  $R^2$  值均较大说明回归方程的拟合优度较好，证明  $Tb10V - Tb18V$  和  $Tb18V - Tb36V$  分别与深雪、浅雪的深度之间存在较强的相关性，而各模型的回归系数均通过了显著性水平为 0.005 的 F 检验，表明相关关系显著，所构建的模型合理。

3 结果分析与精度评价

3.1 结果分析

由于 AMSR-E 传感器 2011 年 10 月不能再提供数据，因此本文利用与其波段设置几乎相同的后继传感器 AMSR2 数据来反演 2012 年 12 月至 2013 年 2 月的新疆积雪信息，并检验表 2 中所建立模型的合理性与可用性。对每日雪深反演结果进行最大值合成，代表该月的积雪状况，生成了 12 月、1 月和 2 月的积雪月产品数据（图 3）。由图可见，新疆北部的阿尔泰山、天山中东部、伊犁河谷等地区雪层厚度较大，积雪深度可达 30~50 cm。而新疆南部塔里

表 2 亮温差与新疆气象站点实测雪深回归分析

Table 2 Regressive analysis between the brightness temperature difference and the snow depth data collected by the weather stations in Xinjiang

月份	雪深类别	雪深范围/cm	样本数	回归方程	R <sup>2</sup>	F 统计值
12 月	浅雪	≤	533	$SD = 0.78 \times (Tb18V - Tb36V) - 0.99$	0.48	496.63
	深雪	>30	3	-	-	-
1 月	浅雪	≤30	535	$SD = 0.66 \times (Tb18V - Tb36V) - 0.88$	0.64	949.32
	深雪	>30	27	$SD = 2.62 \times (Tb10V - Tb18V) + 28.64$	0.58	34.73
2 月	浅雪	≤30	523	$SD = 0.37 \times (Tb18V - Tb36V) + 1.73$	0.38	316.34
	深雪	>30	36	$SD = 2.04 \times (Tb10V - Tb18V) + 32.57$	0.48	30.86

