

文章编号:1001-9081(2010)02-0537-03

## 利用星载 InSAR 技术提取镇江地区 DEM 及其精度分析

何敏,何秀凤

(河海大学 卫星及空间信息应用研究所,南京 210098)

(mhe@hhu.edu.cn)

**摘要:** InSAR 技术是目前获取高精度数字高程模型 (DEM) 的一种新方法。为了分析 InSAR 技术提取 DEM 的精度,首先介绍了美国航天飞机雷达 SRTM DEM 的精度和数据结构,然后以江苏镇江地区作为试验区,采用 ERS1/2 卫星影像来提取 DEM,并对星载 SAR 提取的 DEM 与 SRTM 3 弧秒分辨率 DEM 的精度作了比较。结果表明,利用星载 SAR 提取的 DEM 分辨率与 SRTM 3 弧秒分辨率的 DEM 相当,能很好地显示出地形起伏 (如山脉、沟谷) 的纹理特征。进一步的研究还表明,利用 InSAR 技术提取 DEM 的精度与 SRTM 3 DEM 之间存在 5 米左右的系统误差,并对产生这一系统误差的原因作了详细分析。

**关键词:** 星载合成孔径雷达;干涉合成孔径雷达;航天飞机雷达地形测绘任务;数字高程模型

**中图分类号:** P237; TP391.41 **文献标志码:** A

## DEM generation and accuracy analysis in Zhenjiang using InSAR

HE Min, HE Xiu-feng

(Institute of Satellite Navigation and Spatial Information System, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is a new method for acquiring precise Digital Elevation Model (DEM). To obtain the high quality of the DEM generated by spaceborne InSAR, the accuracy and data structure of SRTM DEM were investigated. Then DEM was generated using ERS1/2 SAR images in Zhenjiang of China, and its accuracy was compared with that of SRTM3 DEM. The results show that the resolution of the DEM generated by spaceborne InSAR was correspondent with SRTM3 DEM. The surface features of the test zone in Zhenjiang were displayed perfectly. Moreover, there are about 5m system errors from spaceborne InSAR DEM and SRTM3 DEM. The causes of errors were analyzed in detail.

**Key words:** spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR); Interferometric SAR (InSAR); Shuttle Radar Topography Mission (SRTM); Digital Elevation Model (DEM)

### 0 引言

精确的地形信息在地质、地形、水文、冰山、自然灾害监测、自然资源调查等领域有着十分重要的作用。科研人员一直在进行各种探讨和研究,以求尽可能在短时间内获取覆盖面积广、空间分辨率高、精度高的数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)。合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 与其他遥感技术相比,具有全天候、全天时以及一定的地面穿透能力等独特优点<sup>[1-2]</sup>。而干涉合成孔径雷达 (Interferometric SAR, InSAR) 技术又充分利用了雷达所获取的相位信息,极大地增加了雷达数据所提供的信息量,扩大了 SAR 的应用范围。InSAR 技术为获取快速精确的 DEM 提供了一个全新的方法,是雷达遥感的最新研究方向。正因为如此,利用 InSAR 技术提取 DEM 的研究已成为世界各国地质领域研究的热点。

InSAR 提取 DEM 又有星载和机载之分,本文重点研究星载 SAR 影像提取 DEM,并分析所获得的 DEM 精度。美国航天飞机雷达 SRTM DEM 是目前唯一免费提供全球性的 DEM,但是纵观国内外的参考文献,对于星载 SAR 提取 DEM 精度与 SRTM DEM 精度作比较和分析的报道并不多见。本文首先介绍星载 InSAR 技术提取 DEM 的原理,分析了 SRTM DEM 精度和数据结构,然后以江苏镇江地区作为试验区域,分析了

