

# InSAR 技术获取高山峡谷区 DEM 精度研究

黄洁慧, 谢谟文, 王增福, 刘翔宇, 付强

(北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083 中国)

**摘要:**通过对金沙江河段高山峡谷区 L 波段的 Alos-Palasar 和 C 波段的 Radarsat-2 雷达单视复数数据的干涉处理, 获取此区域的数字高程模型 (DEM)。利用 SRTM 90m 分辨率的 DEM 为参考数据, 通过对比分析发现 InSAR 技术生成的 DEM 精度与相干系数、地形和波长有密切的关系。同时也验证了在相干性好, 地形起伏不太剧烈的地区, 用 InSAR 技术生成 DEM 是可行的。

**关键词:** 雷达干涉测量; 数字高程模型 (DEM); 精度分析; ALOS-Palasar; Radarsat-2

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.01.013

**中图分类号:** TP79    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-3177(2012)119-0062-06

## Research on the DEM Precision of Canyon Acquired by InSAR Technique

HUANG Jie-hui, XIE Mo-wen, WANG Zeng-fu, LIU Xiang-yu, FU Qiang

(School of Civil and Environment Engineering, The University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**Abstract:** Through interferometric processing of L-band Alos-Palasar and C-band Radarsat-2 single look complex data, the Digital Elevation Model (DEM) of the canyon along Jinsha River can be obtained. With comparison and analysis of 90m resolution SRTM DEM, a conclusion has been made that precision of DEM produced by InSAR technology is closely related to correlation coefficient, topography and wavelength. Meanwhile it also proved that it is feasible to produce DEM by InSAR technology in the good coherence and flat terrain areas.

**Key words:** InSAR; digital elevation model; precision analysis; ALOS-Palasar; Radarsat-2

### 1 引言

精确的地形信息在地质、水文、冰山、自然灾害监测和自然资源调查等领域都有着十分重要的作用。例如在水文分析时高质量的数字高程模型 (DEM) 是正确计算坡度、坡向、提取流域地形特征的前提。建立 DEM 的方法有多种, 从数据源及采集方式讲有: 直接从地面测量, 例如用 GPS、全站仪、野外测量等。此方法是获取地面高程最精确的方法之一, 也是代价最大的; 从现有地形图上采集, 例如格网读点法、数字化仪手扶跟踪及扫描仪半自动采集法等; 通过摄影测量途径获取。这 3 种方法都既费时又费力, 随着遥感技术的不断发展, 特别是

合成孔径雷达卫星技术的发展, 利用合成孔径雷达干涉测量技术 (Synthetic Aperture Radar Interferometry InSAR) 提取大规模高精度数字高程模型已成为一种重要的手段。合成孔径雷达干涉测量技术利用合成孔径雷达的相位信息来提取地表的三维信息和高程变化信息的一项技术。由于其全天时、全天候、高精度等优势, 弥补了光学遥感技术和传统获取 DEM 方法效率低、成本高、范围面积小等不足, 已广泛运用到包括地形测量以及地球动力学研究、冰川运动研究、森林调查与制图、海洋测绘等诸多领域<sup>[1]</sup>。

本论文以不同波段、不同精度的单视复型 (SLC) 数据为数据源, 对 SLC 数据进行干涉处理得

收稿日期: 2010-12-29    修订日期: 2011-04-01

作者简介: 黄洁慧 (1984~), 女, 研究方向: InSAR 遥感技术在地质灾害中的应用。

E-mail: jiehuizhifei@126.com

到 DEM,同时对采用 InSAR 技术生成 DEM 的主要流程进行了介绍,并结合波长、地形和相干系数等因素把二者生成的 DEM 与 SRTM-DEM 进行了对比统计分析,结果证明 InSAR 技术生成的 DEM 整体趋势与 SRTM-DEM 是一致的,证明了此方法的可行性。同时发现获取的 DEM 精度与波长、地形和相干系数有密切的关系。

