

基于合成孔径雷达干涉测量(InSAR)生成DEM 实验研究

陈 菲

黔南州水利水电勘测设计研究院, 贵州 都匀

收稿日期: 2022年6月25日; 录用日期: 2022年7月20日; 发布日期: 2022年7月27日

摘要

InSAR作为一种可全天候、全时段、大范围、快速地获取DEM的新兴技术手段, 具备影响深远的应用前景; 本文针对InSAR技术生成DEM过程中各种类型的误差, 采取“多视处理 + 外部DEM辅助”的方法, 实现在低空间分辨率的DEM辅助下生成复杂地形区域的数字高程模型, 通过评价干涉获取的DEM精度, 分析得出InSAR DEM在平坦地区的精度较高, 在地形起伏较大的区域因雷达侧视成像机理导致使得相干程度降低, 影响了DEM的精度。最后研究了高程精度与地形因素的关系, 分析坡度坡向对DEM精度的影响。结果表明, 精度随坡度的增加而减小, 而坡向的改变对精度影响较小。

关键词

数字高程模型, 合成孔径雷达干涉测量(InSAR), SRTM DEM

Experimental Study of Synthetic Aperture Radar Interferometry to Generate DEM

Fei Chen

黔南州水利水电勘测设计研究院, 都匀, 贵州

Received: Jun. 25th, 2022; accepted: Jul. 20th, 2022; published: Jul. 27th, 2022

Abstract

In this paper, DEM data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) was used to assist the generation of InSAR DEM, which is used to remove some interference errors in the process and improve the accuracy of DEM generation. Taking the SRTM DEM as the standard, the height difference between two DEM was obtained, and the accuracy of DEM was evaluated. Through analysis, it is con-

cluded that the precision of the InSAR DEM in flat area is higher. On the contrary, the precision of DEM in the region of the terrain fluctuation was proved lower because of decreasing relevance leaded by radar side-view mechanism. In the end, the relationship between elevation accuracy and terrain factors is studied, and the influence of slope and aspect on DEM accuracy is analyzed. The results show that accuracy decreases with the increase of slope, and slope direction changes have little effect on the accuracy.

Keywords

Digital Elevation Model, InSAR, SRTM DEM

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM) [1]作为地面高程信息的载体,描述了地表起伏的形态特征,是人们研究地形地貌的一种重要方法。在20世纪50年代首次提出就受到了科学界极为广泛的关注,被广泛应用于地质、水文、环境监测、灾害评估等多个领域。

合成孔径雷达干涉测量技术(Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR) [2]是一种先进的空间对地观测技术,以星载或机载合成孔径雷达(SAR)系统获取的复影像对为数据源,利用其中的相位信息可获取地面三维信息和探测地表形变信息。近年来,随着卫星雷达技术的不断创新, InSAR 技术的迅猛发展,利用 InSAR 提取大规模、高精度的 DEM [3]已经成为雷达遥感领域一个新的研究方向[4]。

本论文使用 Sarmap 公司研发的 ENVI SARscape 雷达图像处理软件将伊朗 Bam 地区的 Envisat-1 卫星 ASAR 雷达影像进行图像配准[5]、基线估算等前期处理,由影像对生成干涉图,再去除平地相位、滤除相位噪声,对缠绕相位进行相位解缠,相位转化到高程最后得到 DEM,然后以 SRTM-3 DEM 作为标准评价干涉处理得到的 InSAR DEM 高程精度及误差影响因素,并以坡度和坡向为例分析地形因子对其精度的影响。

2. InSAR 技术原理

干涉测量技术来源于光学成像原理[6],通过分析和处理干涉条纹来获取目标的相关信息。InSAR 技术将干涉测量原理与合成孔径雷达传感器相结合,通过两次获取的相位差求得传感器到地面的距离差,以此获得地面的地形信息。

2.1. 合成孔径雷达

合成孔径雷达(SAR)是一种主动式的微波传感器,拥有先进的数字处理能力,能够自动识别目标,远距离高分辨率成像。工作原理如图 1 所示,是利用传感器通过向地面发射微波,然后接收其包含有地物信息的散射回波信号,通过发射信号和接收回波之间的时间差测定距离。

其过程可以用雷达方程式定量表示,即:

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi^3) R^4} \quad (1)$$

其中 λ 是波长, P_r 雷达接收功率, P_t 为发射功率, σ 为雷达接受方向伤目标的有效面积。

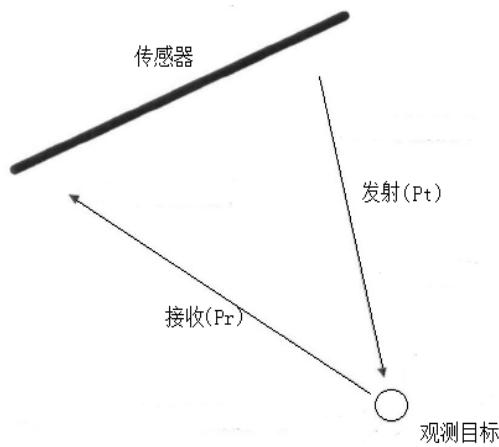


Figure 1. Principles of radar image
图 1. 雷达成像原理

2.2. InSAR 基本原理

在 SAR 的基础上发展起来的合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是 SAR 成像技术与干涉测量技术相结合的成果，干涉测量的本质是由于两次回波信号的高相干性，同一区域的两幅 SAR 图像中的相位差可以得到两次传播的路径差。由此可从空间直接获取大范围、高精度的地表形变信息和高程信息，对地表进行长时间的监测[7]。

