

X 波段在南极地区穿透深度的技术研究

王冬红¹, 刘卓², 王意军³, 李佳², 刘艳阳³, 郭磊², 陈筠力³

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

3. 上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘要: 高精度极地数字高程模型 (DEM) 对于我国极地研究和探索具有重要意义。德国空间局开发的分布式合成孔径雷达干涉 (InSAR) 测绘卫星 TanDEM-X 已经被证明是获取大范围高精度 DEM 的有效工具。X 波段在冰雪表面具有一定的穿透性, 会导致极地 DEM 存在偏差。目前国内外针对 X 波段在极地冰雪表面的穿透研究还很少。本文利用 TanDEM-X 单发双收干涉数据生成高分辨率南极冰雪地区 DEM, 通过与同季节的高分辨率光学 DEM (REMA) 差分来估计 X 波段穿透深度。实验结果表明: 靠近 Mellor 冰川下游的 Lambert 盆地中部冰盖表面穿透深度大部分为 0.5 m, 少数地区可达到 2 m 以上; Lambert 冰川下游的冰流表面大部分为 1~2 m 左右; 山区冰雪表面可达 3.9 m。高穿透值多数分布在高海拔内陆地区, 而低穿透值多分布在冰流和低海拔沿海地区。穿透深度随地表含水量升高而降低。估计 X 波段穿透深度是明确 TanDEM-X 卫星在极地测绘精度的前提, 对于优化后续国产分布式 SAR 测绘星座极地工作模式有一定的促进作用。

关键词: 南极; X 波段; 冰雪穿透; TanDEM-X; 合成孔径雷达干涉 (InSAR)

中图分类号: TP 79; TN 957.52 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2021.01.011

Research on X-Band Penetration Depth in Antarctica

WANG Donghong¹, LIU Zhuo², WANG Yijun³, LI Jia², LIU Yanyang³,
GUO Lei², CHEN Junli³

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

3. Shanghai Satellite Engineering Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The precise polar digital elevation model (DEM) is of great significance for national polar research and exploration. The distributed synthetic aperture radar interferometric (InSAR) mapping satellite TanDEM-X developed by the German Space Agency has been proved to be an effective tool for obtaining a wide range and high precise DEM. However, the DEM over polar regions has deviation due to the penetration of X-band into the snow and ice surface. At present, there are few researches on the penetration of X-band in polar regions. The depth of X-band penetration is estimated in the Lambert basin, Antarctica by differencing the high-resolution Antarctic ice and snow DEM generated from TanDEM-X bistatic interferometric data with the REMA (reference elevation model of Antarctica) DEM from the same season. The results show that most of the penetration depth over the ice sheet surface near the down-stream of Mellor glacier is 0.5 m. A small part of the area has observations larger than 2 m. The Lambert Glacier (ice stream) has observations around 1-2 m. However, in mountainous areas the observations can be up to 3.9 m. Since the penetration depth decreases with the water content in the snow/ice layer, most of the high penetrations are found over inland areas with high altitudes, while the low penetrations are found over ice flow and coastal areas with low altitudes. The estimation of the X-band penetration depth is the premise of determining the polar mapping accuracy of TanDEM-X images, and to some extent can help to optimize the working mode of subsequent domestic distributed SAR mapping satellite constellation in polar regions.

Key words: antarctica; X-band; penetration; TanDEM-X; InSAR

收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41904006); 上海航天科技创新基金 (SAST2018-042); 湖南省自然科学基金 (2019JJ50761)