ERS1/2 卫星影像提取 DEM 的误差源,并对星载 SAR 提取的 DEM 与 SRTM 3 弧秒分辨率 DEM 的精度作了比较。结果表明,星载 InSAR 技术提取的 DEM 分辨率与 SRTM 3 弧秒分辨率的 DEM 相当,并能很好的显示出地形起伏 (如山脉、沟谷) 的纹理特征。研究结果还表明,利用 InSAR 技术提取 DEM 的精度与 SRTM3 DEM 之间存在 5 m 左右的系统误差,文中对产生这一系统误差的原因作了详细分析。

### 1 星载 InSAR 技术提取 DEM 的原理

InSAR 技术按工作原理可以分为交轨、顺轨和重轨三种方式。星载 SAR 通常采用第三种方式。其原理是利用同一卫星在相邻轨道上对同一地区进行两次 SAR 成像。利用两幅 SAR 图像的相位差所产生的干涉条纹,便可提取出地表高程信息。图 1 描述了雷达干涉测量的一般原理。

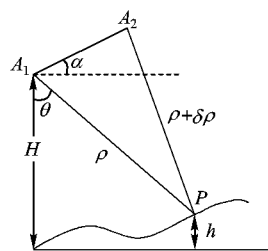


图1 InSAR 技术的基本原理

收稿日期:2009-08-18;修回日期:2009-10-10。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50579013)。

作者简介:何敏(1980-),女,四川内江人,博士研究生,主要研究方向:InSAR 技术;何秀凤(1962-),女,江苏泰州人,教授,博士生导师,主要研究方向:3S 集成及应用。

图1中:  $A_1, A_2$  为天线的位置,  $H$  为  $A_1$  的高度,  $P$  为目标点,  $h$  为目标点  $P$  的高程,  $\theta$  为  $A_1$  的入射角,  $B$  为两天线间的距离, 即基线,  $\alpha$  为基线  $B$  相对于水平方向的夹角,  $\rho$  为  $A_1$  到  $P$  的斜距,  $\rho + \delta\rho$  为  $A_2$  到  $P$  的斜距。

地面目标点  $P$  的高程  $h$  为<sup>[3]</sup>:

$$h = H - \rho \cos \theta \quad (1)$$

由于

$$(\rho + \delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 + 2\rho B \sin(\alpha - \theta) \quad (2)$$

所以

$$\rho = \frac{\delta\rho^2 - B^2}{2B \sin(\alpha - \theta) - 2\delta\rho} \quad (3)$$

如果  $A_1, A_2$  对  $P$  的测量相位差  $\varphi$  为:

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

其中  $\lambda$  为雷达信号波长, 则:

$$\delta\rho = \frac{\lambda\varphi}{2\pi} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)后再代入式(1), 得:

$$h = H - \frac{\left(\frac{\lambda\varphi}{2\pi}\right)^2 - B^2}{2B \sin(\alpha - \theta) - \frac{\lambda\varphi}{\pi}} \cos \theta \quad (6)$$

由式(6), 只要天线高度  $H$ 、相位差  $\varphi$ 、基线  $B$ 、两天线的相对定向角度  $\alpha$ 、天线的入射角  $\theta$  精确可知, 就可以计算出地面目标点  $P$  的高程  $h$ 。这里需要说明是,  $\varphi$  是解缠后的相位, 而干涉雷达测量得到相位值只在主值范围内, 即是模糊的, 必须经过相位解缠后才能获得真实相位以及得到目标的高程信息。

## 2 SRTM DEM 数据

航天飞机雷达地形测绘任务 (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 是由前身为美国国家图像与测绘局的美国国家地理空间情报局 (NGA) 投资约 2 亿美元并与国家航空航天局 (NASA) 的喷气推进实验室 (JPL) 合作开发, 以及有德、意航天机构参与的一项国际航天测绘项目。SRTM 于 2000 年 2 月 11 日—22 日的 11 天飞行任务中, 完成了其使命, 生产出了北纬 60° 到南纬 57° 间覆盖全球 80% 的陆地数字高程模型 DEM。