InSAR 技术的基本原理是通过机载或星载 SAR 系统对同一地区两次成像，得到两幅 SAR 影像对，再对这两幅 SAR 复影像数据进行相干处理，获取地形高程数据及形变信息，可用于 DEM 的生成和地表形变监测。

根据成像时间分类，InSAR 可以分为单次轨道(single-pass)和重复轨道(repeat-pass)两种模式[8]。单次轨道干涉是指在同一机载或星载平台上的两副天线同时对地观测，一起接收地面回波信号，其中一副发射信号；重复轨道干涉是指一副天线在相邻的重复轨道对地面同一点进行两次近平行的观测，获取地面点的复影像对。无论采取哪种模式，其基本干涉原理是一样的。

根据基线距与飞行方向之间的关系，InSAR 又可以分为沿轨(along-track)和横跨轨道(across-track)两种[9]。沿轨是指基线与飞行方向平行，主要出现在机载双天线模式中，应用于海洋动态监测与分析，能测量运动目标沿距离方向的速度。横跨轨道是指基线与卫星飞行方向垂直，是比较常用的模式，在机载和星载平台中都可以应用。

目前国际上常用的传感器都是利用重复、横跨轨道干涉处理进行测量的，本文以单天线重复轨道模式为例，阐述 InSAR DEM 建立的基本原理[10]。

2.2.1. 几何公式

如图 2 所示，为 InSAR 基本原理示意图， A_1 和 A_2 分别表示两天线的位置，它们之间的距离 B 为基线距。基线 B 和水平方向的夹角为 α ， H 为站台高度。地面点 P 到天线 A_1 的斜距为 ρ ，到天线 A_2 的斜距为 $\rho + \delta_\rho$ 。 θ 是 A_1 的基准角， P 点高程为 h 。

两斜距的差 δ_ρ 可以通过相应像素的绝对相位差 φ 估算：

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \delta_\rho \quad (2)$$

其中 λ 为雷达信号波长。

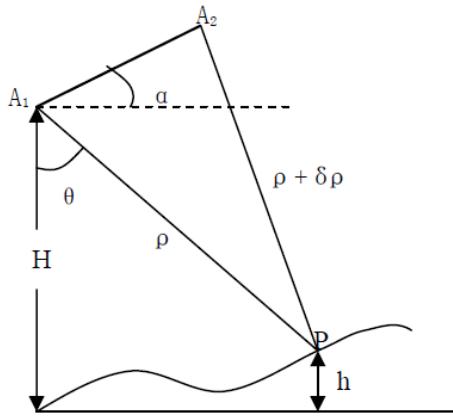


Figure 2. Principles of InSAR technique
图 2. InSAR 技术基本原理

由图 2 的几何模型并利用余弦定理可得：

$$(\rho + \delta_\rho)^2 = \rho^2 + B^2 + 2\rho B \sin(\alpha - \beta) \quad (3)$$

则：

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{(\rho + \delta_\rho)^2 - \rho^2 - B^2}{2\rho B} \quad (4)$$

因为 $\rho \gg B$ 且 $\rho \gg \delta_\rho$ ，将式(2)代入(4)得：

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{\delta_\rho}{B} = -\frac{\lambda\varphi}{4\pi B} \quad (5)$$

$$\theta = \alpha - \arcsin\left(\frac{\lambda\varphi}{4\pi B}\right) \quad (6)$$

所以，只要确定天线高度 H 、相位差 φ 、基线距 B 、基线与水平方向夹角 α 和天线入射角 θ ，就可以计算出 P 点的高程值 h ：

$$h = H - \rho \cos \theta \quad (7)$$

式(6)和式(7)揭示了干涉相位差与高程 h 之间的数学关系，若已知几何关系和轨道参数等，就可以从相位差计算出地面对点的高程值。

需要注意 φ 是解缠以后的相位，而干涉测量得到的相位值是真实干涉相位在 $[-\pi, \pi)$ 内的主值，即缠绕相位，必须要经过相位解缠[11]操作才能获得与地表形变相关联的真实干涉相位以及目标的高程信息。

另外，空间基线在垂直和平行于主影像视线方向可分为平行基线和垂直基线 B_{\parallel} 和垂直基线 B_{\perp} ，由图 2 可知：

$$B_{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha) \quad (8)$$

$$B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha) \quad (9)$$

由于 $\rho \gg B$ ，可以用 δ_ρ 近似替代 B_{\parallel} 从而计算得出 θ 。这两个基线分量在相位转化为高程的过程中十分重要， B_{\perp} 的长度还决定了干涉测量系统中相位对高程的敏感程度， B_{\perp} 越长，敏感程度越高，反之敏感程度越低。

