

InSAR 用于南极测图的可行性研究

周春霞¹ 鄂栋臣¹ 廖明生²

(1 武汉大学中国南极测绘研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 利用 1996 年 ERS-1/2 tandem 方式的雷达影像数据进行了生成 Grove 山数字高程模型的试验研究, 并与实测的 DEM 进行比较分析, 论证了利用 InSAR 技术进行南极测图的可行性。试验证明, 在南极研究中, InSAR 是一种非常有效的手段, 不仅可用于地图制图, 而且在冰川动力学、冰貌环境变化等研究领域也有巨大的潜力。

关键词: 合成孔径雷达干涉测量; 南极测图; 数字高程模型

中图法分类号: P237.3

由于 InSAR 具有能够实现全天时、全天候的对地观测等特点, 现已成为空间对地观测技术的研究热点。而且欧空局发射的 ERS-1/2 tandem (双星串联) 方式的两颗卫星在轨道接近的同一地区前后仅相差 1d, 为研究人员提供了相干性相对较高的雷达影像数据。针对南极地区特殊的地形地貌条件, 本文利用 ERS-1/2 tandem 方式的雷达影像数据进行试验研究, 并且利用野外实测资料进行对比分析。

1 理论方法

InSAR 利用同一地区的两幅单视复影像形成干涉, 再利用相位信息的差异提取地物的相对高度, 从而可以得到三维信息。ERS-1/2 tandem 方式的时间基线短, 有较好的时间相干性, 是用于研究的较好数据源。其原理如图 1 所示, 图中 H 表示飞行高度; R_1 、 R_2 是雷达天线 O_1 、 O_2 和地面散射体之间的距离; θ 为第一副天线的参考视线角; B 表示基线长度; α 为基线倾角。从图 1 可知, 地面任意点高程 h 可以表示为:

$$h = H - R_1 \cos \theta =$$

$$H - \frac{(R_2 - R_1)^2 - B^2}{2B \sin(\theta - \alpha) - 2(R_2 - R_1)} \cos \theta \quad (1)$$

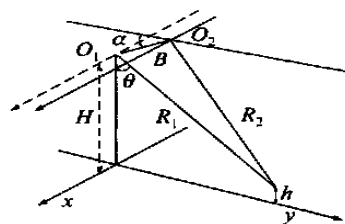


图 1 InSAR 成像几何示意图

Fig. 1 Geometry of SAR Interferometry

相位差 $\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(R_2 - R_1)$, 其中 λ 为波长。

令距离差 $\Delta R = R_2 - R_1$, 则有:

$$h = H - \frac{(\frac{\lambda \cdot \Delta\varphi}{4\pi})^2 - B^2}{2B \sin(\theta - \alpha) - \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi}{2\pi}} \cos \theta \quad (2)$$

式(2)简要地表明了 InSAR 从干涉相位差中得到地面点高程的原理。

InSAR 数据处理主要包括如下步骤。

1) 复图像对的精确配准。因为两幅雷达图像来自不同轨道的 SAR 天线, 其相对应的像点并不是地面的同一目标点。配准就是使得用来计算干涉相位的两幅复图像的像点对应于地面的同一点, 而且配准精度一定要达到亚像元级, 否则不能获得正确的相位差信息, 导致后面的计算不能保证所求地面点高程的精度。

2) 生成干涉图。配准后的图像作复共轭相乘就生成了干涉条纹图。通常情况下, 需要对干涉图进行去平地效应和必要的滤波处理。

3) 相位解缠。在干涉图中, 所得到的干涉相位只是取值范围在 $[-\pi, \pi]$ 之间的主值, 解缠就是将相位由主值恢复为真实值的过程。

4) 生成 DEM。由式(2)可知, 有了干涉相位的真实值、轨道参数, 就可以重建 DEM。最终的 DEM 是经过地学编码处理生成的。因为解缠后的相位经过高程估算之后仍然在斜距/零多普勒坐标系中, 需要将其转换到与用户地形图相符的坐标系中, 产生与地形图相符的 DEM。

同时, 在数据分析和处理的过程中, 基线解算、去除平地效应、噪声滤波等都是获得高精度 DEM 不可忽略的步骤。得到了由 InSAR 生成的 DEM, 就可以和野外实测获得的 DEM 进行比较和分析。若 InSAR 生成的 DEM 能够满足一定比例尺测图精度的要求, 就可以根据此 DEM 绘制该地区的地形图。