## 2 InSAR 原理

合成孔径雷达干涉测量原理是雷达通过两次观测,获取对应地面同一区域的复数像对。由于目标与两天线位置的几何关系,在复图像上产生了相位差,形成干涉条纹图。干涉条纹图中包含了关于斜距向上的点与两天线位置之差的精确信息。因此,利用雷达波长、传感器高度、波束视向及天线基线之间的几何关系,便可以精确地测量出影像区域上每一点的三维位置。

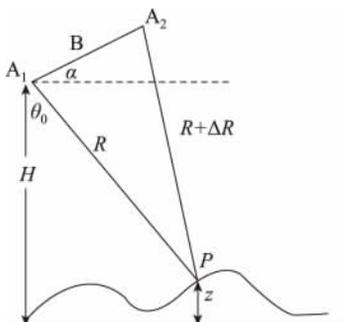


图1 SAR干涉测量成像示意图

图1为SAR干涉测量成像示意图<sup>[2]</sup>,图中 $A_1$ 和 $A_2$ 分别表示两副天线位置,天线之间距离用基线距 $B$ 表示,基线与水平方向夹角为 $\alpha$ , $H$ 表示平台高度,地面一点 $P$ 到天线 $A_1$ 的路径用 $R$ 表示, $\theta_0$ 是第一副天线的参考视线角,地形高程用 $z$ 表示。如果不考虑不同散射特性造成的随机相位,则两天线接收信号的相位分别为:

$$\varphi_1 = 2 \frac{2\pi R}{\lambda} \text{ 和 } \varphi_2 = 2 \frac{2\pi (R + \Delta R)}{\lambda}$$

干涉纹图的相位取决于信号的路径差

$$\Delta R; \phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R$$

由图1可以得出:

$$\sin(\theta_0 - \alpha) = \frac{(R + \Delta R)^2 - R^2 - B^2}{2RB}$$

$$= \frac{\Delta R}{B} + \frac{\Delta R^2}{2BR} - \frac{B}{2R}$$

$$z = H - R \cos \theta_0$$

由于通常 $B \ll R$ , $\Delta R^2 \ll 2BR$ ,故 $\sin(\theta_0 - \alpha) = \frac{\Delta R}{B}$ ,再由上面 $\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R$ 可得: $\theta_0 = \alpha - \arcsin \frac{\lambda \phi}{4\pi B}$

上述公式揭示了干涉相位差 $\phi$ 与高程 $z$ 之间的数学关系。也就是说,如果已知天线位置(参数 $H$ , $B$ , $\alpha$ )和雷达成像系统参数( $\theta_0$ )等,就可以从 $\phi$ 计算出地表的高程值。

在InSAR中常用高度模糊数 $\Delta z_{2\pi} = -\frac{\lambda R \sin \theta_0}{2 B_{\perp}}$

来表征干涉测量对高度变化的敏感程度,高度模糊数定义为引起1个 $2\pi$ 相位变化所对应的高度变化。因此干涉条纹的疏密反映了局部地形特征和地势的陡缓,干涉条纹密集的区域地形陡峭,干涉条纹稀疏的区域地形相对平坦。

## 3 实验区介绍和数据处理

本研究以金沙江某河段为研究区域,研究区域中心坐标为北纬 $102^{\circ}36'$ ,东经 $26^{\circ}22'$ ,地处我国西南高山峡谷区,地势险峻,交通不便,采用传统的大地测量法获取DEM存在极大的困难,分别选取L波段的ALOS-Palsar数据和C波段的Radarsat-2数据为数据源进行处理。ALOS卫星波段波长为23.6cm,不支持编程,只能购买存档数据。经查询购买了精细波速单极化(FBS)模式下的升轨存档数据,分辨率为7m。Radarsat-2卫星支持用户编程,波段波长为5.6cm,订购的为超精细VVHH极化产品模式,分辨率为3m,幅宽为 $20\text{km} \times 20\text{km}$ ,入射角是 $39.57^{\circ}$ 的降轨编程数据。如图2黑色标出区域为ALOS-Palasar存档数据拍摄范围,白色所标区域为Radarsat-2编程数据的拍摄范围。