2.2.2. 基本流程

InSAR 采用单视复数影像[12] (SLC)生成 DEM 的基本流程可分为三个部分：

一是数据导入。包括读取不同格式的卫星数据、精密轨道数据，前置滤波等前期处理工作。

二是生成干涉图。包括 SAR 影像对的精确配准，基线估算，干涉图和相干系数图的生成，后置滤波和相位解缠等。

三是生成 DEM。包括相位到高程的转换，地理编码和生成数字高程模型。

从两幅 SLC 到生成 DEM 的数据处理流程可以用图 3 表示：

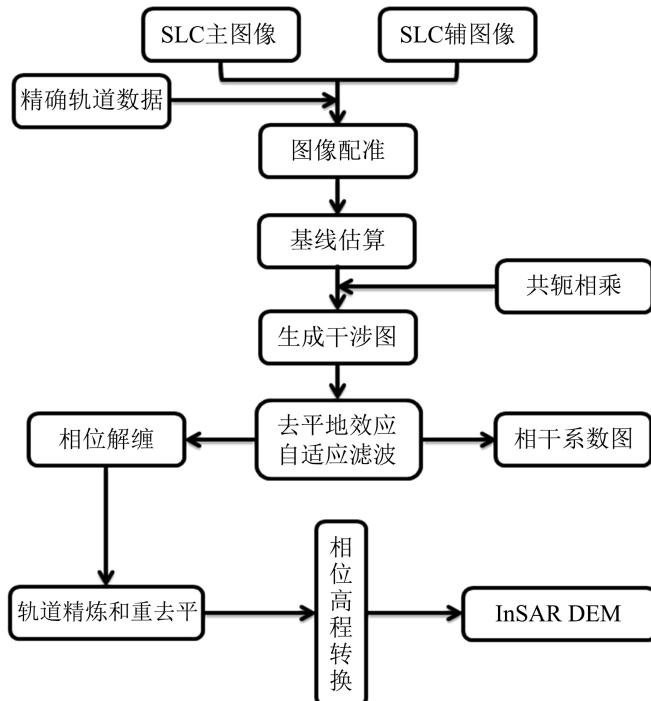


Figure 3. InSAR flowchart
图 3. InSAR 处理流程图

3. 实验数据及其处理

本文使用 Sarmap 公司研发的 ENVI SARscape 软件[13]进行 InSAR 处理。SARscape 是基于 ENVI 遥感图像处理软件的雷达图像处理软件，提供图形化的操作界面，具有专业的雷达图像处理和分析功能，能自动检测、选择参考图像及匹配图像，将处理过程简洁化。

用 SARscape 读取 Envisat ASAR 文件，获得单视复影像(SLC)文件。对 SLC 像对干涉处理，产生干涉图，再经相位解缠等步骤可生成高精度的 DEM。

3.1. 实验数据

巴姆城(Bam)位于伊朗东南部平原地带，是伊朗最古老的城市之一，被称为“沙漠里的翡翠”。该地区气候干燥，地表植被匮乏，空间失相干很小，因此成为了 InSAR 实验研究的典型目标区。

本实验选取欧空局 Envisat-1 卫星分别于 2003 年 6 月 11 日和 12 月 3 日获取的 2 幅伊朗 Bam 地区 SAR 图像作为源数据，实现干涉测量生成 DEM 的过程，所用数据为伊朗 BAM 地区的 ASAR 数据。

其基本参数见表 1：

Table 1. Basic parameter of experiment data
表 1. 实验数据基本参数

名称	获取时间	轨道编号	轨道方向	时间基线
orbit66_11jun03.n1	2003.6.11	6687	下行轨道	
orbit91_03dec03.n1	2003.12.03	9492	下行轨道	172 天

3.2. 数据处理

通过基线估算可以看出干涉测量的精度随相干性的增加而提高。具体结果见表 2:

Table 2. Result of baseline estimation
表 2. 基线估算结果

基线长度 Normal Baseline (m) = -475.145
临界基线: Critical Baseline min-max (m) = [-930.973] – [930.973]
能探测的最小高程变化: 2 PI Ambiguity height (m) = 19.364
能探测最小形变量: 2 PI Ambiguity displacement (m) = 0.028
多普勒中心差: Doppler Centroid diff. (Hz) = -118.367
临界范围: Critical min-max (Hz) = [-1652.416] – [1652.416]
时间基线: Time Baseline (Days) = 175.000

基线估算结果显示, 基线长度在临界基线范围内, 多普勒中心差在临界范围内。本次实验所用的干涉像对符合 InSAR 技术质量要求。

在 SARscape 中的 Interferogram generation 模块, 输入两景 SLC 数据, 以 Bam 地区 SRTM-3 DEM 数据作为参考 DEM 提供干涉处理所需的地面投影参数和参考椭球信息, 经过配准和多视输出干涉图、条纹图和强度图。数据处理变化过程如图 4 所示:

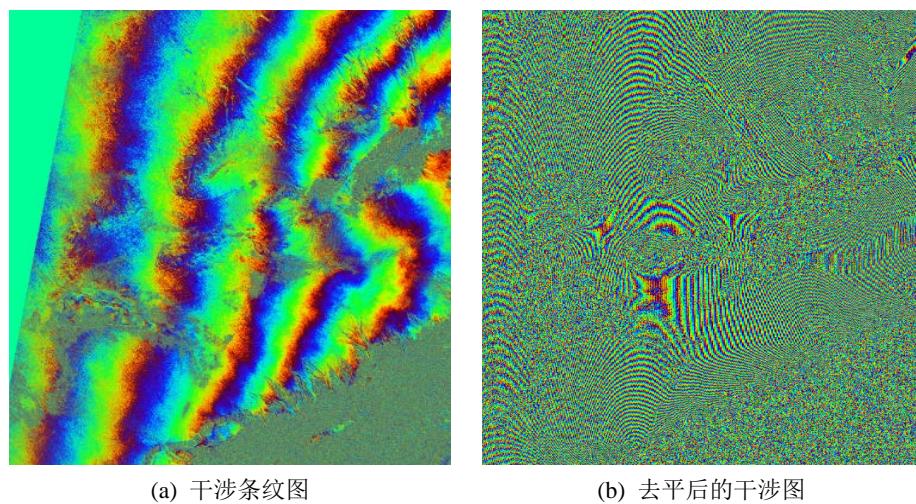


Figure 4. Result of Multi-look processing
图 4. 多视处理结果

经过干涉处理生成的干涉图还带有较大的相位误差，滤波能去除相位噪声，生成干涉的相干系数图和滤波后的主图像强图如图 5 所示：

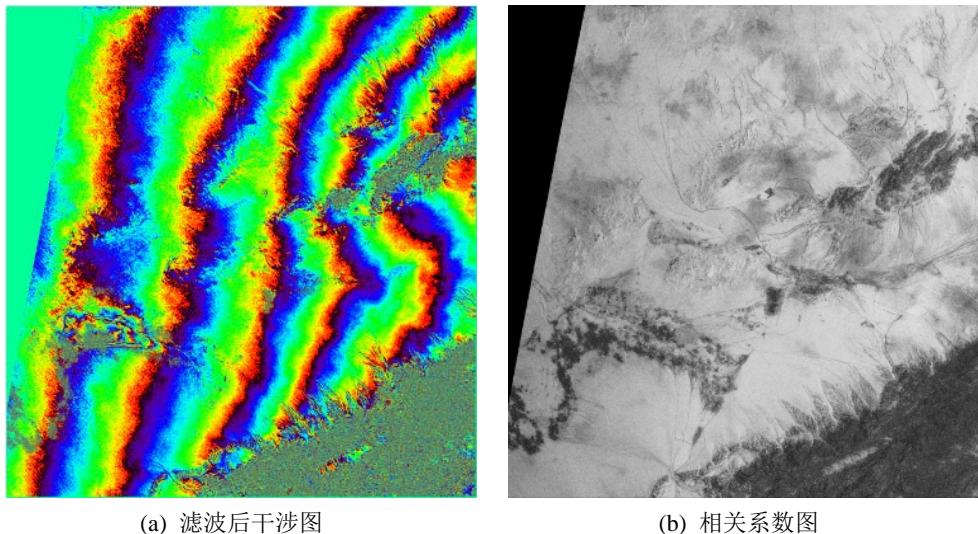


Figure 5. Result of adaptive filtering and coherence calculation
图 5. 自适应滤波及相干性计算结果

设置相干性阈值为 0.18。为了限制区域增长过程中的相位突变，相干性阈值一般设置为设置在 0.15~0.2 之间，避免相位解缠结果中不连续的区域产生“相位孤岛”。解缠后的相位图如图 6 所示：

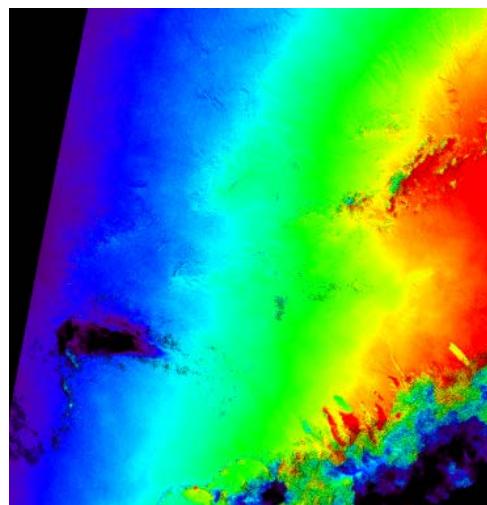


Figure 6. Phase entanglement diagram
图 6. 相位纠缠图

即使轨道非常精确，都是需要轨道控制点的，用来在重去平的一步进行相位偏移修正(如恒定相位去除)。

首先需要选取地面控制点生成控制点文件，选取的控制点必须要分布在整幅图像上，避免选择地形残差条纹区域。选好的地面控制点如图 7 中的红点，本文共选取控制点 25 个。

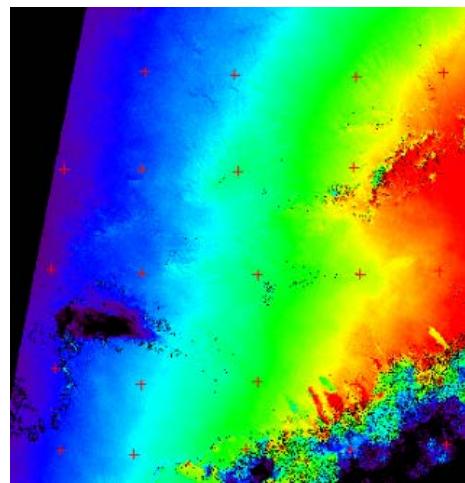
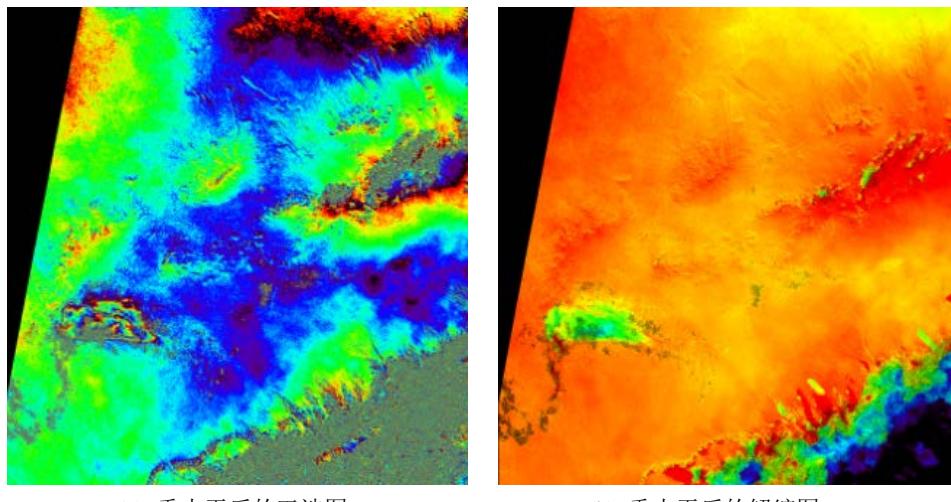