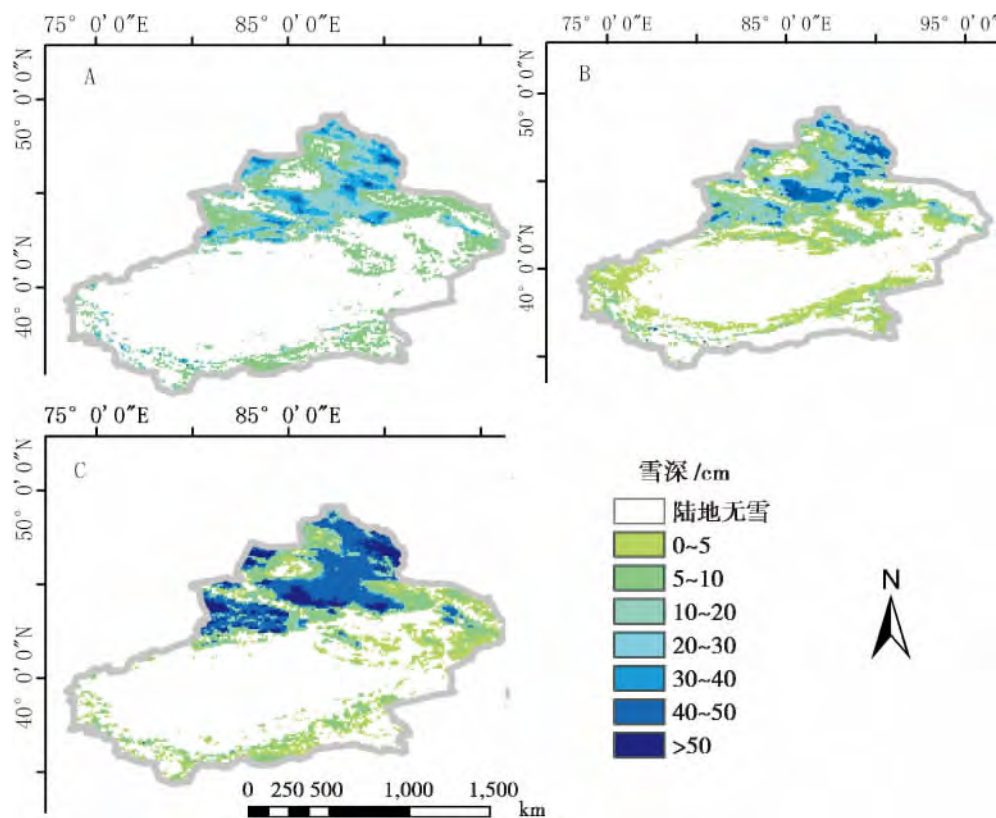


图 3 新疆地区 2012 年 12 月—2013 年 2 月最大积雪深度分布

Fig. 3 Monthly maximum snow depth mapping in Xinjiang area from December 2012 to February 2013

木盆地、北部准葛尔盆地以及新疆东部的吐哈盆地积雪深度很小或者无雪。该结果与气象站点观测结果以及新闻报道的情况基本相符,说明本文所建立的新疆雪深反演模型,可以较好地利用微波亮温数据估算新疆 2012 年 12 月至 2013 年 2 月的雪深信息,从而为积雪监测与雪灾评价提供较为准确的积雪参数。

3.2 精度分析

为了验证本文提出的模型合理性,利用研究区 71 个气象台站观测的雪深数据对反演结果进行精度评价,并将我们建立的雪深模型同 Chang 算法结果进行了交叉对比分析。通过剔除部分雪深数据缺失的站点,共得到 431 对统计样本可供比较研究,站点实测雪深范围从 0 ~ 56 cm 波动(表 3)。

由于本文建立的雪深模型是基于不同时间的样本按月建立的,因此需要对每个月模型逐个进行精度评价。由于 2006 至 2011 年的 12 月缺失深雪样本,仅利用 18.7 GHz 与 36.5 GHz 通道亮温差建立了雪深模型,其平均误差为 -7.27 cm, RMSE 为 12.62 cm,说明反演结果低估了 12 月的实际雪深,再次证明了单一使用 18.7 GHz 与 36.5 GHz 通道亮

温差对深雪的反演效果不理想。1 月、2 月模型采用了低频数据,精度明显提高,平均误差和 RMSE 分别为 -1.59 cm 和 3.75 cm,相关系数较 12 月有所提高,分别为 0.75 和 0.77。为了比较的一致性,我们只选择 2013 年 1 月与 2 月的样本参与与 Chang 模型的交叉比较验证。本文所提出的模型的整体平均误差与 RMSE 分别为 -1.71 cm 和 12.41 cm(样本数 = 431),误差明显低于 Chang 算法的平均误差和 RMSE,分别为 8.33 cm 和 18.83 cm。该结果表明,在新疆区域本文所建立的雪深反演模型整体精度较 Chang 算法有很大提高。

表 3 利用 AMSR2 数据反演的雪深结果精度分析

Table 3 Assessment of modeled snow depth estimation from AMSR2 data

模型	样本数	平均雪深 /cm	最大雪深 /cm	平均误差 /cm	RMSE /cm
12 月	145	11.71	46	-7.27	12.62
1 月	141	12.82	56	-1.59	10.47
2 月	145	13.57	52	3.75	13.84
整体	431	12.7	56	-1.71	12.41
Chang	431	12.70	56	8.33	18.83



2013-01-12—17 我们在新疆阿勒泰地区进行了实地考察,并获取了雪深、雪粒径等积雪参数实测数据。对比实测雪深与反演结果,二者的变化趋势较为吻合,平均误差为  $-1.05\text{ cm}$ ,均方根误差为  $7.59\text{ cm}$ ,相关系数为  $0.77$ 。偏差主要出现在雪深较深的阿勒泰西部与北部部分测点,这些地区地形起伏较大,地面积雪覆盖的非均一性很强,以及风对积雪的二次搬运以及对表面特征的改变都影响了模型反演结果,造成反演结果的误差相对较大。此外,本文模型是用 AMSR-E 数据建立起来的,但对 2012 年 1 月的雪深反演实验采用的是 AMSR-E 的后继传感器 AMSR2,二者之间存在由像元大小差异带来的尺度效应,也会带来雪深的估算误差。但由图 4 可见,本文模型的反演结果与地面实测雪深数据存在很好的一致性。