作者简介: 王冬红 (1977—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为航天器总体技术。

通信作者: 李佳 (1986—), 男, 讲师, 主要研究方向为 InSAR 理论与应用、冰川遥感。

0 引言

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是南极冰盖变化监测和南极科考的基础数据,获取高精度高分辨率DEM一直是南极研究中的重要环节,但南极地理位置和自然环境非常特殊,地面测绘工作很难顺利开展。20世纪70年代出现的卫星测高技术是获取极地地形数据的重要手段。1978年,由美国航空航天局(NASA)研制的海洋测高卫星SeaSat成功发射。1983年,ZWALLY等^[1]利用该卫星的测高数据生成了南纬72°以北、分辨率为20 km的南极DEM。1985年,ZWALLY等^[2]又利用GeoSat雷达高度计数据,将南极DEM的分辨率提升至10 km。20世纪90年代,欧洲航天局(ESA)成功发射了ERS-1和ERS-2卫星。1994年,BAMBER等^[3]利用ERS-1的测高数据建立了分辨率为20 km的南极DEM,覆盖了80%的南极大陆。1997年,BAMBER和ZWALLY等^[4-5]又生成了分辨率为5 km的南极DEM(JLB97 DEM)。1999年,美国伯德极地研究中心(BPRC)发布了高精度、无缝南极DEM(RAMP)。目前该DEM已经发展到了第2版(RAMPv2),RAMPv2覆盖南纬63°至南纬90°,水平分辨率为200 m~1 km不等^[6]。进入21世纪后,越来越多的极地测高卫星出现,极大地推动了南极地形测绘的发展。美国在2003年发射了极地冰雪测量卫星ICESat-1卫星,在2018年又成功发射ICESat-2卫星。2007年,美国冰雪数据中心利用ICESat-1的测高数据制作了南纬86°以北、分辨率为500 m的南极DEM,即ICESat DEM^[7]。2009年,结合ERS-1和ICESat-1两种数据,BAMBER和GRIGGS等^[8-9]建立了分辨率为1 km的南极DEM,即Bamber 1 km DEM。2018年,极地地理空间中心(PGC)结合WorldView-1、WorldView-2、WorldView-3以及GeoEye-1立体像对制作了南纬88°以北、分辨率为8 m的南极DEM,即The Reference Elevation Model of Antarctica (REMA)^[10]。除了REMA以外,各种南极DEM空间分辨率非常低。在山区或坡度较大位置,低分辨率往往意味着低精度。REMA是第一个分辨率高于10 m的南极DEM,但该DEM除“极洞”外,还存在较多数据空洞。

1974年,GRAHAM^[11]首次提出应用合成孔径雷达干涉(InSAR)技术测量地形。经过40多年的发展,InSAR已经成为较为成熟的形变监测技术,

但在地形测绘方面应用并不多。究其原因,传统InSAR大多采用重复轨道干涉模式,在两次成像间隔内发生的地表散射特性变化和大气变化会严重影响DEM的精度。针对这种情况,德国空间局在2007年和2010年分别发射了TerraSAR-X(TSX)和TanDEM-X(TDX)卫星。这两颗星组成分布式SAR星座,可以通过单发双收的任务模式获取干涉像对。由于主从影像获取间隔仅有几秒,地表散射特性变化、大气延迟以及冰川形变带来的影响可忽略不计^[12-14]。而且TanDEM-X影像采用X波段,测量精度相比更长的C或L波段要高一些。目前已有一些研究应用TanDEM-X单发双收影像对获取南极冰雪表面高程。

TanDEM-X卫星分别在2013年和2014年完成整个南极的首次和二次影像采集。2014年,ROTT等^[15]利用TanDEM-X单发双收干涉数据生成新DEM,分析了2011—2013年南极半岛北部出口冰川体积变化和物质平衡。2018年,KIM等^[16]利用TanDEM-X单发双收干涉数据生成南极洲西部Thwaites冰架DEM,监测分析冰川的近期厚度变化。但即便是较短的X波段,在南极冰雪表面也会穿透一定的深度。由于InSAR获取的高程代表相位中心的位置,会比光学摄影测量或激光测高等手段获取的高程偏低,而上述TanDEM-X极地应用研究没有考虑X波段穿透冰雪引起的高程偏差^[17]。

微波穿透能力与冰雪的物理特性密切相关。南极环境恶劣,实地测量穿透深度极难开展^[18]。在此背景下,本文利用InSAR技术对TanDEM-X单发双收影像对进行迭代干涉处理,生成高分辨率DEM产品^[19],然后将新DEM与REMA进行差分,获取X波段在南极冰雪表面的穿透深度大小和分布特点。

本文工作是提高TanDEM-X极地高程产品绝对精度的重要一环。同时TanDEM-X作为当今优秀的分布式SAR星座,对国产分布式SAR测绘卫星发展具有重要的借鉴意义。X波段穿透深度改正是准确评估TanDEM-X极地测绘精度,进而优化国产卫星和传感器工作参数设置(例如入射角、空间基线)的前提之一。因此,本研究在一定程度上还能服务于国产分布式SAR测绘卫星发展。