Figure 7. Reference point distribution diagram
图 7. 控制点分布图

重去平后的干涉图和解缠图结果如图 8 所示：



(a) 重去平后的干涉图

(b) 重去平后的解缠图

Figure 8. Result of flattening

图 8. 重去平结果

轨道精炼参数如下所示，其中第一行 RMS 小于 15，符合精度要求：

A-priori achievable RMS (m) = 2.6471041704

Orbital Refinement fitting:

Orbital shift in X direction (m) = -1.2700766459

Orbital shift in Y direction (m) = 0.0897130228

Orbital shift in Z direction (m) = -0.6478210078

Dependency of the shift in X direction, from the azimuth position (m/pixel) = -0.0001297462

Dependency of the shift in Y direction, from the azimuth position (m/pixel) = -0.0001526803

Dependency of the shift in Z direction, from the azimuth position (m/pixel) = 0.0004257573

Absolute phase offset (rad) = -64.9712445135
 Root Mean Square error (m) = 4.5133342975
 Mean difference POINTS HEIGHT after Orbital refinement (m) = 1.4948147195
 Standard Deviation POINTS HEIGHT after Orbital refinement (m) = 7.8454153612

3.3. 实验结果及分析

干涉图处理结束后，开始 DEM 的计算。

由干涉图获取经过轨道矫正和相位解缠的非缠绕相位值，加上根据每个像素点的相干系数和轨道参数，可以计算出对应地面点的高程 H。对图像上该像素点的像素坐标(x, y)进行地理编码，转换为大地坐标(L, B)，将 SAR 数据从斜距或地距投影转换为地理坐标投影，从而生成干涉 DEM。

本文中投影信息为 UTM [14]，椭球参数来自 WGS84 坐标系统[15]，WGS 坐标分区号为 40，产品相干性阈值为 0.2。对相位缺少地区进行内插处理，最后生成的 DEM 分辨率为 25 m。生成的 InSAR DEM 文件、相干图像、精度图像和分辨率图像如图 9 所示：

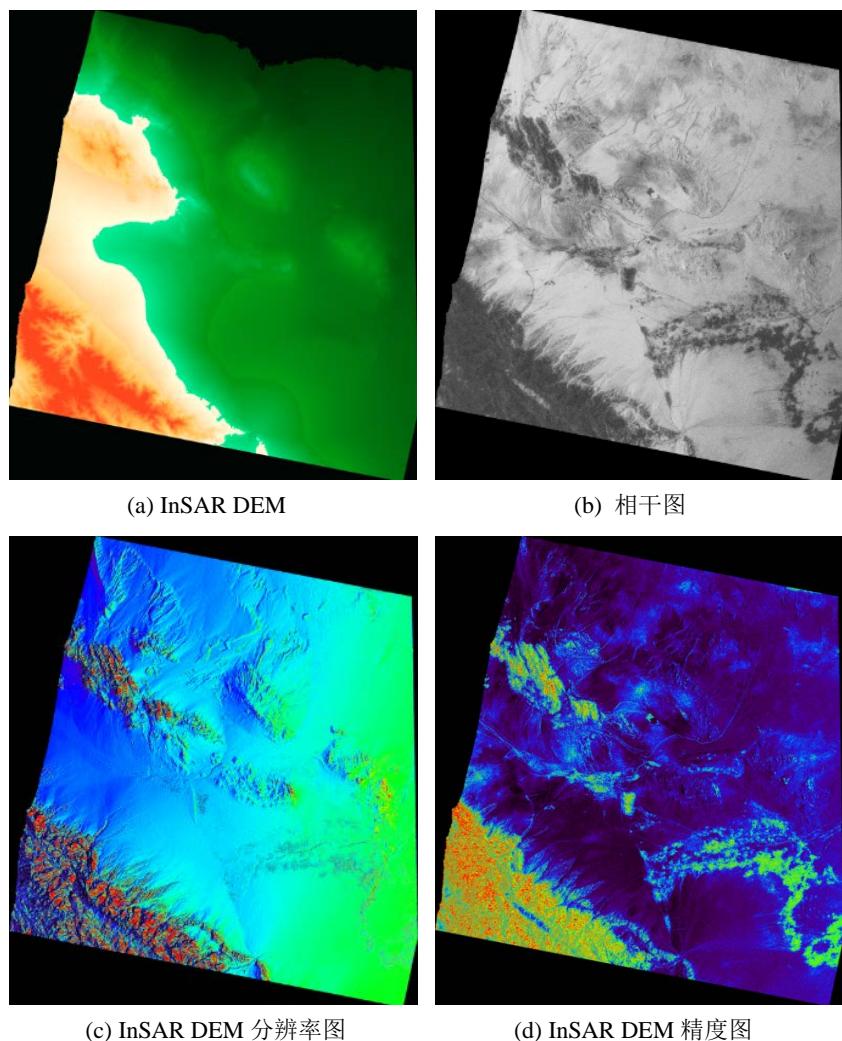


Figure 9. Experiment result

图 9. 实验结果

3.3.1. 以 SRTM-3 DEM 为标准的精度评估

航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)是美国国家地理空间情报局(NGA——前身为国家影像制图局, NIMA)投资约两亿美元与国家航空航天局(NASA)合作开发的一项国际航天测绘项目。

以巴姆地区 SRTM-3 DEM, 作为参考生成 InSAR DEM, 同时作为评价标准分析 InSAR DEM 的精度。相同坐标范围的干涉 DEM 与参考 DEM 逐像素对应相减得到高程差异值, 生成高程差异图。