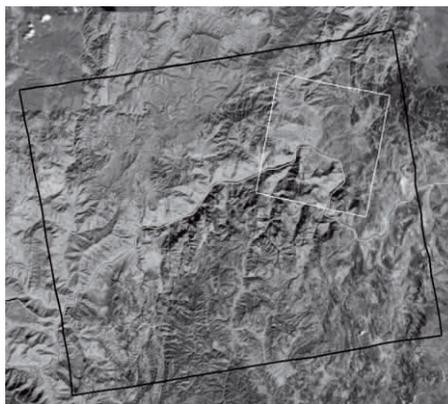


图2 数据拍摄范围

InSAR提取DEM的主要流程如下:

①根据监测需要选择合适的雷达SLC视复数数据对,并进行精确的配准。

干涉数据对需要根据时间基线、空间基线来选取。对于时间基线尽可能选取相隔一重访周期的数据对;对于空间基线,基线距对 InSAR 提取的 DEM 精度起双重影响。基线距离越大,高度模糊度越小,对高程变化的反应能力越强,但基线距越大,两次观测得到的信号之间的相干性越差,进而降低了所提取 DEM 的精度。因此,在最优基线长度范围内,选取基线距相对较大的数据对。

根据上述时间基线和空间基线的选取原则,在订购的数据中各选取两景 L 波段和 C 波段数据进行干涉处理。两景 Alos-Palasar 数据 A1、A2 和两景 Radarsat-2 数据 R1、R2 具体参数如表 1,SLC 数据如图 3。

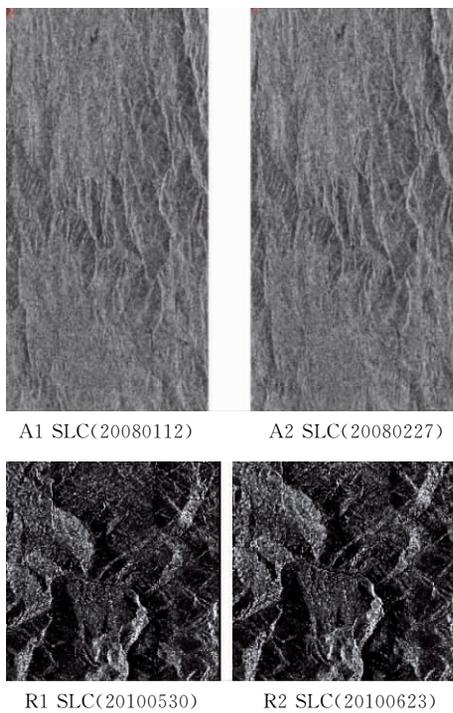


图 3 SLC 数据

表 1 SLC 数据参数表

数据名称	ALOS-Palsar 数据		Radarsat-2 数据	
	A1	A2	R1	R2
数据编号	A1	A2	R1	R2
拍摄时间	20080112	20080227	20100530	20100623
时间基线	46 天		24 天	
垂直基线	438.9m		250.3m	
高度模糊度	131.5m		63m	

②主图像与配准后的副图像复共轭相乘得到干涉条纹图。

因为需比较 ALOS-Palasar 数据和 Radarsat-2 数据生成 DEM 的精度,所以先要统一分辨率。为此 ALOS-Palasar 数据进行了 3:8 的多视处理,Ra-

darsat-2 数据进行了 8:8 的多视处理,分辨率重采后均为 25m。两种数据幅宽不同,后续图显示的范围皆为两种数据共同覆盖区域,干涉条纹图如图 4 所示。ALOS-Palasar 两景数据的垂直基线距为 438.9m,从而计算出高度模糊度是 131.5m。Radarsat-2 数据之间的垂直基线距为 250.3m,高度模糊度为 63m。模糊高度越小,反演 DEM 的高程精度越高,反之,则越低,因此 Radarsat-2 SLC 数据复共轭相乘得到的干涉条纹图中反演的 DEM 精度应该要比 ALOS-palasar 数据的高,干涉条纹也比 ALOS-palasar 数据的密集。