1 研究区域和数据介绍

1.1 研究区域

东南极 Lambert 冰川-Amery 冰架系统是南极冰盖最大的冰流系统之一,占据整个东南极冰盖面积的 16%^[20]。Lambert 盆地是整个 Lambert 冰川-Amery 冰架系统的内陆覆盖区,包括 3 个子区,即 Amery 冰架西部盆地、Amery 冰架东部盆地以及 Lambert 中部盆地。本文的研究区域位于 Lambert 中部盆地。该盆地主要由 Lambert 冰川、Mellor 冰川以及 Fisher 冰川的下游构成。上述 3 条冰川在此地汇合,共同涌入 Amery 冰架。Lambert 冰川-Amery 冰架系统物质平衡状态对南极冰盖有着举足轻重的影响,而 Lambert 中部盆地是东南极冰盖-冰架-海洋物质平衡体系中的关键部位之一,因此,持续更新其 DEM 具有重要意义。本文在靠近 Mellor 冰川下游和 Lambert 冰川下游的位置各选了一块研究区,具体位置如图 1 所示(图中矩形 A 和 B 为本文采用的 TanDEM-X 影像覆盖区域)。

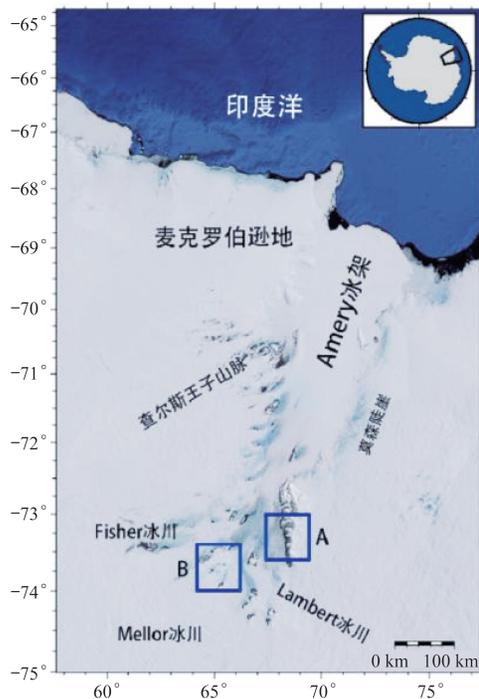


图 1 研究区域图示意图

Fig.1 Map of the study site

1.2 研究数据

1.2.1 TanDEM-X 影像

TDX 是 TSX 的姊妹星,两者性能基本一致。

在执行收集全球 DEM 生产数据任务阶段,两星采用螺旋轨道编队飞行,空间基线可以在 150~500 m 之间调整。在单发双收模式(也叫双站模式)下,两星接收信号的时间仅相隔几秒,从而极大地削弱了时间去相干对干涉图质量的影响。基于 TanDEM-X 单发双收影像对生产的全球 DEM 在分辨率和精度两个方面均要优于以往的全局 DEM,例如 SRTM DEM 和 ASTER DEM。对于空间分辨率为 12 m 的产品,官方的垂直相对精度优于 2 m,水平位置相对精度优于 3 m。德国空间局分发的 TanDEM-X 单发双收干涉对影像经过了配准^[21],可以直接干涉成图。单景影像大致覆盖 30~50 km 范围,分辨率约为 3 m。本文采用两个 TanDEM-X 单发双收干涉对,影像位置如图 1 所示,获取日期分别为 2012 年 10 月 14 日和 2012 年 12 月 30 日,基本参数见表 1。

表 1 本文采用的 TanDEM-X 单发双收干涉对

Tab.1 TanDEM-X interferometric pairs used in this paper

覆盖区域	获取日期	空间基线/m	入射角/(°)
图 1 所示 A 区	2012-10-14	114	31.71
图 1 所示 B 区	2012-12-30	108.08	27.06

1.2.2 REMA

REMA 是目前分辨率最高的南极 DEM,分 8 m 和 2 m 分辨率两种产品。该产品经由 Worldview 系列和 GeoEye-1 立体像对通过光学摄影测量方法生成,并通过 ICESat-1 和 CryoSat-1 测高数据的精度校正。2 m 分辨率的 REMA 是 8 m 分辨率 REMA 过采样生成的。REMA 覆盖了 88°S 以北南极地区。但如上所述,目前版本中除了“极洞”空白之外,还有许多“空洞”区域。本文研究区 A 和 B 的 REMA 是由 2015 年和 2016 年的 10 月—3 月(南极夏季)的光学立体像对生成,与我们的 TanDEM-X 影像获取月份一致。