图 10 为实验所得 InSAR DEM 与剪裁后的 SRTM-3 DEM 对比图。

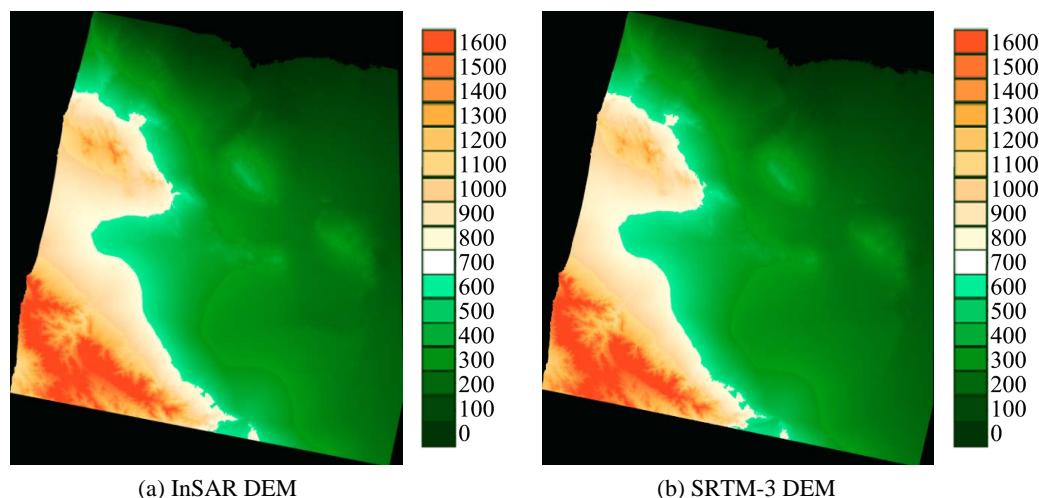


Figure 10. Comparison chart of experiment

图 10. 实验对比图

通过对比可以看出 InSAR DEM 的分辨率与 SRTM-3 DEM 的分辨率相差不大, 能清楚地显示出地形起伏的纹理特征。

将两幅 DEM 逐像素相减, 获得高程差异。如图 11 所示, 可以看出高差变化与高程变化相似, 说明平坦地区高程精度较高, 而地形起伏较大的地区高程精度较差。也就是说, 高程差与地形特征有关, 即高程精度受地形因子影响。

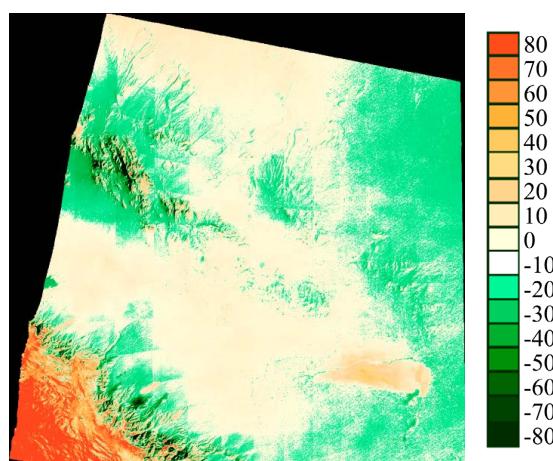


Figure 11. Elevation differences diagram

图 11. 高程差异图

如图 12 所示, 可以看出误差基本遵循正态分布, 离散度较小, 分布曲线陡峭。统计分析得出高差标准差为 12.5 m。

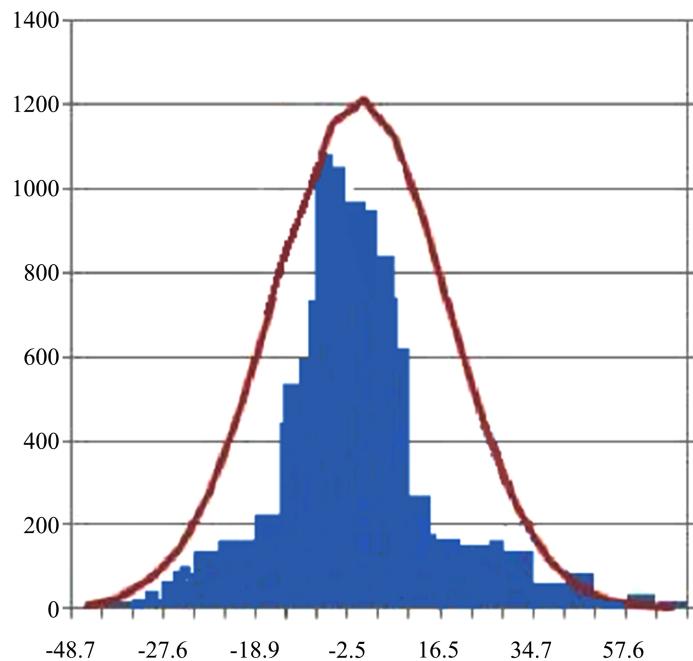


Figure 12. Distribution diagram of geodetic difference
图 12. 高差分布图

实验得到的 InSAR DEM 的高程与 SRTM-3 DEM 存在误差主要原因可能有:

- 1) 实验所用的星载 SAR 影像对的成像时间相隔将近六个月, 导致了时间去相干, 因此产生较大的干涉相位噪声, 使得提取的 DEM 精度受到影响。
- 2) SRTM-3 DEM 的生成时间是 2002 年, 实验区卫星数据的获取时间是 2003 年, 在这段时间间隔了可能存在地形的变化, 产生基线去相干。
- 3) 采用精密轨道参数并不能完全消除卫星轨道误差, 由此产生的附加相位, 会影响干涉成果的精度。