#### 4 结论与讨论

本文建立了一种既采用  $18.7\text{ GHz}$  与  $36.5\text{ GHz}$  通道亮温差,又采用  $10.7\text{ GHz}$  与  $18.7\text{ GHz}$  通道亮温差来分层反演积雪深度的新方法。利用低频通道数据很好地解决了  $36.5\text{ GHz}$  通道信号饱和造成的雪深低估问题,构建了适合于新疆区域的雪深反演模型。采用该方法和 AMSR2 传感器数据反演了 2012 年 12 月至 2013 年 2 月的每日积雪深度,并结合同期的气象观测数据与野外实测雪深数据对结果进行了验证与精度评价。基于本文模型的估算结果与新疆的雪深实际分布情况吻合较好。本文模型的反演精度明显优于 Chang 模型结果,尤其在雪深小

于  $30\text{ cm}$  的雪范围,雪深反演的精度较高;在大于  $30\text{ cm}$  的深雪范围,本文模型的雪深估算结果也优于 Chang 模型的结果。因此,本文提出的分层反演方法改进了新疆地区大于  $30\text{ cm}$  的深雪反演精度。

针对深雪的微波遥感反演方法还有待进一步探索,有必要通过物理试验确定  $36.5\text{ GHz}$ 、 $18.7\text{ GHz}$ 、 $10.7\text{ GHz}$  以及  $6.9\text{ GHz}$  的准确积雪穿透深度,及其体散射发生的量化条件,探索低频微波在雪深反演中的研究潜力。由于积雪的物理性质会随时间发生变化,在今后的工作中需要考虑雪密度与雪粒径随时间的动态变化,以建立积雪参数的动态反演模型。此外,当雪深小于  $5\text{ cm}$  时的反演困难也需要进一步研究<sup>[17]</sup>。

#### 参考文献(References)

- [1] Hou Huishu, Yang Hongye. A general introduction to MODIS snow products and its researching application[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(2): 252-256 [侯慧殊, 杨宏业. MODIS 积雪产品及研究应用概述[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 252-256]
- [2] Li Xin, Che Tao. A review on passive microwave remote sensing of snow cover[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 487-496 [李新, 车涛. 积雪被动微波遥感研究进展[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 487-496]
- [3] Mao Kebiao, Tang Huajun, Zhou Qingbo, et al. Supervision and analysis on southern China's snow disaster in 2008 by using passive microwave data AMSR-E[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2009, 30(1): 46-50 [毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 利用被动微波数据 AMSR-E 对 2008 年中国南方雪灾监测分析[J]. 中国农业资源与区划, 2009, 30(1): 46-50]
- [4] Dai, Liyun, Che Tao, Wang Jian, et al. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 127: 14-29
- [5] Chang, A T C., Foster J L, et al. Snow water equivalent estimation by microwave radiometry[J]. Cold Region Science Technology, 1982, 3(5): 259-267
- [6] Che Tao, Li Xin. Retrieval of snow depth in china by passive microwave remote sensing data and its accuracy assessment[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(5): 301-306 [车涛, 李新. 利用被动微波遥感数据反演我国积雪深度及其精度评价[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(5): 301-306]
- [7] Yu Hui, Zhang Xuetong, Wang Wei, et al. Monitoring model and accuracy evaluation of snow depth in Qinghai province based on AMSR-E data[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 255-261 [于惠, 张学通, 王玮, 等. 基于 AMSR-E 数据的青海省雪深遥感监测模型及其精度评价[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 255-261]