目前美国 NASA 的官方网站 (<ftp://e0srp01u. ecs. nasa. gov/srtm/>) 上, 提供两种版本的 SRTM DEM 数据。这两种版本 DEM 的不同之处在于, 版本 2 的 DEM 是在版本 1 的基础上, 经过编辑、信息缺损补齐、水体水准测量以及海岸线确定等后处理获得的质量更好的 DEM。SRTM 生成的 DEM 有三种不同分辨率的产品, 即 SRTM1 DEM 分辨率为  $1'' \times 1''$ , SRTM3 DEM 分辨率为  $3'' \times 3''$  和 SRTM30 DEM 分辨率为  $30'' \times 30''$ 。1 弧秒 (30 m) 分辨率的 DEM 只提供给美国本土, 而 3 弧秒 (90 m) 和 30 弧秒 (900 m) 分辨率的 DEM, 可以从网站上免费下载。SRTM3 的高程基准是 EGM96 的大地水准面, 平面基准是 WGS84。SRTM3 标称的绝对高程精度是  $\pm 16$  m, 相对高程精度是 10 m, 标称的绝对平面精度是  $\pm 20$  m, 相对平面精度是 15 m<sup>[4-5]</sup>。

影响 SRTM DEM 精度的主要因素包括天线杆和姿态的量测精度、计时误差、多路径效应、相位量测误差及雷达的热噪声, 其中姿态的量测误差是主要的误差源。如舱外天线在

横滚方向  $\pm 3$  mm 的误差就会导致  $\pm 9$  m 的高程误差<sup>[6-7]</sup>。SRTM3 DEM 数据以经度和纬度分别间隔  $1^\circ$  为一个数据文件, 每个数据文件以西南角经纬度进行文件的命名, 按照数据所属的不同洲进行文件发布。数据格式为 16 位有符号整型, 按行存储, 字节顺序为 MSB。在雷达阴影区、相位解缠异常区以及其他雷达不能探测的区域, 数据用 -32768 值表示。

## 3 利用星载 SAR 数据提取 DEM 试验

### 3.1 试验区 SAR 数据及数据处理

为了分析用 InSAR 技术来提取 DEM 的精度, 我们选择由卫星 ERS1/2 以串接飞行方式分别于 1996 年 01 月 02 日和 03 日对江苏镇江地区成像所获取的 2 幅 SAR 图像作为源数据, 其轨道/帧代号分别为 23352/2961 和 3679/2961, 在斜距和方位向的分辨率分别为 7.9 m 和 4.0 m。为了考察地形起伏对 DEM 精度产生的影响, 我们截取了有山有平原的部分数据作为进一步研究对象。

采用 Delft 的精密轨道消除轨道定位误差, 利用 SNAPHU 对试验数据进行处理。方位向和距离向的视数分别为 10 和 2, 垂直基线 233.6 m, 高程模糊度 40.7 m, 相干系数如图 2 所示, 相干系数中 88% 都大于 0.5, 有利于高程的提取。

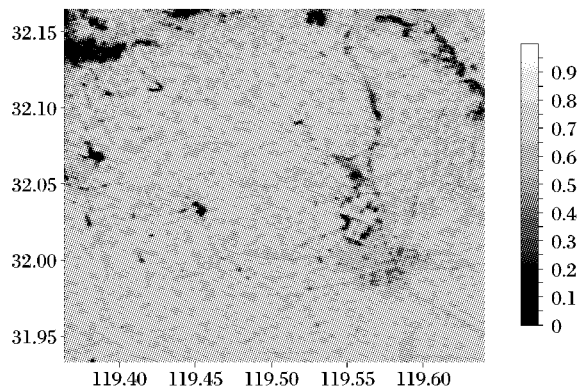


图2 相干系数图

### 3.2 DEM 精度比较

在 DEM 精度比较之前, 需要做两步工作: 1) 为了比较和分析星载 SAR 提取 DEM 精度与 SRTM DEM 精度, 使用 SRTM DEM 作为参考标准, 将星载 SAR 提取的 DEM 取样到参考 DEM 的相同空间; 2) 为了使星载 SAR 提取 DEM 与 SRTM DEM 具有相同的高程基准, 在 SRTM DEM 地势较平坦的地区, 提取了 6 个点的高程, 然后将高程信息转化为相位信息进行解缠处理, 使两者的高程具有相同的基准。