2 试验区概况和野外实地测量数据

Grove 山地区是位于东南极内陆冰盖区域中的一处裸露角峰群山区, 距离中山站大约 400km。野外实地测图范围主要在核心区, 其地理范围为东经 $74^{\circ}54' \sim 75^{\circ}14'$, 南纬 $72^{\circ}50' \sim 72^{\circ}56'$, 面积约 110km^2 。Grove 山地区具有典型的内陆气候特征, 气候条件恶劣, 冰盖地形起伏较大, 冰裂缝纵横密布。1 月平均气温约 -17°C , 平均风速为 10.2m/s , 这些都给野外作业带来困难。Grove 山核心区的平均高程为 $2\,000\text{m}$, 有两条主要裸露山脉即 Harding 山(Harding)和萨哈罗夫岭(Zakharoff), 还有一些岩石角峰和碎石露岩带。

在中国第 16 次南极科学考察度夏期间, 中国南极测绘研究中心的两名大地测量人员采用 GPS 和全站仪进行了为期 31d 的野外观测和数据采集, 并利用事后差分 GPS 方法进行数据处理, 最后进行地形图绘制, 生成 Grove 山核心区 $1:25\,000$ 的地形图(图 2)。坐标系统为 WGS-84; 采用高斯-克吕格投影; 中央子午线为东经 75° ; 等高距为 10m 。

为了和实测地形图有一个直观的比较, 在此列出了 Grove 山核心区的 TM 卫星影像图(图 3)和 ERS-1 雷达影像图(图 4), 图 3 和图 4 都是平面影像。在这三张图上, Harding 山、Zakharoff

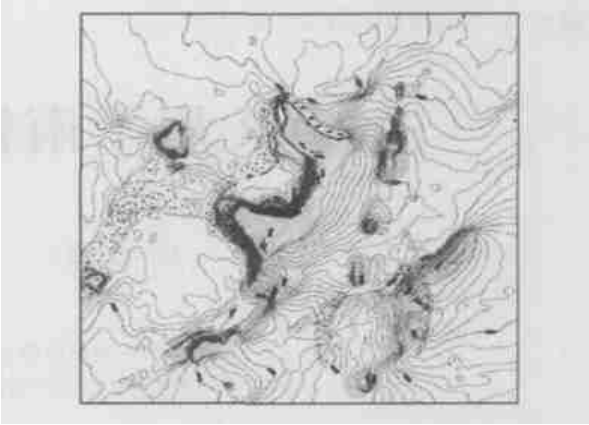


图 2 Grove 山核心区地形图
Fig. 2 Topographical Map of Core Area
Grove Mountains

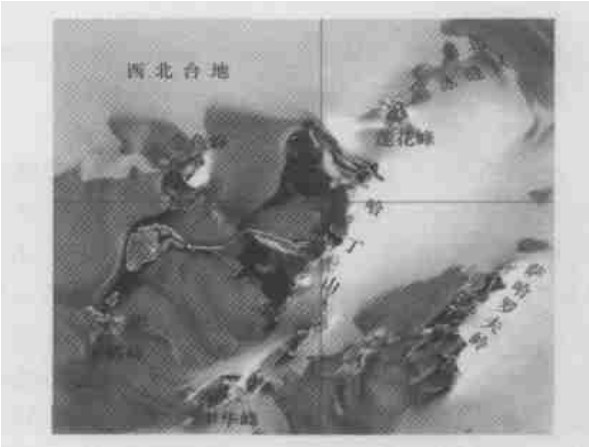


图 3 Grove 山核心区 TM 卫星影像图
Fig. 3 TM Satellite Image of the Core Area

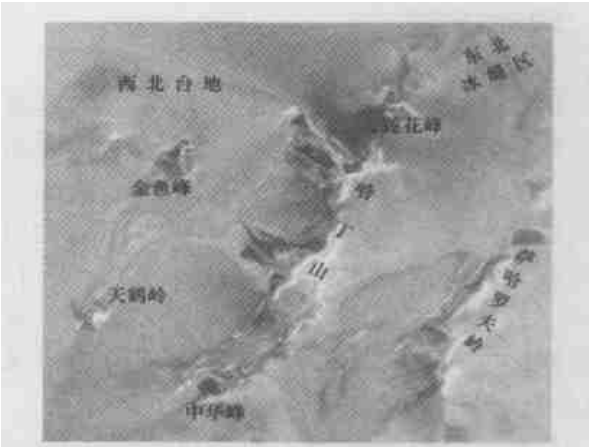


图 4 Grove 山核心区 ERS-1 雷达影像
Fig. 4 ERS-1 Radar Image of the Core Area

岭、鲸鱼峰、天鹤峰、中华峰及莲花峰都可以很明显地识别出来。另外也可看出, 地貌在细节上存在一些差异, 这是因为不同传感器成像方式、成像时间和相应的成图方法不同, 同时也存在误差的影响。

