

基于 MEMLS 的查找表法雪深反演^①

刘 羽^② 张显峰^③ 于泓峰

(北京大学遥感与地理信息系统研究所 北京 100871)

摘 要 利用分层积雪微波辐射模型(MEMLS)和积雪先验知识建立了新疆地区冬季雪深与特定微波频率通道亮温差(BTD)之间的查找表,并针对不同的地形以及坡向因素对积雪参数进行了修正以提高 MEMLS 输出精度。然后利用先进微波扫描辐射计 2(AMSR2)被动微波遥感数据反演了 2013 年 1 月和 2014 年 1 月整个新疆地区的每日积雪深度信息,并使用气象台站的观测数据以及实地测量数据进行精度验证。结果表明,该模型对雪深的估算精度要优于常用的 Chang 模型,可较好地用于反演新疆地区的积雪深度信息。

关键词 分层积雪微波辐射模型(MEMLS),先进微波扫描辐射计(AMSR),雪深,查找表,亮温差(BTD)

0 引 言

积雪是地球表面重要的覆盖物。在北半球的冬季,约有 34% 的地球表面被积雪覆盖,面积可达 5000 万 km²^[1]。积雪对于地表水循环、气候变化、生态环境以及人类的生产生活关系巨大。从全球大尺度范畴而言,大范围的积雪可以影响气候变化、地表辐射平衡与能量交换乃至水资源利用;从小尺度范围而言,积雪可以影响天气、水资源、环境、工程建设等一系列与人类活动息息相关的要素^[2]。过量而长期的积雪会掩盖草场致使牲畜冻饿死亡,低温冷害会造成农作物减产绝收,形成雪灾^[3]。我国雪灾主要发生在北方牧区,受灾区域多为偏远地点,一旦爆发灾害,如何进行准确评价和及时援救,是一个迫切而严峻的问题。因此,及时准确地提取积雪分布与积雪深度信息具有重要意义^[4,5]。

目前监测积雪的途径主要有地面积雪常规观测和卫星遥感监测两种主要方式。传统的积雪深度观测依靠气象、水文站点观测,数据获取难度大且时空上不连续,难以满足对大范围积雪监测的需求;卫星遥感手段能够快速、周期性地获取多尺度、多时相、多光谱的每日空间连续的积雪信息,而且可通过模型反演雪盖、雪深、雪水当量、积雪状态等信息,逐渐

成为一种重要的观测手段。卫星遥感方法中的被动微波遥感因有微波穿透性强的优势,在冰雪遥感中占有重要地位,已应用于雪盖、雪深、雪水当量等反演中^[4]。20 世纪 70 年代末以来,研究者们发展了多种反演雪深和雪水当量的算法,但此算法大都基于统计原理,采用地面实测数据与遥感微波观测量之间的统计关系建立针对不同区域的反演模型^[2,6,7]。这些模型往往在空间区域难以外推,在时间上也因降雪过程的复杂性而导致反演精度降低,难以适用于某一具体区域,因而需要结合影响积雪微波辐射特性的积雪参数与遥感过程,建立普适性更强的机理-半机理模型来更好地反演积雪深度信息^[6]。本研究针对雪灾频发的新疆地区,提出了一种基于分层积雪微波辐射模型(microwave emission model of layered snowpacks, MEMLS)的查找表雪深反演方法,利用先进微波扫描辐射计 2(advanced microwave scanning radiometer 2, AMSR2)传感器数据对 2013 年 1 月和 2014 年 1 月新疆地区的每日积雪深度进行了反演与验证。

1 研究区及数据处理

1.1 研究区概况

研究区为新疆地区(位于欧亚大陆中部,中国

① 国家支撑计划重点项目(2012BAH27B02,2012BAH27B03)和新疆兵团(2014AB021)资助项目。

② 男,1989 年生,硕士生;研究方向:生态与环境遥感研究。

③ E-mail: xfzhang@pku.edu.cn

(收稿日期:2014-04-29)

西北,北纬 34°—48°,东经 73°—96°),面积约 166 万 km²,属于温带大陆性气候,是西伯利亚寒流进入我国的大门之一,西风气流将大西洋的水汽送至新疆上空,遇到北方南下的强冷空气,易形成强降雪。新疆冬季降雪较多,降雪时空分布不均,水平区域分异突出。新疆年平均积雪期长达 120 天,雪灾是当地冬春季主要的自然灾害。