图 3 是星载 InSAR 提取的 DEM 的结果, 图 4 是 SRTM 3 弧秒分辨率的 DEM, 将星载 InSAR DEM 与 SRTM 3 弧秒分辨率的 DEM 进行比较可以看出, 星载 InSAR 技术提取的 DEM 分辨率与 SRTM3 弧秒分辨率的 DEM 分辨率相当, 并能很好地显示出地形起伏 (如山脉、沟谷) 的纹理特征。

图 5 和表 1 显示了星载 InSAR DEM 与 SRTM3 DEM 作差分处理后的结果。从图 5 可以看出 90% 以上的区域的高程差都在  $\pm 15$  m 以内, 随着地形起伏的加剧, 高程差异增大, 在山区差异最大, 可达 68 m。如在左上角的山区地带, 有许多白色的区域存在, 这些区域都是高程差异大于 15 m 的地方。此外, 从图 5 还可以看出, 从西向东存在一个系统误差, 在图像的西部, 高程差大部分为绿色和蓝色, 即高程差在 5 m 和 15 m 之间, 在图像的东部, 高程差大部分为红色, 即高程差在

-5 m 和 5 m 之间,这是由于雷达视角在近距端和远距端不同而导致的。因此,在用整幅的星载 SAR 影像获取 DEM,必须考虑由于雷达视角变化引起的近距和远距高程差异。

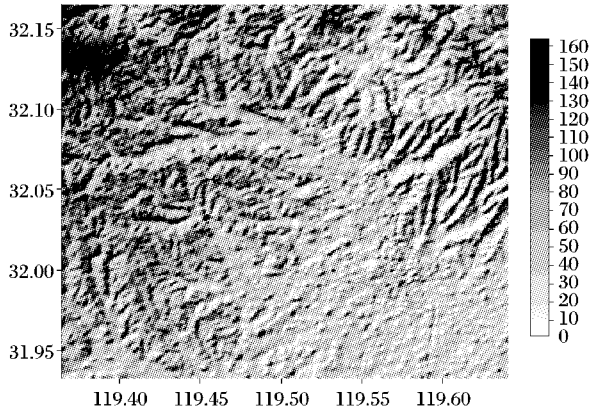


图3 利用 InSAR 技术提取的 DEM

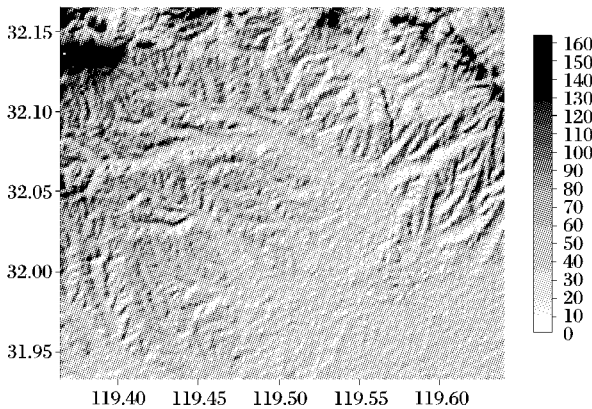


图4 SRTM 3DEM

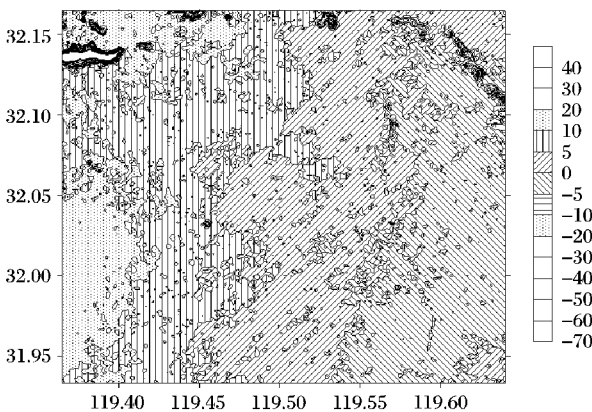


图5 星载 SAR 提取的 DEM 与 SRTM 3DEM 的高程差

InSAR 提取与 DEM 与 SRTM3 DEM 的高程差的最大值为 68 m,均值 6.38 m,标准差 4.68 m,这说明由星载 InSAR 技术提取的 DEM 与 SRTM3 DEM 之间存在约 5 m 左右的系统误差。