3 InSAR 数据处理及结果分析

与其他卫星遥感数据相比, InSAR 卫星雷达数据是一种经济、可靠和有效的数据源。对于南极研究, 这项技术可以监测人类长时间无法到达的冰川的变化情况, 可以提取冰貌的高程变化信息。本文主要利用 InSAR 技术提取地表的三维信息, 探讨和分析 ERS-1/2 tandem 方式的雷达影像进行干涉生成 DEM 及其用于制图的应用潜力, 并着重分析 InSAR 手段获取的 DEM 结果与南极地区特殊环境的相互关系及需要解决的问题等。

本试验所采用的一对 ERS-1/2 tandem 方式的雷达影像数据(表 1)的垂直基线分量为 164m, 平行基线分量为 94m。基线参数在去除平地效应、相位到高程的几何转换等数据处理过程中都是非常重要的影响因子。

表 1 ERS 1/2 tandem 数据主要参数

Tab. 1 Parameters of ERS-1/2 Tandem Data			
卫星	轨道号	帧号	获取日期
ERS-1	23 910	5 139	1996-02-10
ERS-2	04 237	5 139	1996-02-11

两幅复数影像经过配准以后, 再经共轭相乘形成干涉, 其相位差分量即为干涉条纹图。Grove 山核心区的干涉条纹图见图 5。从干涉条纹中可以看出, Harding 山、Zakharoff 岭等山峰的干涉条纹显得有些杂乱。经过野外实地测量, 了解到核心区的山峰及山头主要由散乱的石块及冰雪组成, 还有多处陡崖。



图 5 Grove 山核心区干涉条纹图

Fig. 5 Interferogram of the Core Area

在得到干涉条纹图后, 需要对相位数据进行一定的分析。相干图是最直观的干涉质量评价图, 而且可以利用相干系数的变化特性来进行地

物分类。核心区的相干图如图 6 所示。通过比较图 3 和图 6 可以发现, 相干性最好的区域是蓝冰覆盖区域, 在强风的劲吹下, 其表面的覆雪被扫除。TM 卫星影像图利用蓝冰与雪面和裸岩的光谱特性相差很大的特点, 表征出了蓝冰区域、雪面及裸岩。在图 3 所示的冰雪表面中, 深色为蓝冰区, 浅色为雪面。蓝冰大面积分布, 孕育着富集陨石的搁浅表面(王道德等, 1999)。因此, 利用相干特性, InSAR 技术也可进一步用于研究蓝冰的分布情况, 为寻找陨石提供重要的参考资料。



图 6 Grove 山核心区相干图

Fig. 6 Coherence of the Core Area

在进行了平地效应消除、噪声滤波之后, 再一个关键步骤就是相位解缠。相位解缠就是将相位差值恢复为真实值的过程。有了真实相位, 才能计算出每个点的高程值。同时为了得到所求区域的 DEM, 需要提供一个高程参考点, 即需要已知所求区域中某一个点的绝对高程值。常用无权重最小二乘方法很容易导致误差传递, 所以本文利用基于相干系数指导下的相位解缠方法进行运算。但是在相干性较低的山区, 残差点过多也会引起解缠不准确。对于相干性较好的区域, 解缠精度较高。

在 16 次南极考察期间, Grove 山核心区布设了 3 个控制点, 其中 2 个位于 Harding 山, 1 个设在 Zakharoff 岭。因为野外测量时间是 2000 年 1 月, 而雷达影像的获取时间是 1996 年 2 月, 所以在雷达影像上不能找到这 3 个控制点。另外, 因为控制点是很小的铜制标志, 没有特别的反射特性, 即使野外测量的时间和雷达影像的获取时间一致, 也很难找到。同时, 在 Grove 山核心区, 因为其特殊的自然环境和地理特征, 很难找到明显的特征点。而且, 从 1996 年到 2000 年, 冰川的运动和冰雪累积、消融都会引起冰川在水平方向和垂直方向的位移。因此, 运动着的冰面上的点于 2000 年测得的高程