1.2.3 ICESat-2

2018 年 9 月 15 日,NASA 在范登堡空军基地成功发射了冰云和陆地高度卫星-2(ICESat-2)^[22],旨在测量极地冰川、冰盖、冰架以及海冰的表面高度变化,采集地表三维信息,并测量植被冠层高度。ICESat-2 搭载的 ATLAS 测高系统采用了微脉冲多波束光子计数激光雷达技术,共发射 6 束脉冲,分

3组平行排列,来产生更多的地形信息,使用 532 nm 的波长探测,每秒发射 10 000 个激光脉冲。2019 年 5 月 28 日,NASA 首次发布了 ICESat-2 全球数据,测高数据是从 2018 年 10 月 13 日开始采集,ICESat-2 测量范围覆盖全球,陆地冰川的空间分辨率是 20 m,重访周期为 91 d。本文研究区 A 和 B 分别使用的是 2018 年 10 月和 12 月的数据,与上述 REMA 数据以及 TanDEM-X 影像获取月份一致。

2 研究方法

2.1 基于 TanDEM-X 单发双收影像对的 DEM 获取

TSX/TDM 双星系统的成像几何如图 2 所示。根据图 1 中的几何关系,图 2 中, R_1 和 R_2 分别表示 TerraSAR-X 和 TanDEM-X 两颗卫星到地面斜距, B 是空间基线距离, α 表示空间基线与水平方向的倾角, H 是主传感器对地距离, h 表示地面点的高度, λ 为雷达波长。

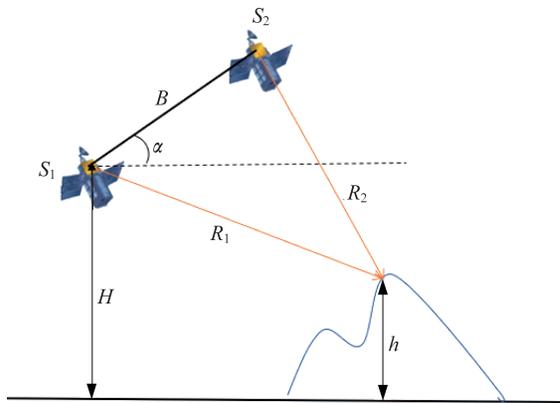


图 2 TerraSAR-X/TanDEM-X 星座干涉成像几何

Fig.2 Imaging geometry with TerraSAR-X/TanDEM-X satellite constellation

对于单发双收的 TanDEM-X 影像对来说,主辅影像时间间隔极短,大气延迟相位以及形变相位可忽略不计。因此,干涉相位仅有如下 3 部分组成:

$$\varphi = \varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (1)$$

式中: φ_{top} 为地形相位; φ_{flat} 为平地相位; φ_{noise} 为噪声相位。平地相位可以通过去平地效应消除,噪声相位通过滤波消除。地形相位可以通过式(2)转成高程,再经过地理编码转成地理坐标系下的 DEM 产品。注意单发双收模式下斜距实际是普通重轨模

式的 2 倍:

$$h = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{R \sin \theta}{B_{\perp}} \varphi_{\text{top}} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,假设某点的高差不变,波长越短会引起相位差变化越大,反映在干涉图中表现为干涉条纹更加密集。TanDEM-X 采用的 X 波段比 ERS、ASAR 采用的 C 波段和 PALSAR 采用的 L 波段更短。因此,解缠 TanDEM-X 干涉图更困难。在解缠过程中,相邻点之间的相位差不能超过 $\pi/2$ 。对于 TanDEM 生成的干涉图,相邻点之间的相位差超过 $\pi/2$ 的可能性很高(尤其是地形起伏较大的地区)。此外,TanDEM-X 干涉图条纹在山地十分密集。为了使干涉图条纹稀疏化^[14],提高相位解缠的精度,本文利用 8 m 分辨率的 REMA 辅助解缠。原理是基于 REMA 模拟平地相位和地形相位,然后将其从干涉图中去除,降低条纹密集程度。去除地形和平地相位后,使用最小费用流方法对差分后的干涉图进行解缠,将解缠相位转换为高程差并与 SAR 坐标系下的 REMA 相加,将高程相加结果进行地理编码,得到新的 DEM 产品。若 DEM 产品不符合分辨率要求,将新生成的 DEM 产品作为外部 DEM 重复上述过程,迭代直至符合要求为止。具体步骤如图 3 所示。