### 3.3 采用 InSAR 技术提取 DEM 的误差分析

星载 InSAR 技术提取的 DEM 的精度与 SRTM3 DEM 存在系统误差的主要原因是:

1) 研究区域地形起伏比较大,而且有大量的植被覆盖,即使成像时间仅隔 1 天,但时间失相关仍然存在,所以有较大的干涉相位噪声,从而使得星载 InSAR 提取的 DEM 精度受到影响。

2) 研究区域位于中国的东南部,水系比较发达,相对湿度比较大,由于没有成像时的大气资料,因而不能消除大气在

空间和时间尺度上变化引起的干涉相位附加延迟,从而降低了 DEM 精度。由参考文献[8]可知,对于特定温度,相对湿度变化与相位变化成正比关系,且随温度的升高,对相位影响量级显著增大,极端条件下,大气延迟可导致数十米的高程误差。

3) 在山区,由于地形起伏较大,会出现透视收缩、顶底位移以及雷达阴影等现象。在提取 DEM 时,没有对这些失真现象进行校正,从而使得在山区误差较大。

4) 虽然采用了 Delft 的精密轨道参数,但还不能完全消除卫星定轨误差,因而轨道误差产生了附加相位,从而影响干涉高程的精度。

5) 星载 InSAR 技术提取 DEM 与 SRTM 3 DEM 大地水准面不同,这也是造成误差的原因。

6) 试验区 SAR 像对的成像时间是 1996 年,而 SRTM 3 DEM 的生成时间是 2002 年,在这段时间间隔中存在人为的地形变化。

## 4 结语

本文利用 InSAR 技术将镇江地区部分区域提取的 DEM 与 SRTM3 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 SRTM3 DEM 相当,能清楚地显示出山脉、沟谷等地表纹理特征。此外,研究结果还表明,星载 InSAR 提取 DEM 的精度与 SRTM3 DEM 之间存在 5 m 左右的系统误差,文中分析了产生这个系统误差可能的原因。为了进一步改善利用星载 SAR 提取 DEM 的精度,可采用的措施有:1) 提高 SAR 影像的质量;2) 利用成像时的大气数据或 GPS 数据对大气延迟相位进行修正;3) 进行有效的图像失真校正;4) 使用高精度的地面控制点对基线参数进行校正;5) 对植被覆盖比较严重和地形起伏比较大的区域,可选择 L 波段的数据,以便改善干涉像对的时间相关性。

### 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新技术——合成孔径雷达干涉[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 734-740.
- [2] TSAY J-R, CHEN H-H. InSAR for DEM determination in Taiwan by using ERS tandem mode data [J]. Asian Journal of Geoinformatics, 2004, 5(1): 69-77.
- [3] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [4] SRTMDocumentation[EB/OL]. [2009-08-01]. <http://se0srp01u. nasa.gov/srtm/>.
- [5] 陈俊勇. 对 SRTM3 和 GTOPO30 地形数据质量的评估[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(11): 941-944.
- [6] WERNER M, HAEUSLER M. X-SAR/SRTM instrument phase error calibration[C]// IGARSS 2001: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, Australia: IEEE, 2001, 2: 742-744.
- [7] DUREN R, WONG E, BRECKENRIDGE B, et al. Metrology, attitude, and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3365: 51-60.
- [8] HANSEN R, FEIJT A. A first quantitative evaluation of atmospheric effects on SAR interferometry [C]// Proceedings of ESA FRINGE'96 Workshop. Zürich: European Space Agency, 1996: 277-282.