1.2 数据获取与处理

本研究使用的数据包括被动微波传感器 AM-SR2 数据以及气象台站观测数据和野外测量的采样数据等实测数据。通过温度计、电子称、直尺以及自制的量雪筒等测量工具,我们对冬季北疆积雪参数进行了实地测量,气象站点则对积雪深度等参数进行观测。

(1) AMSR2 数据获取与预处理。从日本宇航局 GCOM-W1 卫星的数据服务中心下载了 2013 年 1 月和 2014 年 1 月的每日升降轨 L3 级亮温数据,空间覆盖范围为全球尺度,像元重采样为 10km。经格式转换后升降轨合成并裁剪出新疆区域的数据集。

(2) 地面数据获取。于 2014 年 1 月 5 日至 11 日在新疆阿勒泰地区进行了实地考察与积雪测量实验,获取了雪深、雪粒径、雪表温度、雪密度等实地测量数据。同时,从中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 获取了新疆 71 个台站 2013 年 1 月的旬值观测资料。

2 雪深反演模型的建立

被动微波辐射计所获得的亮温主要来自大气、雪盖以及雪盖下地物和土壤的能量辐射。其中,大气对卫星携带的 AMRS2 微波辐射计的几个频率通道均影响很小,可忽略不计。积雪的电磁辐射特性会随雪盖厚度、结构以及液态水含量的变化而变化。理论和试验研究均表明:雪盖的微波亮温随积雪深度的增加而减小;最后土壤向上的微波辐射会被地表覆盖着的积雪散射,雪层越深,散射作用越强,因此,到达传感器的辐射强度越弱。故深雪区域的微波亮温低,而浅雪区域的亮温高^[6]。雪深增加会导致亮温降低的这种负相关关系就是被动微波遥感反演雪深算法的理论依据^[7]。

目前利用被动微波进行雪深反演的模型大多基于 NASA(美国宇航局)算法,也称 Chang 算法,即在固定雪粒径、密度等参数条件下,对辐射传输模型的模拟结果做线性拟合,得到雪深与 18GHz 和 37GHz

通道亮温差(brightness temperature difference, BTD)的线性关系,属于经验统计模型,缺少对机理的认知及利用。这主要是因为积雪对微波的散射作用受诸多因素影响,包括雪深、雪密度、雪粒径以及雪温等,变量数量多且变化范围大,不利于建立统一的雪深反演模型。尤其是雪粒径参数及亮温的变化率与雪粒径有很大的关系;其在降雪时根据当时的气象和地理条件会出现分布差异,而且会随着时间的推移发生显著变化。因此,本研究通过实地测量以及气象观测资料等确定研究区域的积雪参数,再采用分层积雪微波辐射模型(MEMLS)对不同参数下的积雪微波辐射亮温差(BTD)进行模拟,从而建立较为详尽的 BTD 查找表,最终将卫星传感器获得的通道 BTD 代入查找表,获得实际雪深的反演估计。

2.1 MEMLS

MEMLS 是一个针对多层积雪的被动微波辐射传输模型,其适用频率范围在 5 ~ 100 GHz。它使用六流(six flux)近似来描述雪层内的多次散射和吸收过程,同时考虑了各积雪层之间的界面散射^[8]。Mätzler 等^[9]对 MEMLS 进行了扩展,经过扩展以后的模型用 Born 近似来计算散射系数。扩展后的 MEMLS 是一个完全基于物理机理的微波辐射传输模型,它的优点在于对积雪的层数没有限制,适用频率范围较宽,而且计算速度快,是一个精巧而实用的模型。

模型 MEMLS 的结构如图 1 所示,在此模型中,积雪被划分为 n 层, T_b 为积雪表面亮温, T_0 为地面温度, S_0 为积雪-地表界面反射率, S_j 为第 j 层积雪

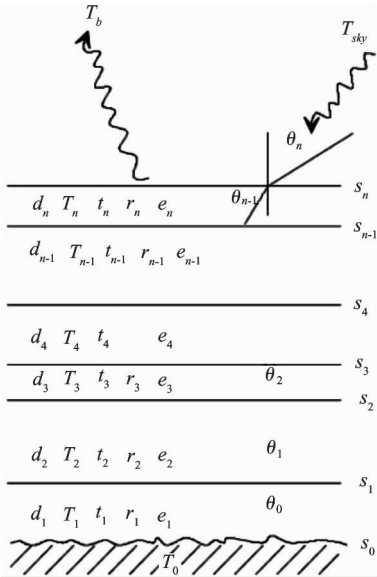


图 1 多层积雪的微波辐射传输^[9]