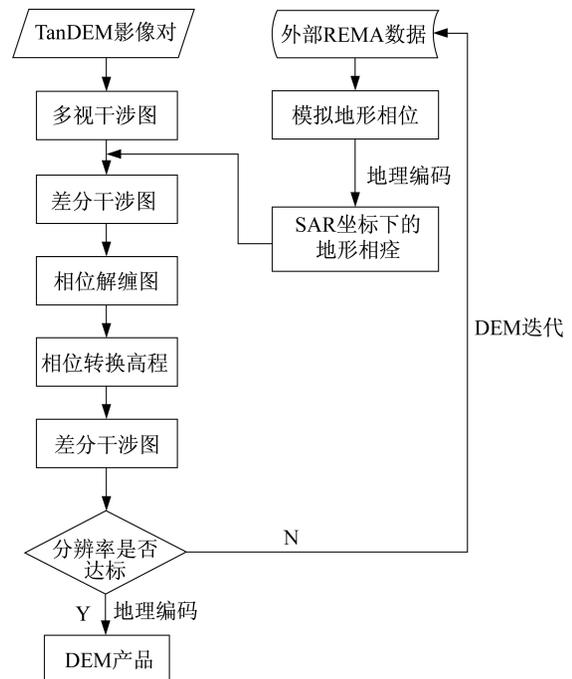


图 3 基于 TanDEM-X 影像对的高分辨率 DEM 获取流程图
Fig.3 Flowchart of generating high resolution DEM based on TanDEM-X image pair

2.2 X波段穿透深度估计

由于REMA是由光学立体像对生成,不受微波穿透影响。通过差分TanDEM-XDEM和REMA可以估计X波段在冰雪表面的穿透深度。南极虽然气温极低,但不同季节的底部消融、太阳辐射、快速冰流、降雪、风吹雪、蒸发和升华等自然因素可以引起较为显著的冰雪表面高程变化。生成REMA的光学立体影像和TanDEM-X影像对的月份一致可以大大降低穿透以外的因素对高程差的贡献。在差分之前,先将REMA和TanDEM-XDEM转换至同一坐标系和同一高程参考下。由于TanDEM-XDEM和REMA获取方法不一样,两者平面精度不一致。即便是在同一坐标系下,两者之间还会有一定的位置偏差,因此,在差分前还要将两者进行

配准。差分之后,由于InSAR传感器和光学传感器成像几何差异太大,还需进一步改正高程差分图中与平面位置、坡度、坡向等相关的系统误差。

3 研究结果

3.1 TanDEM-X DEM产品

本文TanDEM-XDEM产品如图4所示。从图中可知:A区,也就是Lambert冰川下游右侧区域,西南部地势比较低,最低海拔237m,东北部地势比较高,最高海拔达1713m,A区整体平均海拔为1024m;B区,也就是Mellor冰川下游,地势分布与A区相反,西南部较高,东北部较低,整体平均海拔为1002m,最低海拔588m。