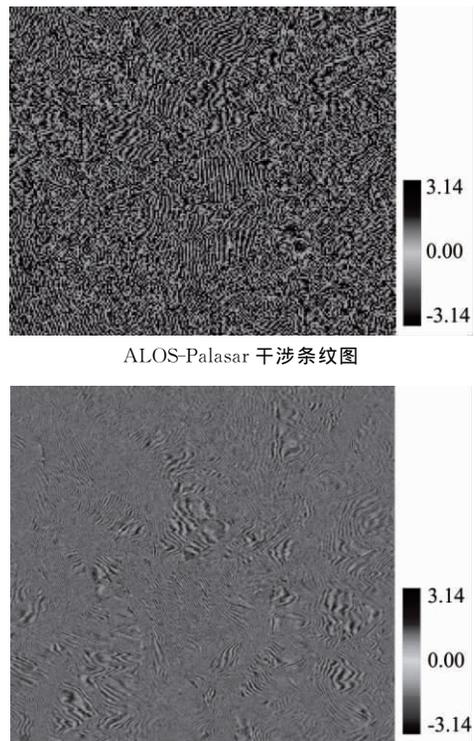


图 4 干涉条纹图

③去平地效应和滤波

平地效应使干涉相位图呈现为密集相间的条纹,一定程度上掩盖了地形变化引起的干涉条纹变化。所以干涉条纹图需先去平地效应,最后再把去平地效应的干涉图进行滤波处理<sup>[3]</sup>。

④相位解缠

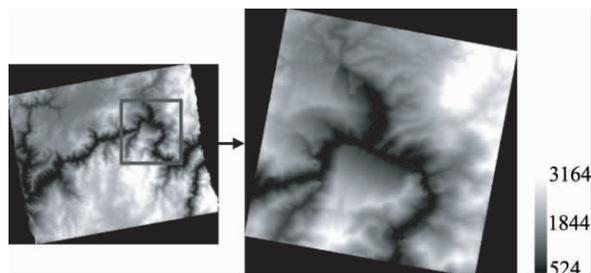
经过干涉处理得到的干涉图上点的相位值丢失了被卷叠起来的  $2n\pi$ ,只有把这些被卷叠起来的相位展开,找回丢失的  $2n\pi$ ,才能顺利地反演出地面目标的高度来<sup>[4]</sup>。

⑤轨道修正

在由相位信息转变到高程信息的过程中,这一步是至关重要的,不仅修正了轨道误差,而且计算了相位偏移量。

### ⑥生成 DEM 和地理编码后的相干系数图。

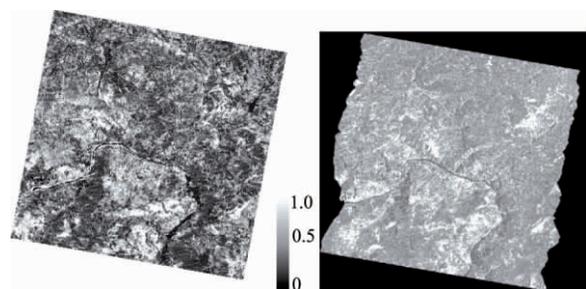
把解缠相位值转换到地面高程值,此时的高程值仍是斜距坐标,最后经过地理编码处理,把 DEM 转到标准的地理参考系中,生成的 DEM 数据如图 5。