的上表面反射率, d_j 、 T_j 、 r_j 、 e_j 、 t_j 分别表示第 j 层积雪的厚度、温度、内部反射率、密度和透射率, T_{sky} 为天空亮温, θ_i 为辐射在第 i 层雪与 $i-1$ 层雪之间的界面处的折射角。

MEMLS 需要以下参数来计算积雪的微波辐射: 积雪层数、各层雪温、各层雪密度、各层厚度、各层指数相关长度、各层单位体积液态水含量、地表温度、积雪盐度。为研究方便, 各层单位体积液态水含量和积雪盐度均取固定值, 下面就其他的参数取值进行讨论。

2.2 积雪层数和雪层厚度

MEMLS 支持多层积雪的微波辐射传输计算。在实际的降雪过程中, 由于多次降雪导致积雪的分层现象较常见。一般出现分层的积雪, 层与层之间的积雪参数和物理性质均有较大差异。我们认为, 用铁锹铲开积雪对纵剖面进行观察时, 若出现肉眼可以辨别的分界线, 积雪即存在分层现象。各雪层的积雪参数不同, 但同一雪层内部可认为相对均质。

在实地考察中, 我们发现一般 15cm 以下的积雪较少出现分层现象, 而且即便出现分层, 层与层之间的物理参数也较为接近, 因此, 为了减少计算复杂度又不失一般性, 可近似认为 15cm 以下的积雪不存在分层现象; 同样, 30cm 以下的积雪可分为顶、底两层。根据 Dai 等^[10]的研究, 新疆地区冬季积雪层数很少超过三层。因此, 我们将积雪层数的上限定为 3。同时在建立查找表时, 根据积雪层数的不同分开建立, 即总共建立针对单层、双层、三层积雪情况下的三张查找表。

在建立查找表时, 为减少计算量, 步长选为 2cm, 单层查找表雪层厚度上限为 20cm; 双层查找表中, 顶层与底层厚度上限也为 20cm。有研究指出, 当积雪分为三层时, 一般中层厚度会大于顶层和底层^[10], 故三层查找表中, 底层与顶层厚度上限同样为 20cm, 中层厚度上限为 40cm, 即模拟的最大雪深为 80cm, 可满足新疆地区绝大部分情况下雪深反演的需要。

2.3 雪温和地表温度

雪温也会影响积雪发出的微波辐射。Kelly 等认为, 雪温可以近似为常数^[11], 而 Tsutsui 等则称其与地表温度相同^[12]。Dai 等在实地考察中发现, 在雪深小于 30cm 时, 雪温与雪深存在一定的线性关系, 当雪深大于 30cm 雪温变幅较小, 本文取雪温与雪深关系如下^[10]:

$$T_s = T_a + 0.71SD \quad (SD < 30) \quad (1)$$

$$T_s = -2 \quad (SD \geq 30) \quad (2)$$

式中: T_s 为雪温, 单位为摄氏度; T_a 为当日最低气温, 单位为摄氏度; SD 为雪深, 单位为 cm。同时, 可近似地认为地表温度即为当日最低温度, 这样每日最低气温可由卫星遥感或气象站点数据获得。

2.4 雪密度

雪密度会随着时间迁移而发生变化, 总体来说, 新雪向陈雪转换的过程也是积雪的密实化和密度不断增大的过程。底层积雪密度还会因受到上层积雪自重压力作用而增大, 所以雪密度会随积雪时间而逐渐增大, 而且在不同的天气和地理条件影响下, 变化速率不一。一般情况下, 平原地区密度小于丘陵地区, 顶层积雪小于底层积雪, 新雪小于陈雪。不过没有明显的地域分异规律, 主要影响为时间因素。

有研究发现, 垂直方向上密度的非均匀性对积雪微波遥感反演的影响不大^[13]。因此根据野外考察以及相关研究, 本文按照积雪时间和雪层对雪密度取不同的值(表 1)。

表 1 雪密度取值表(单位: g/cm³)

反演时段	顶层	中层	底层
12 月 31 日之前	0.11	0.15	0.2
1 月 1 日—1 月 31 日	0.13	0.17	0.215
2 月 1 日—2 月 28 日	0.15	0.195	0.235
3 月 1 日—3 月 31 日	0.17	0.235	0.27
4 月 1 日之后	0.17	0.235	0.27