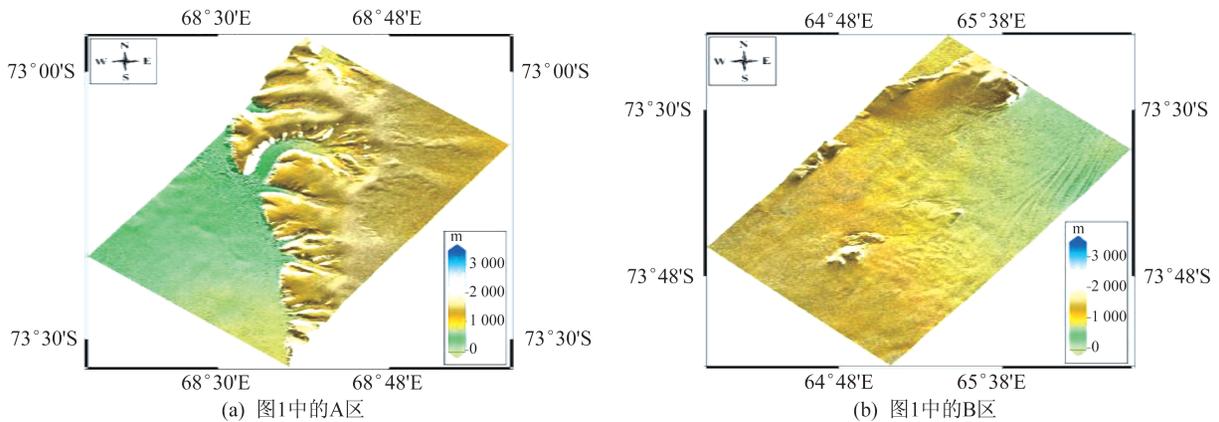


图4 TanDEM-X DEM生成结果

Fig.4 Generated TanDEM-X DEMs

TanDEM-X影像对的相干性图如图5所示。从图中可以看出,A、B两个区域的相干性值大部分均

在0.8以上,在一定程度上证实了TanDEM-X单发双收干涉对适合用于生成冰雪表面DEM。

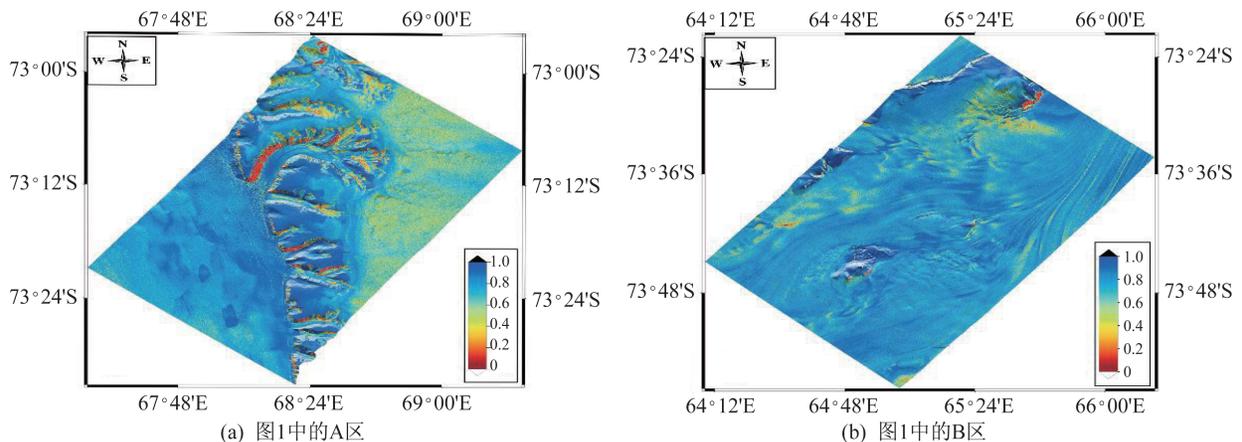


图5 TanDEM-X影像对相干性图

Fig.5 Coherence maps of TanDEM-X image pairs

本文以 ICESat-2 测高数据作为参考值,对研究区 8 m 分辨率的 REMA 和 TanDEM-X DEM 分别进行精度验证,结果见表 2。REMA 绝对精度较高,一是保证了以 REMA 作为外部 DEM 的 TanDEM-X 影像对差分干涉的可靠性;二是保证了以 REMA 作为参考 DEM 与 TanDEM-X DEM 差分来获取微波穿透深度的可靠性。因微波穿透导致的高程偏差, TanDEM-X DEM 与 ICESat-2 高程值之间的均方根误差值要稍大于 REMA。从区域来看, A 区由于包含更多的山区,地形起伏更大,无论是 REMA 还是 TanDEM-X DEM 与 ICESat-2 高程值之间的均方根误差值均要稍大于 B 区。综上,研究区参与差分的两种 DEM 均有较高的绝对精度,通过差分这两种 DEM 可以较准确地估计冰雪表面微波穿透深度。