Alos-palsar DEM

图 5 生成的 DEM

相干系数在整个干涉处理过程中是一个非常重要的参数,相干性要足够高,否则干涉相位的噪声不仅致使相位解缠变得困难,而且在相干值低的区域,很难得到高精度的高程信息,相干系数越低,获取的 DEM 越不可靠。当研究区域正对卫星拍摄方向时,电磁波反射强度大,接收到的能量就多,相干系数高,从而获得的 DEM 精度高。背向卫星拍摄方向的区域,因反射强度低,相干系数低,加上山体阴影等因素的影响导致 DEM 精度不高。以 Radarsat-2 数据的相干系数为例,如图 6 所示,因订购的 Radarsat-2 数据为降轨数据,从图中可以很明显的看出坡向在  $45^{\circ}$  至  $135^{\circ}$  之间相干系数都比较大。研究区域内 ALOS-Palasar 数据获得的相干系数平均值为 0.31, Radarsat-2 数据获取的相干系数均值为 0.18,证明了波长越长抗干扰性越强。



ALOS-Palasar 相干系数图

Radarsat-2 相干系数图

图 6 相干系数图

## 4 结果分析

为检验不同数据源获取 DEM 的精度,我们以 SRTM-DEM 数据作为参考标准。SRTM 数据是由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的,是通过奋进号航天飞机获取的雷达影像数据,制成的数字地形高程模型。该测量数据覆盖中国全境,分辨率为 90m。把 ALOS-Palasar

与 Radarsat-2 数据干涉处理获取的 DEM 与 SRTM-DEM 进行对比分析,发现整体趋势是一致的。然后采用叠加相减分析方法<sup>[4]</sup>,以 ALOS-Palasar 获得的 DEM 数据和 SRTM DEM 叠加相减为例,图 7 为 ALOS-Palasar 与 SRTM-DEM 高程差统计直方图。从图中可看出误差成正态分布,尽管差值的分布区间为 644.95m~648.52m,但差值大的区域像元数非常少,可忽略不计。通过进一步分析得知,这些差值大的像元多分布在相干系数低、地形起伏剧烈的地方。可见,只要相干性好,地形起伏不太剧烈的地区,用 InSAR 技术生成的 DEM 质量是可靠的。

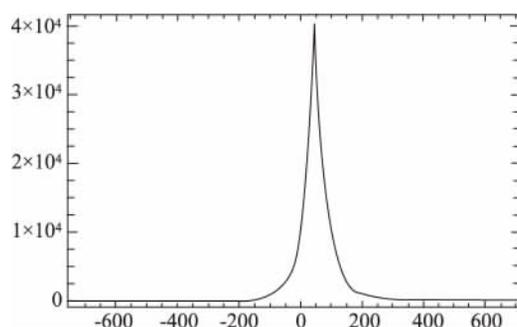
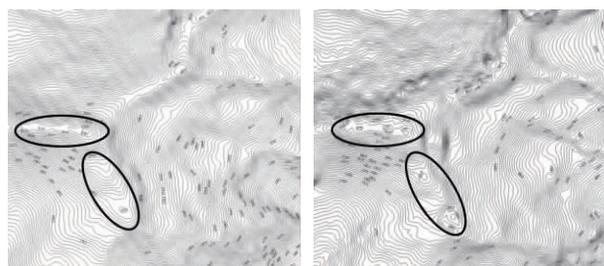


图 7 高程差统计直方图

同时,为了对比 ALOS-Palasar 与 Radarsat-2 数据干涉处理获得两种 DEM 数据的精度,把两种 DEM 数据采样到 25m 后生成 10m 间隔等高线图。图 8 是某滑坡地形后缘处生成的两幅等高线图。对比两图,ALOS-Palasar 生成的较为粗糙,而 Radarsat-2 生成的等高线较为圆润。图中圈出滑坡山脊上的一些细节 Radarsat-2 DEM 能显示出来,而 ALOS DEM 则不能,此处在图 9 光学影像图中也用白色椭圆标出,验证了以高精度和模糊高度小的 SLC 数据对为数据源生成的 DEM,精度也相对较高。