当积雪为单层时, 取顶层雪密度; 为双层时, 取顶层和中层密度。在 2014 年 1 月的野外考察中, 测得的雪密度均值为 0.134g/cm³, 此次考察总体取样点雪深较浅, 分层现象不明显, 可近似认为均为单层积雪, 与表中取值较为吻合。

2.5 指数相关长度

指数相关长度并非可直接测量的物理量, 而是经由雪密度和雪粒径计算求得。与雪密度类似, 雪粒径也会随时间而变化。在自然状态下, 新雪向陈雪变化过程中, 粒径会逐渐增大。通常上层积雪的粒径小, 而底层的粒径大。其变化规律与雪密度类似, 而且在不同的天气和地理条件影响下, 变化速率不一。相比雪密度, 雪粒径受天气因素和雪龄(积雪保持时间)的影响更为明显, 雪粒径对积雪微波辐射的影响也比雪密度更为显著。

由于变化规律类似雪密度, 因此参照雪密度建立的雪粒径的取值表如表 2 所示。

表 2 雪粒径取值表(单位:mm)

反演时段	顶层	中层	底层
12 月 31 日之前	0.4~0.7	0.5~1.2	1.0~2.0
1 月 1 日—1 月 31 日	0.4~0.7	0.7~1.5	1.5~2.5
2 月 1 日—2 月 28 日	0.5~1.1	1.0~2.0	2.0~3.0
3 月 1 日—3 月 31 日	0.7~1.5	1.5~3.0	3.0~4.0
4 月 1 日之后	0.7~1.5	1.5~3.0	3.0~4.0

当积雪为单层时,取顶层雪粒径;为双层时,取顶层和中层粒径。本文利用了文献[14]中提出的用雪粒径和雪密度计算相关长度的公式。根据 Mätzler 的研究^[15],算出相关长度后再乘以常数0.75 即可得到指数相关长度。公式如下:

$$P_{ex} = 0.75P_c$$
$$P_c = 4v(1 - v)/S$$
$$S = 2N$$
$$N = 2 \times a/n$$

(3)

式中: P_{ex} 为指数相关长度, P_c 为相关长度, S 为单位体积雪粒表面积, v 为冰与雪的体积比例(冰的密度取 917kg/m³), N 为交界密度, a 为假想立方体边长, n 为立方体一条边上的雪粒数, ρ 为雪密度。

实地观察可以发现,雪粒多呈柱状,其短轴取值

范围从长轴的 2/3 到与长轴相等变化。那么随机取 100 个雪粒,其雪粒径符合表 2 某范围内的雪粒随机取 100 个;每个雪粒径值又对应 100 个短轴值(从长轴的 2/3 到与长轴相等);假想一个立方体其中囊括了这 10000 个雪粒,就可以根据雪密度和雪粒体积算出该立方体体积,进而求得其边长。

简要对照表见表 3,引自 Dai 等^[10]的研究。

2.6 建立雪深与亮温差之间的查找表

具体实现过程如下:采用分层的积雪微波辐射模型(MEMLS)对不同积雪参数下的积雪微波辐射亮温差进行模拟,从而建立较为详尽的亮温-积雪参数查找表,最终通过实地测量以及历史资料等确定当地雪参数及其时间变化,再将卫星传感器获得的通道亮温差代入查找表,获得实际的雪深结果。

为了减小误差与计算简便,本研究使用18.7GHz和36.5GHz通道温度亮温差建立查找表。但是 Tedesco 和 Narvekar 的研究表明,当积雪很深时,该亮温差会趋于饱和,灵敏度下降^[16]。因此,在雪深大于 40cm 时换用10.7GHz和18.7GHz通道亮温差来反演雪深。为记述方便,将18.7GHz和36.5GHz通道温度亮温差记为 TBD1,10.7GHz和18.7GHz通道亮温差记为 TBD2。

表 3 指数相关长度取值表(单位:mm)

雪密度(g/cm ³)	雪粒径(mm)				
	0.1~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~3.0
0.10	0.046	0.085	0.118	0.146	0.184
0.15	0.057	0.105	0.145	0.179	0.227
0.20	0.065	0.119	0.164	0.204	0.257
0.25	0.070	0.128	0.177	0.220	0.277
0.30	0.073	0.134	0.185	0.229	0.290