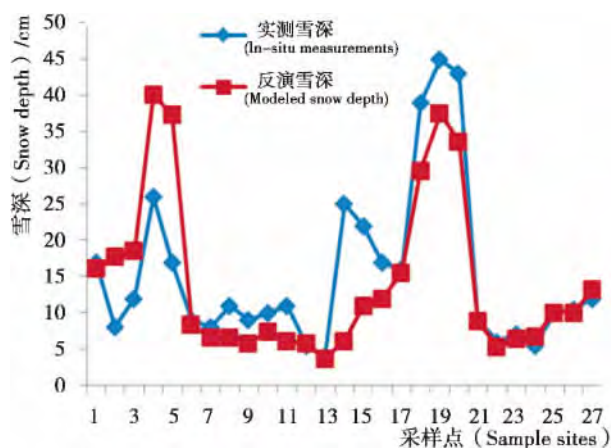


图 4 2013 年 1 月野外实测雪深与反演雪深的结果对比

Fig. 4 Comparison between in-situ measurements and modeled snow depth in January 12 to 17, 2013

- [8] Lu Xinyu, Wang Xiuqin, Cui Caixia, et al. Snow depth retrieval based on AMSR - E data in northern Xinjiang region, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 40 - 47 [卢新玉, 王秀琴, 崔彩霞, 等, 基于 AMSR - E 的北疆地区积雪深度反演 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 40 - 47]
- [9] Tedesco M, Narvekar P S. Assessment of the NASA AMSR - E SWE product [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(1): 141 - 159
- [10] Derksen, C. The contribution of AMSR - E 18.7 and 10.7GHz measurements to improved boreal forest snow water equivalent retrievals [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2701 - 2710
- [11] Cui Caixia, Yang Qing, Wang Shengli. Comparison analysis of the long-term variations of snow cover between mountain and plain areas in Xinjiang region from 1960 to 2003 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(4): 486 - 490 [崔彩霞, 杨青, 王胜利. 1960 - 2003 年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 486 - 490]
- [12] Imaoka K, Kachi M, Kasahara M, et al. Instrument performance and calibration of AMSR - E and AMSR2 [G]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan, 2010, XXXVIII: 13 - 16
- [13] Grody N C, Basist A N. Global identification of snow cover using SSM/I measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(1): 237 - 249
- [14] Derksen, C. The contribution of AMSR - E 18.7 and 10.7GHz measurements to improved boreal forest snow water equivalent retrievals [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2701 - 2710
- [15] Walker A E, Goodison B E. Discrimination of a wet snow cover using passive microwave satellite data [J]. Annals of Glaciology, 1993, 17: 307 - 311
- [16] Makus T, Powell D, Wang J. Sensitivity of passive microwave snow depth retrievals to weather effects and snow evolution [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(1): 68 - 77
- [17] Armstrong R L, Brodzik M J. Recent northern hemisphere snow extent: a comparison of data and derived from visible and microwave satellite sensors [J]. Geophysics Research Letters, 2001, 28: 3673 - 3676

## Snow Parameter Estimation from Microwave Remote Sensing Data

ZHANG Xianfeng<sup>1</sup>, BAO Huiyi<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, ZHENG Xurong<sup>2</sup>

(1. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Water Conservancy, Shihezi University, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** The snow depth may be under estimated from the passive microwave remote sensing data at the frequency of 36.5 GHz due to the saturation of the microwave signal detected by the remote sensor, thus, a new segmental modeling approach for snow depth estimation was created by combining the brightness temperature differences between 18.7 GHz and 36.5 GHz channels and between 10.7 GHz and 18.7 GHz channels. Afterwards, the brightness temperature data acquired by the AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) sensor onboard the GCOM - W1 satellite were used to test the model and the snow depth of Xinjiang from December 2012 to February 2013 was estimated. The observations collected by the Xinjiang meteorological stations and field in-situ measurements of snow depth were employed to assess the estimation. The results show that the segmental approach can identify the spatial distribution of snow covers and accurate estimation of snow depth can be achieved, which obviously outperforms the result using Chang's algorithm.

**Key words:** snow depth; passive microwave; brightness temperature difference; AMSR2; Xinjiang