值不能作为 1996 年雷达影像的高程参考点。在这种情况下,在核心区的一块平坦且较稳定的区域——Harding 山的西面设置了一个高程参考点,其高程为 1 867m。因为 Harding 山的阻挡作用,在其西面的冰体没有很大的运动,相对稳定,而且从核心区的相干图(图 6)也可以看出,此区域的相干性很好。今后应该考虑在相对稳定的区域设置若干角反射器作为精确的控制点。

相位解缠完成之后,就可以生成 DEM。为了有一个直观的视觉效果,由 InSAR 生成的 DEM 用透视图(图 7)表示。在 Grove 山核心区,因为

一些特殊的地形和雷达阴影现象的存在,部分区域的高程和实测值偏差较大。和野外实地测量所获得的 DEM(图 8)相比较可以看出,整个地形的趋势及主要地形地貌特征都是一致的。Harding 山、Zakharoff 岭在图 7 和图 8 中都很明显地显示出来了,但是鲸鱼峰、中华峰和莲花峰在图 7 中没有正确显示;在 Harding 山和 Zakharoff 岭之间存在一些冰谷和冰洼地,这在图 8 中也没有正确显示。InSAR 数据处理中的很多重要技术问题还需要进一步的分析,以提高 DEM 的精度,更好地体现地形的细节信息。

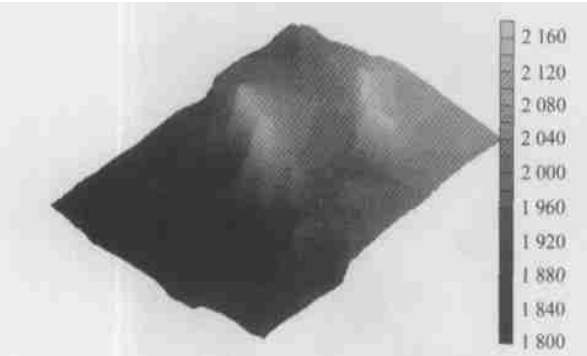


图 7 由 ERS-1/2 tandem 雷达影像生成的 DEM
Fig. 7 DEM Derived by ERS-1/2 Tandem Radar Image Data

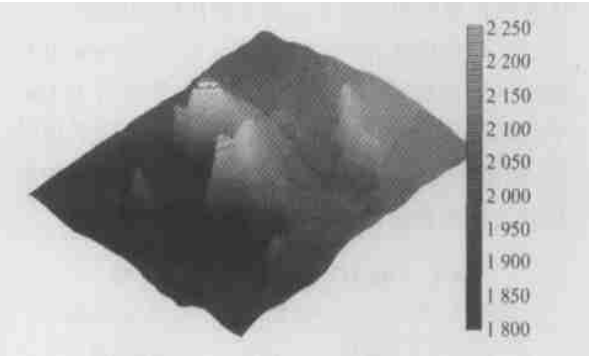


图 8 经野外实地测量所获得的 DEM
Fig. 8 DEM Derived by the Topographic Points Obtained During the Field Surveying

从 1996 年 2 月到 2000 年 1 月,冰川运动、冰雪累积及冰雪消融都会引起 Grove 山核心区的变化。根据核心区的地形特征、冰川运动特性及相干性的好坏,将此地区分为相对稳定区域和不稳定区域。因为时间迁移和特殊的地形,划分不同区域进行比较和分析 InSAR 生成的 DEM 和实测的 DEM 更为合理。相对稳定区域主要为蓝冰覆盖区域。比较和分析的结果见表 2。

表 2 DEM 的比较结果/ m

Tab. 2 Comparison Between the Results of DEM

区域	相对稳定区域	不稳定区域
差值平均值	2.3	13.7
差值标准差	5.4	20.3

从相对稳定区域的比较结果可知,该区域的差值标准差为 5.4m。在不稳定区域,差值增大,因为冰川运动引起了同一位置冰面高程的变化,而雪面因为暴风雪引起的变化也会使得即使是相差一天的 ERS-1/2 tandem 数据的相干性变差。