由于 SAR 本身的特性, 在山区或地表起伏较大的地区, DEM 精度受到的影响更大。因此在起伏较大的区域, InSAR DEM 的精度较低。所以在相对平坦的地区, 利用 InSAR 技术生成 DEM 是较好的选择; 而在地形相对陡峭的山区, 两幅雷达影像的相干性降低, 干涉处理误差增大, 从而影响了 InSAR DEM 的精度。

要进一步改善 InSAR 技术提取 DEM 的精度, 可采取的措施有:

- 1) 提高 SAR 影像的质量;
- 2) 利用高精度的地面控制点文件对基线参数进行纠正;
- 3) 利用成像时的大气数据对大气延迟进行修正;
- 4) 进行有效的图像失真校正;
- 5) 对雷达影像对进行多视处理消除热噪声。

3.3.2. 地形分析

基于栅格的 DEM 计算方法是对栅格图像上的每一个像元进行计算。本文以 InSAR DEM 为基础, 通

过 Envi 软件中的地形分析提取 DEM 研究区域各个点的坡度坡向，并以此为例分析地形因子对 DEM 精度的影响。

如图 13 所示，栅格图形中每一个点的像素单元值为该点的坡度值。

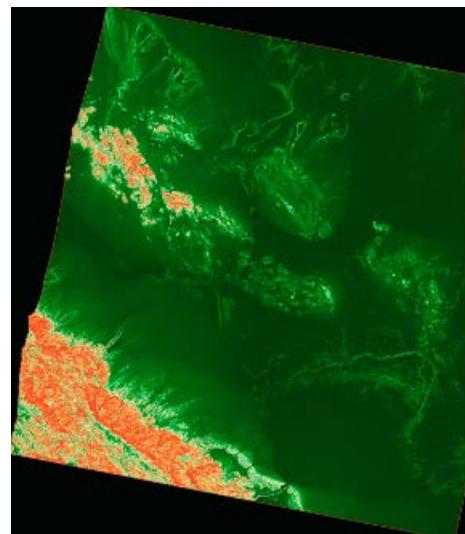


Figure 13. Gradient diagram
图 13. 坡度图

将栅格图形分类汇总，得出 0° ~ 68° 的坡度统计图和 0° ~ 360° 范围内的坡向统计图，如图 14 和图 15 所示。

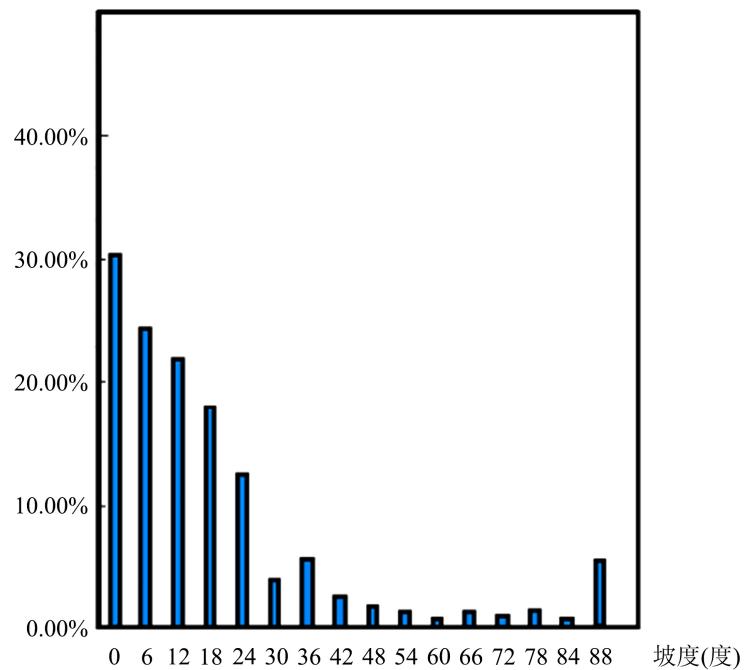


Figure 14. Distribution diagram of slope
图 14. 坡度分布图

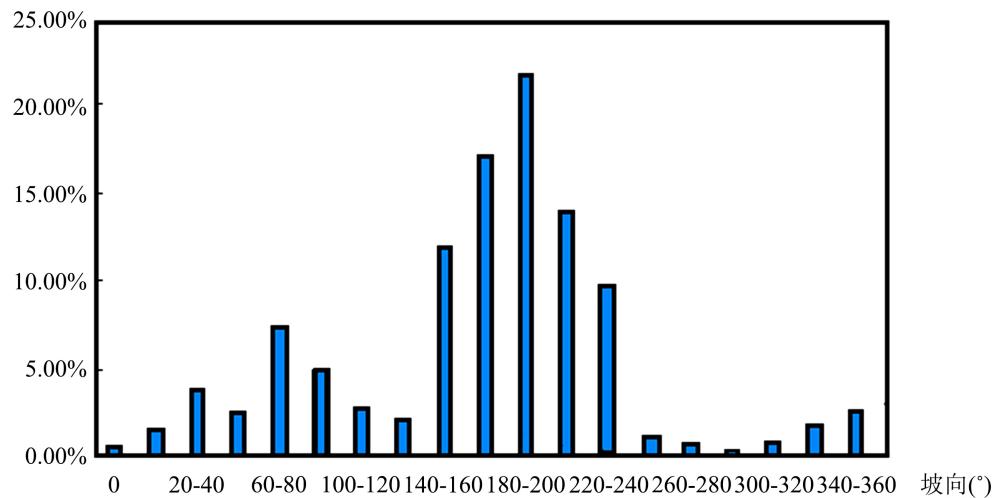
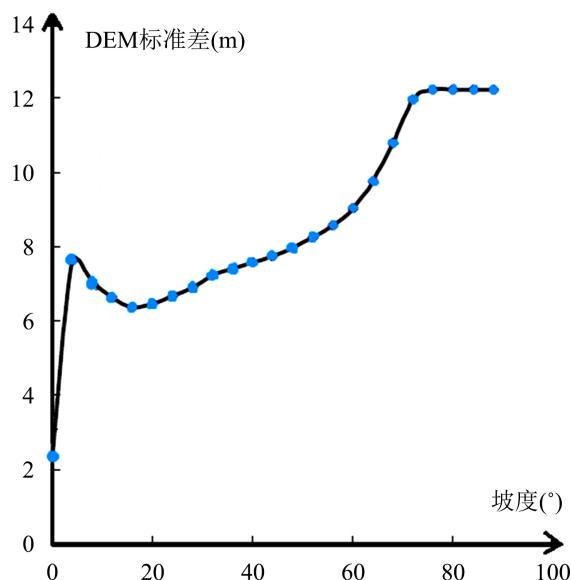
**Figure 15.** Distribution diagram of aspect**图 15.** 坡向分布图