ALOS-Palasar 等高线

Radarsat-2 等高线

图 8 等高线

为了进一步验证生成的 DEM 数据的精度与地形、相干系数和波长的关系,在不同区域选取 3 条剖面线生成断面图,剖面线分布如图 9。剖面线 1 处地势比较平坦,其坡向决定了升降轨拍摄模式下该处的相关系数都比较高。从图 10 中可看出 SRTM-

DEM与生成的两种DEM的误差较小。再次验证了在地势起伏较小,相干系数高的区域,InSAR技术生成的DEM完全可以满足正常需要。

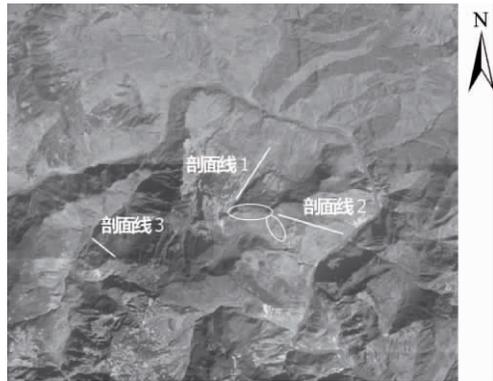


图9 剖面线图

剖面线2位于一滑坡上,该滑坡位于金沙江右岸,后缘高程1900m~1950m,前缘金沙江河床高程810m~812m,前后缘高差1100m~1200m,地势比较陡峭。且坡向向东,降轨拍摄正对滑坡,升轨拍摄背对滑坡,因此在Radarsat-2数据中该处相干系数较高,而ALOS-Palsar数据中相干系数较低。因此从图11中可看出Radarsat-2数据提取的DEM与STRM-DEM的误差相对ALOS-Plarsar DEM要小,且在平坦区域三者误差较小,坡度越大,三者之间的误差越大,这是由于SAR影像提取出的高程信息与雷达入射角有很大的关系,而InSAR技术的侧视成像特性及地表起伏状态决定了不同的入射角,地形起伏越大,产生的畸变越大。

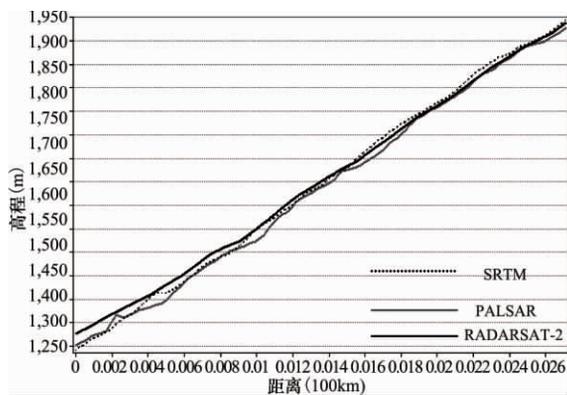


图10 断面图1

剖面线3位于金沙江右岸支流太平小河左岸,前缘高程1100m左右,后缘高程1900m左右,其断面图如图12,其坡向决定了在Radarsat-2数据中该处相干系数较低,而ALOS-Palsar数据中相干系数较高,且该处地势陡峭,因地形引起的畸变较大。因此该区域InSAR技术获得的两种DEM数据与SRTM-DEM的误差都较大,但相干系数相对较高