4 结 语

从在 Grove 山地区初步的试验研究可知,

InSAR 是用于南极测图的一种非常有效的手段。对于南极地区的测图,它具有野外实地测量所无法比拟的优点。为了获得精度更好的 DEM,还需要进一步分析干涉图的生成、相位解缠等一些关键步骤,以减少各种误差的影响。配合地面科学考察活动,在条件允许时,设置一些角反射器,并精确量测其坐标和高程值以作为控制点,这对于提高 InSAR 数据处理的精度和去除大气影响将会起到重要作用。此外,还将进一步分析冰雪覆盖区域的相位和相干性的特性及其对生成 DEM 和地图制图的影响。可以相信,InSAR 技术不仅对 1:2.5 万甚至更大比例尺的南极地形制图产生积极的作用,而且对南极的专题分析监测有着重要意义。采用多幅雷达影像及 D-InSAR 技术可以监测 cm 级的微小变化,这在冰川运动、物质平衡和全球环境变化等南极研究中有着巨大的潜力,有待于进一步的研究。

参 考 文 献

1 刘国祥,丁晓利,陈永奇,等. 极具潜力的空间对地观测技术:合成孔径雷达干涉. 地球科学进展,2000(6): 734~740
2 孙家驷,霍东民,周军其,等. 格罗夫山地无地面控制

卫星影像数字制图和地貌、蓝冰及陨石分布分析. 极地研究, 2001, 13(1): 21~31

3 彭文钧, 丁士俊, 陈春明. 后处理差分 GPS 在南极格罗夫山中小比例尺地形图测图中的应用. 极地研究, 2001, 13(4): 301~306

4 廖明生, 林 琿. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础. 北京: 测绘出版社, 2003

5 王 超, 张 红, 刘 智. 星载合成孔径雷达干涉测量. 北京: 科学出版社, 2002

6 Zebker H A, Farr T G, Salazar R P, et al. Mapping the World' s Topography Using Radar Interferometry the TOPSAT Mission. IEEE, 1994, 82(12): 1 774~1 786

7 Zebker H A, Goldstein R M. Topographic Mapping from Interferometric SAR Observations. J. Geophys. Res., 1986, 91(B5): 4 993~4 999

8 Zebker H A, Werner C L, Rosen P, et al. Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar. IEEE Trans.on Geosci. Remote Sensing, 1994, 32(4): 823~836

9 Rufino G, Moccia A, Esposito S. DEM Generation by Means of ERS Tandem Data. IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 1998, 36(6): 1 905~1 912

10 Coltelli M, Fornaro G, Franceschetti G, et al. ERS-1/ ERS-2 Tandem Data for Digital Elevation Model Generation. IEEE Proceedings of IGARSS' 98, 1998 (2): 1 088~1 090

11 Schwabisch M, Matschke M, Kröpfl W, et al. Quality Assessment of InSAR-derived DEMs Generated with ERS Tandem Data. IEEE Proceedings of IGARSS' 96, 1996(2): 802~804

12 Schwabisch M. Large Scale Interferometric DEM Generation Using ERS Tandem Data: Example of the Czech Republic. IEEE Proceedings of IGARSS' 98, 1998(3): 1 641~1 643

13 Mattar K E, Gray A L, Marco W A van der Kooij, et al. Airborne Interferometric SAR Results from Mountainous and Glacial Terrain. IEEE Proceedings of IGARSS' 94, 1994(4): 2 388~2 390

14 Hogda K A, Gneriussen T, Lauknes I. Synthetic Aperture Radar For DEM Generation In Snow-covered Mountain Terrain. IEEE Proceedings of IGARSS' 2002, 2002(4): 2 193~2 195

15 Rosen P A, Joughin I R, Li F K, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry. IEEE, 2000, 88(3): 333~382

第一作者简介: 周春霞, 博士生. 现主要从事 InSAR 技术及其在南极的应用研究.
E-mail: zhoucx@hp827s.wtusm.edu.cn

Feasibility of InSAR Application to Antarctic Mapping

ZHOU Chunxia¹ E Dongchen¹ LIAO Mingsheng²

(1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper presents an experimental investigation of the ERS-1/2 SAR tandem data in 1996 on DEM generation of the Grove mountains core area, compares the DEM with the actual topographic form and analyzes the feasibility of InSAR applied to Antarctic Mapping. In the relatively stable and with good coherence area, the RMS is about 5.4m. It is confirmed that InSAR can be used to produce more products to complement the dangerous field surveying. And for Antarctic investigation, InSAR is also an effective tool in studing ice sheet flow, ice sheet kinematic characteristics, and mass balance by adopting more pairs of radar image data.

Key words: synthetic aperture radar interferometry; Antarctic mapping; DEM

About the first author: ZHOU Chunxia, Ph. D candidate. Her research orientation is InSAR and its application in Antarctica.
E mail: zhoucx@hp827s.wtusm.edu.cn

(责任编辑: 晓平)