3.2 X 波段冰雪穿透深度

通过差分 TanDEM-X DEM 和 REMA 得到的

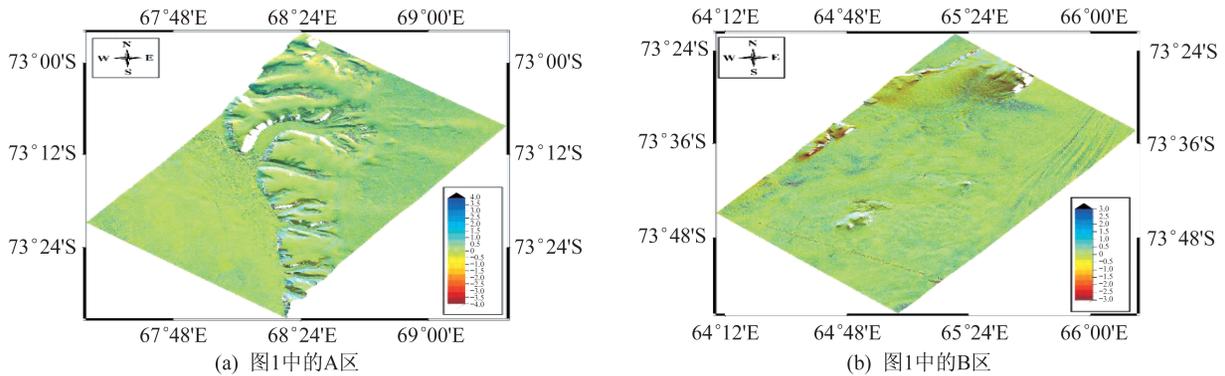


图 6 研究区 X 波段穿透深度估计结果分布图

Fig.6 Distribution of derived X-band penetration depth in study area

4 结果分析与讨论

A 区域位于 Lambert 冰川、Mellor 冰川以及 Fisher 冰川合流段上游的右侧。由于上述 3 条冰川汇合处冰流冲击力巨大,该区域形成了地堑。从图 4(a)可以看出地势西低东高。B 区域位于 Mellor 冰川下游和 Fisher 冰川下游之间,平均海拔要高于 A 区。B 区东部主要为 Mellor 冰川下游,东北角有快速冰流经过,海拔呈现西高东低的趋势,变化平稳。本文研究区冰川作用明显, Lambert、Mellor 和 Fisher 3 条冰川汇合后流经的地方海拔比较低。A 区东侧冰川流经的地方海拔也较低。

偏低的穿透值主要分布在冰流以及低海拔沿

表 2 基于 ICESat-2 测高数据的研究区 REMA 和 TanDEM-X DEM 精度验证

Tab.2 Validation of REMA and TanDEM-X DEMs based on ICESat-2 altimetry data

数据	区域	均值	均方根误差
REMA-ICESat-2	A	-0.46	1.64
	B	-0.39	1.11
TanDEM-X DEM-CESat-2	A	-0.46	2.31
	B	-0.29	2.07

X 波段穿透深度分布如图 6 所示。A 区中山坡和内陆冰盖部分穿透较为明显,最大可达到 3.9 m;冰流区域的穿透值比较小,大部分位于 0 值附近,少部分可达 1 m;全区平均穿透深度为 0.18 m。B 区的冰盖区穿透比 A 区低,最大可达 3 m;冰流区穿透值相比 A 区冰流区更大,少部分可达 1.5 m 左右;全区平均穿透值为 0.05 m。

海区域,高海拔内陆冰盖的穿透值普遍偏高。一般来说,微波穿透值的高低与介质含水量密切相关。其他条件不变时,含水量越大,衰减系数就会越大,穿透值就越小,反之穿透值就越大。冰流表面含水量较其他区域高,所以穿透值普遍偏低。A 区域中,西部有快速冰流经过,因此西部穿透深度偏低。B 区冰流范围较大,整体含水量偏高,穿透值相应偏低。A 区东部山脉海拔在 2 000 m 以上,积雪比较干燥。内陆的冰盖表面也以粒雪和干雪为主,含水量要比冰流表面要低,因此穿透值更高。B 区以冰川下游为主,故穿透值整体偏低。需要注意的是, TanDEM-X 影像获取时间是南极的夏季,夏季的积雪含水量会偏高,所以 A、B 区域的穿透值偏低。另

外,仔细对照图 5 和图 6 能发现,穿透深度也和 TanDEM-X 影像对的相干性存在一定的关系。排除影像畸变和阴影引起的低相干性,在冰雪表面相干性越低,穿透深度越大。这是因为穿透深度越大,体散射因子越强,回波信号越弱,相干性就越低。