的ALOS-Palsar数据获得的DEM数据与SRTM-DEM的误差相对要小,再一次验证了地形和相干系数决定了生成的DEM数据的精度。

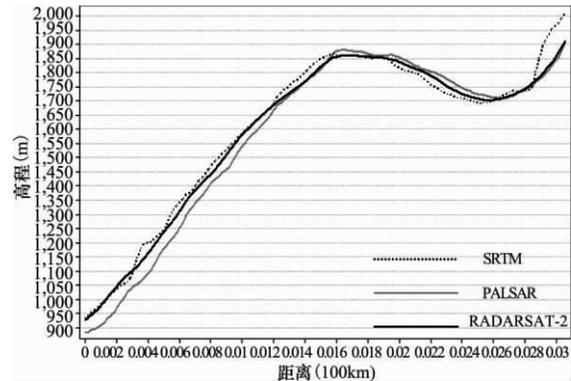


图11 断面图2

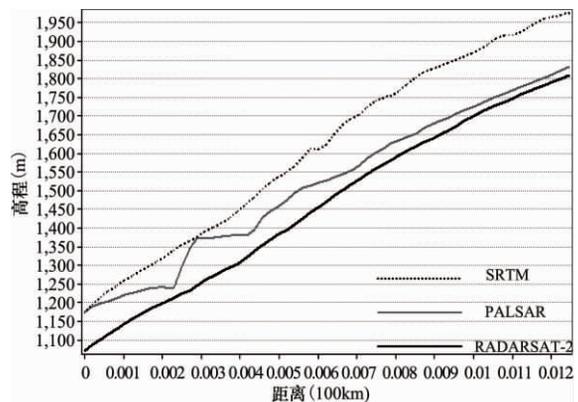


图12 断面图3

整体分析断面图1和断面图2,发现Radarsat-2数据获取的DEM要比ALOS-Palsar获取的DEM要大,剖面线3位于地形较陡且相关系数较低区域,不给予考虑。因此可知在相关系数较高,且地形起伏不太剧烈的情况下,就L波段和C波段而言,由于L波段波长比C波段长,其对植被覆盖区、干旱裸地等的穿透深度也比较大,从而L波段干涉测量获取的DEM比C波段生成的DEM高程稍低一点。

从上述3个断面图中可定性的得出获取DEM的精度与地形特征有一定的关联,而坡度和坡向是表征地形特征的两个重要指标。为了定量地研究InSAR技术获取DEM的精度与坡度、坡向的关系,现以SRTM-DEM数据为基准,计算出共同区域内各个像元的坡度和坡向,进一步分析坡度和坡向的大小与获取DEM精度的对应关系。图13为公共区域内的坡度图,图14是坡向图,图15显示的是Radarsat-2数据获取的DEM与SRTM-DEM数据的高程差和坡度的关系,坡度以5°为步长。从图中可以明显看出高程误差随着坡度的增加而逐渐变

大,当坡度大于  $40^\circ$  时高程误差增大速率明显变快。因为坡度越大, SAR 成像时的几何畸变越大,从而降低了获取 DEM 的精度。订购的 Radarsat-2 数据是降轨拍摄模式,且是右侧拍摄,因此坡向为  $90^\circ$  左右的区域是正对卫星拍摄方向,坡向  $270^\circ$  左右的区域是背对卫星拍摄方向。正对拍摄方向时反射强度高,相干系数高,从而获得的 DEM 精度高;背向拍摄方向的区域,因反射强度低,相干系数低,加上山体阴影等因素的影响导致 DEM 精度不高。这与图 16 显示的结果是一致的。图 16 是高程差与坡向的关系图,坡向以  $20^\circ$  为步长,图中可看出坡向在  $100^\circ$  左右高程误差最小,  $260^\circ$  时高程误差最大。且正对拍摄方向区域的整体高程误差都要小于背向拍摄区域的整体高程误差。