如前文所述,由于积雪层数的不同,建立了三张分别对应单层、双层和三层积雪的查找表。那么选择合适的查找表无疑是正确反演雪深的一个重要步骤。由于18.7GHz和36.5GHz通道温度亮温差和雪深存在线性关系,所以可通过它们的亮温差初步确定雪深取值范围,从而确定积雪分层情况并选择相对应的查找表。例如:单层查找表的亮温差上限为 13K,而双层查找表的亮温差下限为 9K,所以当亮温差落在 9K 与 13K 区间内时,就需要同时在两张查找表内查找对应雪深。具体算法如下:

TBD1 ≤9K:选用单层查找表;
9K < TBD1 ≤13K:同时选用单层和双层查找表;
13K < TBD1 ≤20K:选用双层查找表;
20K < TBD1 ≤25K:选用双层和三层查找表;
TBD1 >25K:选用三层查找表。
TBD1 >40K 时,使用 TBD2 对雪深进行计算。
基于 MEMLS 建立亮温差与雪深参数之间查找表的具体算法流程见图 2。

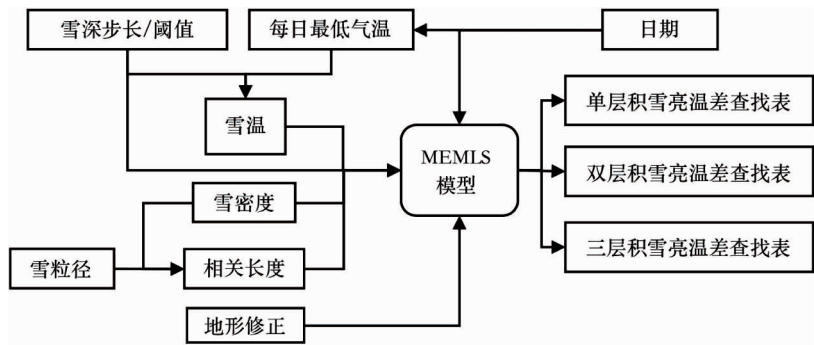


图2 建立积雪深度查找表算法流程图(据 Dai 等^[10]修改)

3 结果分析

3.1 地形影响的修正

本研究用2014年1月获取的地面实测数据的雪深与雪粒径、雪密度数据作为参照,其中1/3的样点数据用于建模,2/3的数据用于模型检验,结果如图3所示。对比结果可以看出,两者的变化趋势和数值大小吻合较好,平均误差为0.523cm,均方根误差为5.247cm,相关系数为0.91。偏差主要出现在雪深较大的几个测量点,可能是由于传感器的像元

空间分辨率较粗,导致像元内极值点被平滑所致。还有,测量期间没有下过新雪,所以可能存在风对积雪的二次搬运现象。最后,在测量中可发现平原和丘陵地区的积雪参数存在较为明显的差异,平原地区的反演精度较高。同时在迎风坡上测得的雪粒径和雪密度普遍偏大,因此考虑利用新疆地区的数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,根据海拔以及坡度的变化范围,对平原、丘陵和山区进行区分,而且利用坡向数据,标记出坡向为西和北的迎风坡,对不同地形的雪粒径和密度进行分别处理。

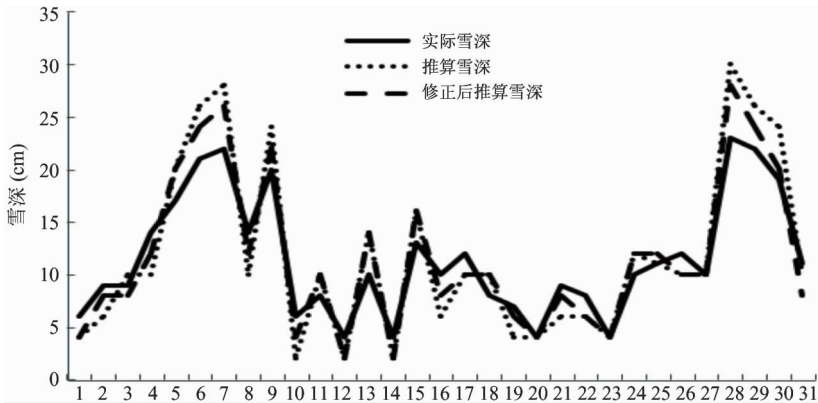


图3 2014年1月新疆实测雪深、反演雪深与改进后模型反演雪深对比图

经过实地考察实验,发现平原、丘陵以及山区的雪粒径以及雪密度存在一定的线性关系,根据野外调查获得的经验统计,如下处理方法效果较为理想:(1)平原地区:雪粒径和雪密度不变;(2)丘陵非迎风坡面:雪粒径和雪密度均乘以1.2;(3)丘陵迎风坡面:雪粒径和雪密度均乘以1.3;(4)山区:雪粒径乘以1.5,雪密度乘以1.4。