图 16 为不同坡度与 DEM 的精度关系, 图 17 表明了坡向对 DEM 的精度的影响。

图 16 表明, 随着坡度增加, DEM 标准差逐渐变大, 精度逐渐降低。坡度在 80° 左右标准差达到最大值。由图 17 可以看出, DEM 的精度与坡向变化没有明显关系。

由此可以得出如下结论:

- 1) InSAR DEM 的精度可以满足一般要求, 即 InSAR 技术提取 DEM 是一个有效的方法。
- 2) InSAR DEM 在平坦地区精度较高, 在地形起伏较大的区域精度比 SRTM-3 DEM 低, 本次实验中两幅 DEM 的高差标准差为 12.5 米。
- 3) 随坡度的增加, DEM 精度逐步减小, 即坡度越大精度越小。
- 4) InSAR DEM 的精度与坡向没有明显关系。

**Figure 16.** Relation graph of slope and standard deviation**图 16.** 坡度与标准差关系图

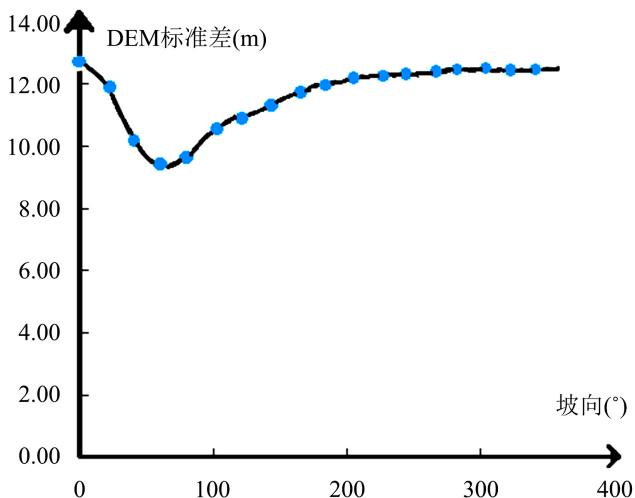


Figure 17. Relation graph of aspect and standard deviation

图 17. 坡向与标准差关系图

4. 结束语

本文对星载 InSAR 技术生成 DEM 的原理进行了深入分析, 实现了从 ENVISAT 卫星数据到生成数字高程模型的全过程, 研究了从干涉图的生成到由干涉图反演高程的过程中, 限制 DEM 精度的各类因素。

本文利用 InSAR 技术, 以外部 DEM 数据辅助生成干涉图, 在相位转换前去除干涉图中的系统误差, 以伊朗 Bam 地区的 ENVISAT 卫星数据进行实验, 提取出 DEM, 并与 SRTM-3 DEM 的精度进行了比较。研究结果表明, 利用星载 SAR 提取 DEM 的分辨率与 SRTM-3 DEM 的分辨率相近。

参考文献

- [1] 汤国安, 龚健雅, 陈正江, 成燕辉, 王占宏. 数字高程模型地形描述精度量化模拟研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 361-365.
- [2] 吴一戎, 朱敏慧. 合成孔径雷达技术的发展现状与趋势[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(2): 121-123.
- [3] 邹凡. InSAR 获取数字高程模型[J]. 冶金管理, 2020(23): 85-86.
- [4] 苗放, 梁军, 叶成名, 杨智翔. 用干涉雷达技术提取数字高程模型[C]//中国地球物理学会第二十二届年会论文集. 成都: 四川科学技术出版社, 2006: 754-755.
- [5] 李德仁. 利用遥感影像进行变化检测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003(S1): 7-12.
- [6] 李德仁, 廖明生, 王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(8): 664-668.
- [7] 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.
- [8] 刘国祥. InSAR 基本原理[Z]. InSAR 系列讲座, 2004.
- [9] 索志勇. 垂直航迹/沿航迹干涉合成孔径雷达信号处理技术研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [10] 靳国旺. InSAR 获取高精度 DEM 关键处理技术研究[D]: [博士学位论文]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2007.
- [11] 施慧宇, 王延霞, 杨海燕, 程子莹, 夏奇亮, 欧阳龙. 相位解缠算法对比研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2022, 36(1): 9-13. <https://doi.org/10.19352/j.cnki.issn1671-4679.2022.01.002>
- [12] 陈鹰, 于晶涛. INSAR 复数影像配准方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2005(8): 13-15.
- [13] 佚名. ENVI SARscape 高级雷达数据处理工具[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 887.
- [14] 孙立东. 高斯-克吕格投影和横轴墨卡托(UTM)投影的异同[J]. 港工技术, 2008(5): 51-53.
- [15] 陈俊勇. 世界大地坐标系统 1984 的最新精化[J]. 测绘通报, 2003(2): 1-3.