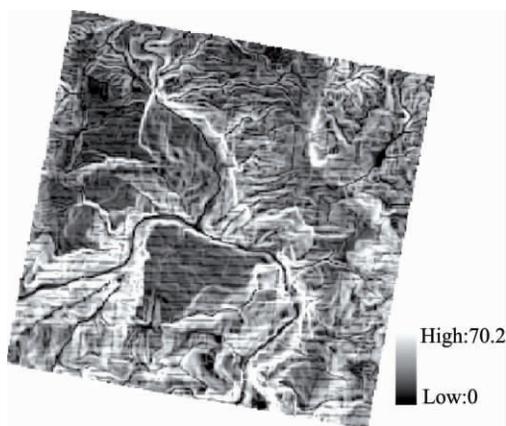


图 13 坡度图

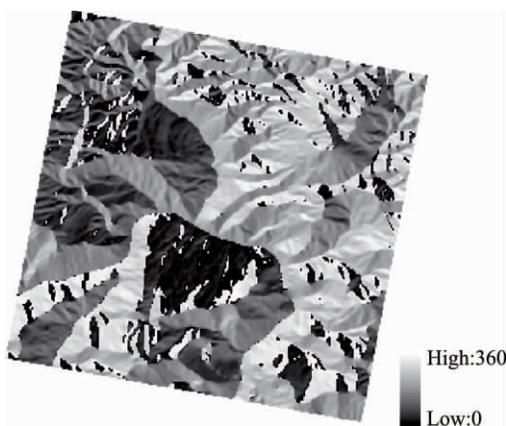


图 14 坡向图

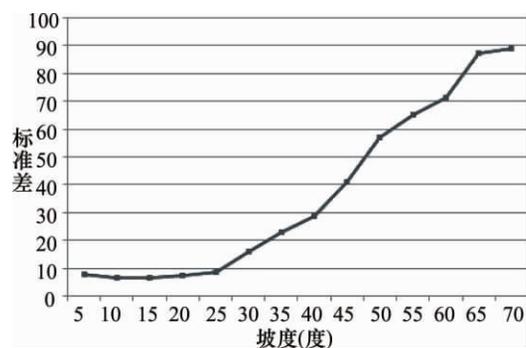


图 15 坡度与高程误差关系图

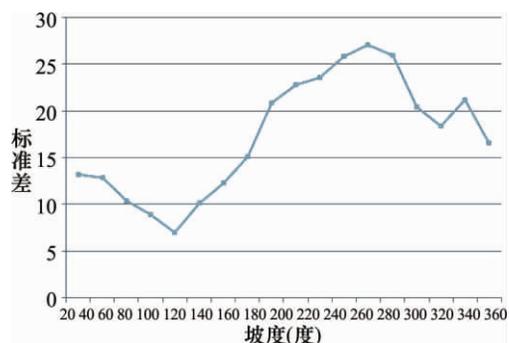


图 16 坡向与高程误差关系图

## 5 结束语

本文通过对 Radarsat-2 C 波段, ALOS-Palsar L 波段干涉测量生成的 DEM 和 SRTM-DEM 的比较分析,可以得出以下几点结论:

①只要相干性好,地形起伏不太剧烈的地区,用 InSAR 技术生成的 DEM 质量是可靠的。

②波长越长对地物的穿透能力就越强。由于 C 波段波长比 L 波段短,从而 L 波段干涉测量获取的 DEM 比 C 波段生成的 DEM 高程稍低一点。

③干涉生成的 DEM 精度与相干性关系很大。相干值越高,生成的 DEM 精度也越高。

④干涉生成的 DEM 精度与地形特征具有一定关联。而地形特征主要由坡度和坡向两个指标来反映。坡度越小的区域,DEM 精度越大,坡度大于  $40^\circ$  时精度降低更快。坡向为正对卫星拍摄方向时的 DEM 精度要高于坡向背对拍摄方向时获得的 DEM 精度。

## 参考文献

- [1] 郭华东,刘永坦,张永生,等. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京:科学出版社.
- [2] 王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [3] 李平湘,杨杰. 雷达干涉测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,2006.
- [4] 何敏,何秀凤. 利用星载 InSAR 技术提取镇江地区 DEM 及其精度分析[J]. 计算机应用,2010,30(2).