修改后的模型反演结果见图4。改进后的模型平均误差为0.426cm,均方根误差为3.753cm,确定系数为0.93。均较原模型有所提高。

3.2 结果分析

利用 AMSR2 数据与经过地形校正后的 MEMLS 模型,建立了雪深与亮温差的查找表,以此方法反演了2014年1月每日的新疆积雪深度分布,并采用最大合成法获得了2014年1月的最大积雪深度分布图(图4)。可以看出,新疆北部阿尔泰山、南北天山以及天山中部等地区积雪厚度较深,而新疆南部塔里木盆地以及新疆东部部分地区积雪深度很小乃至无雪。该结果与新疆地区积雪实际分布情况基本相符,说明模型正确无误,基本上可以用来反演新疆地区积雪的空间分布情况。

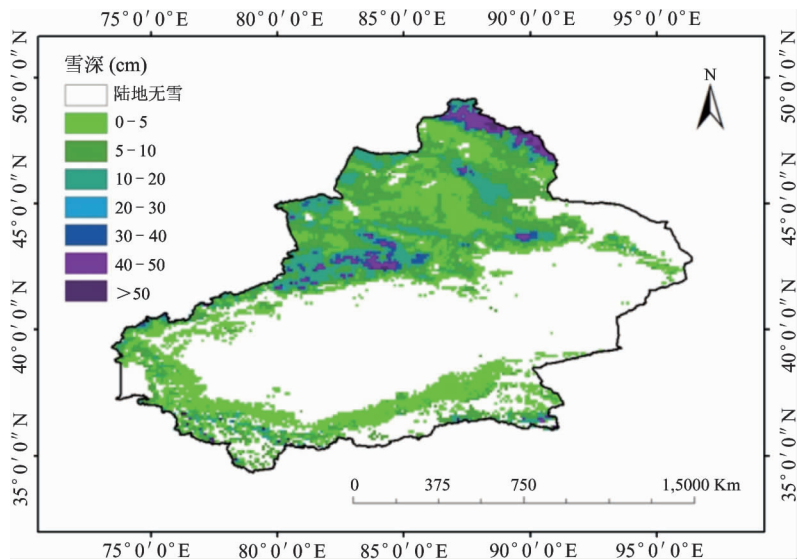


图 4 新疆地区 2014 年 1 月最大积雪深度分布图

3.3 精度验证

由于地面气象站点观测的积雪深度数据为每旬的最大值,所以将 2013 年 1 月的每日雪深进行了旬最大合成,利用研究区 71 个气象台站观测的积雪深度数据和对应的雪深反演值进行精度验证,同时将模型同 Chang 算法进行了对比分析。共有 141 对样本参与了验证分析,站点实测雪深范围从 0 至 56cm 波动。评价结果见表 4。可以看出,无论是平均误

差还是绝对误差乃至均方根误差 (root mean square error, RMSE), MEMLS 模型均优于 Chang 算法。MEMLS 的平均误差为 -1.01cm, 绝对误差则为 4.28cm, 均低于 Chang 算法的 4.39cm 和 8.32cm; Chang 算法的 RMSE 为 13.68, MEMLS 模型则为 8.34, 说明在新疆区域, 本文提出的雪深反演模型整体精度要大大优于 Chang 算法。

表 4 雪深反演模型精度分析

模型	样本数	平均雪深 (cm)	最大雪深 (cm)	平均误差 (cm)	绝对误差 (cm)	RMSE (cm)
MEMLS	141	12.68	56	-1.01	4.28	8.34
Chang	141	12.87	56	4.39	8.32	13.68