5 结束语

本文对 Lambert 盆地中部两个 TanDEM-X 影像对进行干涉处理,采用 REMA 作为外部 DEM 辅助相位解缠,通过多次迭代生成高精度高分辨率的 DEM。然后将新 DEM 与 REMA 差分以估算 X 波段在研究区表面穿透深度。结果表明,在冰流和低海拔沿海区域穿透值偏低,在高海拔山区和内陆冰盖区穿透值偏高。A 区域西部是由 Lambert 冰川、Mellor 冰川以及 Fisher 冰川 3 条冰川合流的冰川作用而形成的地堑,从而导致 A 区域西高东低的地势,西部的穿透值普遍偏低,平均值为 0.18 m,地势偏高的东部冰盖区可达 3.9 m。B 区域的海拔呈现西高东低的趋势,东部覆盖 Mellor 冰川下游,平均值为 0.05 m,地势偏高的西部冰盖区可达 3 m。穿透值分布与积雪的含水量有关,含水量越高,X 波段的衰减系数就会越大,穿透值越小,反之穿透值越高。

参考文献

- [1] ZWALLY H J, BINDSCHADLER R A, BRENNER A C, et al. Surface elevation contours of greenland and antarctic ice sheets [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C3):1589-1596.
- [2] 肖峰,张胜凯,鄂栋臣,等.四种南极数字高程模型的精度比较与分析[J].*冰川冻土*,2014,36(3):640-648.
- [3] 张胜凯,鄂栋臣,周春霞,等.南极数字高程模型研究进展[J].*极地研究*,2006(4):301-309.
- [4] 杨帆,温家洪.ICESat 与 ICESat-2 应用进展与展望[J].*极地研究*,2011,23(2):138-148.
- [5] LIU H. Development of an antarctic digital elevation model [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1999, 104(B10):23199-23213.
- [6] 黄科伟,李斐,张胜凯,等.南极冰盖 DEM 机载测高验证与分析:以西南极 Thwaites 冰川为例[J].*测绘学报*, 2016,45(5):544-551.
- [7] PARTINGTON K C, CUDLIP W, MCINTYRE N F, et al. Mapping of amery ice shelf, Antarctica, surface features by satellite altimetry [J]. *Annals of Glaciology*, 1987, 9:183-188.
- [8] BAMBER J L, BINDSCHADLER R A. An improved elevation dataset for climate and ice-sheet modeling: validation with satellite imagery [J]. *Annals of Glaciology*, 1997, 25:439-444.
- [9] GRIGGS J A, BAMBER J L. A new 1 km digital elevation model of the Antarctic derived from combined satellite radar and laser data (Part 2) : validation and error [J]. *The Cryosphere*, 2009,3:113-123.
- [10] HOWAT I M, PORTER C, SMITH B E, et al. The reference elevation model of Antarctica [J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(2):665-674.
- [11] CURLANDER J C. Interferometric synthetic aperture radar for terrain mapping [C]// *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1995:2801-2804.
- [12] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23(4):713-720.
- [13] BREIT H, FRITZ T, BALSS U, et al. TerraSAR-X SAR processing and products [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2):727-740.
- [14] HAJNSEK I, BUSCHE T. TanDEM-X: science activities [C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015:2892-2894.
- [15] ROTT H, FLORICIOIU D, WUITE J, et al. Mass changes of outlet glaciers along the nordensjököld coast, northern Antarctic peninsula, based on TanDEM-X satellite measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(22):8123-8129.
- [16] KIM S H, KIM D J. Measurements of surface deformation of ice sheets in Antarctica using TanDEM-X data [C]// *Synthetic Aperture Radar*. 2013:177-180.
- [17] RIZZOLI P, MARTONE M, ROTT H. Characterization of snow facies on the Greenland ice sheet observed by TanDEM-X interferometric SAR Data [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4):24.
- [18] RIGNOTE, ECHELMMEYER K, KRABILL W. Penetration depth of interferometric synthetic-aperture radar signals in snow and ice [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(18):3501-3504.
- [19] 杨亚夫,朱建军,许兵.利用 TanDEM-X 生成 DEM 的精度评定[J].*测绘通报*,2017(7):22-26,83.
- [20] 黄龙.南极 Lambert 冰川盆地中部表面高程、冰厚度及底部地形数字模型构建与分析[D].上海:上海师范大学,2013.
- [21] 路瑞峰,赵迪,侯雨生,等.InSAR 图像配准雷达几何法处理性能分析[J].*上海航天*,2018,35(6):71-78.
- [22] 杨帆,温家洪.ICESat 与 ICESat-2 应用进展与展望[J].*极地研究*,2011,23(2):138-148.