4 结 论

本文建立了一种基于分层积雪微波辐射模型 (MEMLS) 通过事先建立查找表来反演积雪深度的算法, 以解决一般积雪模型多为经验统计模型, 缺少对机理的认知, 估算精度较低等缺点。同时, 地形起伏地区的雪深反演精度会受地形以及与地形有关的风力搬运影响, 因此, 我们对雪粒径等参数进行了适当修正, 以提高 MEMLS 的输出精度。利用该方法估算了 2013 年 1 月和 2014 年 1 月的每日积雪深度, 并结合同期的气象站点观测数据以及野外考察所得的雪深实测数据对结果进行了精度评价。结果发现, 模型反演的雪深分布与新疆地区的实际分布

基本一致, 模型精度较好, 明显优于 Chang 算法, 可以用于反演新疆地区的积雪分布。

在野外考察中, 我们发现积雪分层现象其实是较为复杂的。同样深度下, 由于降雪时的气象条件、形成积雪后的气象条件、两次降雪之间的间隔时间等因素的差别, 积雪分层的情况变化很大。由于研究条件所限, 本文只是简单地按照深度划分了分层的情况, 这一点在以后的工作中可以进行更为深入的研究。而且, 雪参数的时空变化规律也并非如本文中所提出的那样简单, 尤其是雪密度和雪粒径的分布更为复杂, 有待于今后的进一步研究。

参考文献

[1] Robinson D A, Dewey K F, R H R. Global snow cover

- monitoring: an update. *Bulletin American Meteorology Society*, 1993, 74: 1669-1689
- [2] 侯慧姝, 杨宏业. MODIS 积雪产品及研究应用概述. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 252-256
- [3] 刘彤, 闫天池. 我国的主要气象灾害及其经济损失. 自然灾害学报, 2011, 2: 90-95
- [4] 黄晓东, 梁天刚. 牧区雪灾遥感监测方法的研究. 草业科学, 2005, 12: 10-16
- [5] 史培军, 陈晋. RS 与 GIS 支持下的草地雪灾监测实验研究. 地理学报, 1996, 4: 296-305
- [6] Matzler C. Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover. *Remote sensing Review*, 1987, 2: 259-391
- [7] Hall D, Sturm M. Passive microwave remote and in-situ measurements of arctic and subarctic snow cover in Alaska. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 38: 161-172
- [8] Wiesmann A, Mätzler C. Microwave emission model of layered snowpacks. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70: 307-316
- [9] Mätzler C, Wiesmann A. Extension of the microwave emission model of layered snowpacks to coarse-grained snow. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70: 317-325
- [10] Dai L Y, Che T, Wang J, et al. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127: 14-29
- [11] Kelly R, Chang A, Tsang L, et al. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 230-242
- [12] Tsutsui H, Koike T, Graf T. Development of a dry-snow satellite algorithm and validation at the CEOP reference site in Yakutsk. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, (85A): 417-438
- [13] 车涛. 积雪属性非均匀性对被动微波遥感积雪的影响. 遥感技术与应用, 2013, 28(1): 27-33
- [14] Davis R, Dozier J. Stereological characterization of dry alpine snow for microwave remote sensing. *Advances in Space Research*, 1989, 9(1): 245-251
- [15] Mätzler C. Relation between grain-size and correlation length of snow. *Journal of Glaciology*, 2002, 48(162): 421-466
- [16] Tedesco M, Narvekar P S. Assessment of the NASA AMSR-E SWE product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 3(1): 141-159

Snow depth estimation using a lookup table method based on MEMLS

Liu Yu, Zhang Xianfeng, Yu Hongfeng

(Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

Based on a microwave emission model of layered snowpacks (MEMLS) and a *priori* knowledge of snowpacks, a lookup table approach was created between the winter snow depth and the brightness temperature difference (BTD) of two specialized microwave frequency channels in Xinjiang area. Topographic and slope modifications were then applied to the snow parameters such as particle size, snow density and temperature, to improve the MEMLS. The method was then used to derive the daily snow depth in January of the years of 2013 and 2014 in Xinjiang area from the advanced microwave scanning radiometer (AMSR) 2 data. After that the observatory data from the weather station and in-situ measurements of snow parameters in the same time period were utilized to validate the modeled snow depth data. The result shows that the estimation of the snow depth using the proposed approach is better than that using the well known Chang algorithm, thus the proposed approach is applicable for the snow depth inversion in Xinjiang region.

Key words: microwave emission model of layered snowpacks (MEMLS), advanced microwave scanning radiometer (AMSR), snow depth, lookup table, brightness temperature difference (BTD)