

文章编号: 1007 4619(2006) 04 0475 07

# 粗 精轨道数据对卫星 InSAR DEM 精度影响的对比分析

陈 强, 刘国祥, 李永树

(西南交通大学 测量工程系, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 本文在介绍 InSAR 系统中卫星轨道状态矢量的内插方法的基础上, 从理论和实际两方面分析了轨道数据误差对参考椭球面相位、地形干涉相位和数字高程模型 (DEM) 精度的影响。以上海局部地区作为实验场, 采用 ERS 1/2 卫星 SAR 影像数据, 分别使用欧洲空间局粗略轨道数据和荷兰 Delft 大学空间研究中心精密轨道数据进行了干涉处理, 生成了两种情况下的 DEM, 并对相关精度进行了对比与分析。研究结果表明, 使用精轨数据建立的 DEM 的精度明显高于基于粗轨数据建立的 DEM 的精度。

**关键词:** 粗 精轨道数据; 数字高程模型; 精度; 干涉相位; 参考面相位

**中图分类号:** TP722.6/P283.4 **文献标识码:** A

## Comparison and Evaluation on Accuracy in Satellite InSAR DEM Derived Using Coarse and Precise Orbit Data

CHEN Qiang LIU Guo-xiang LI Yong-shu

(Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China)

**Abstract** This paper first introduces the interpolation technique of satellite orbit state vectors in the synthetic aperture radar interferometry (InSAR) system. From both the theoretical and practical viewpoint, we then discuss and analyze the influence of orbit data errors on the accuracy of the reference phase, the topographic phase and the resulting digital elevation model (DEM). Selecting a part area of Shanghai as the testing site, the experiment of interferometric processing and DEM generation is performed using the satellite ERS-1/2 SAR images as well as the coarse and precise orbit data provided by European Space Agency (ESA) and Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (DEOS), respectively. Comparison and analysis on the relevant accuracies are thus made for the two types of orbit data. The results show that the accuracy in the DEM generated with precise orbit data is prominently higher than that with coarse orbit data.

**Key words** coarse/precise orbit data; DEM; accuracy; interferometric phase; reference phase

## 1 引 言

卫星合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 技术可应用于建立数字高程模型 (Digital elevation model

DEM) 和监测地表形变<sup>[1-4]</sup>, 其基本思想是借助卫星重复飞越同一地区所获取的多幅合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar SAR) 影像, 通过影像配准并取样到相同空间, 采用逐像素相位差分方法, 提取与两雷达天线到地面同一分辨单元的距离差成比例

收稿日期: 2005-06-30 修订日期: 2005-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40374003 40371098)。

作者简介: 陈 强 (1974—), 男, 2000年毕业于西南交通大学测绘工程专业, 现任西南交通大学测量工程系讲师, 在读博士研究生, 主要从事 InSAR 理论及应用研究。E-mail: svjtuqc@sina.com

的相位信号, 基于卫星轨道数据和成像几何关系, 完成地表三维重建及地形面变探测。

不可避免地, 在应用卫星 InSAR 建立 DEM 的干涉数据处理链中, 有三个过程应使用卫星轨道状态矢量(即卫星位置和速度矢量)。第一, 在主影像与从影像的粗配准过程中, 可借助两次成像雷达卫星的轨道数据, 根据成像几何关系(构像系统方程: 距离方程、Doppler 方程和椭球方程), 计算两影像中心像元在方位向和斜距向的近似偏移量, 为后续的精确定配准提供初始偏移值; 第二, 在逐像素相位差分生成干涉图的过程中, 为了提取仅反映地形起伏的相位分量且便于随后的相位解缠, 需要根据卫星轨道状态矢量, 计算并去除参考椭球面相位(有些文献也称之为平地相位); 第三, 在相位解缠完成后, 需要根据卫星轨道状态矢量和成像几何关系, 计算基于地面坐标框架下的数字高程模型(规则格网)。

目前, 国内外应用 InSAR 方法建立数字高程模型所使用的卫星 SAR 影像, 主要来自于欧洲空间局(European Space Agency, ESA) ERS 1/2 卫星的 C 波段影像、日本 JERS 1 卫星的 L 波段影像和加拿大 Radarsat 卫星的 C 波段影像。国际上三个机构提供 ERS 1/2 卫星的定轨服务, 它们分别是 ESOC (European Space Operations Centre)、D-PAF (The German Processing and Archiving Facility) 和 DEOS (Delft Institute for Earth-Oriented Space Research)。由于所采用的计算模型和定轨方案等的差异, 不同机构算得的轨道参数精度是不一样的。中国科学院上海天文台等单位也研制了一套 ERS-2 卫星的精密定轨计算软件 SODS-VCE。据相关研究和分析<sup>[5, 9]</sup>, 荷兰 Delft 大学 DEOS 提供的精密轨道数据精度较高, 轨道径向精度达到 5—6 cm, 法向精度优于 20 cm。

纵观国内外有关参考文献, 关于轨道数据对干涉 DEM 精度的影响分析与评价并不多见。因此, 本文在介绍卫星轨道状态矢量内插方法的基础上, 将从理论和实际上分析轨道数据误差对参考椭球面相位、地形干涉相位和 DEM 精度的影响。本研究选择上海局部地区作为实验场, 基于 ERS 1/2 卫星 SAR 影像数据, 分别使用粗略轨道数据(由 ESA 提供, 附于 ERS SAR 影像文件头中)和精密轨道数据(由 DEOS 提供)来进行干涉数据处理, 目的在于对比分析粗略轨道数据对干涉 DEM 生成及其精度的影响情况。其中, 干涉 DEM 精度评价的参考标准是由国

家测绘局提供的上海地区 1:5 万的数字高程模型; 两幅 C 波段 SAR 影像数据是由 ERS-1 和 ERS-2 卫星分别于 1996 年 3 月 25 日和 26 日对上海地区成像所获取。

## 2 卫星轨道状态矢量内插方法

SAR 卫星轨道状态数据是指成像瞬间卫星的位置坐标  $(X_S, Y_S, Z_S)$  和速度矢量  $(V_X, V_Y, V_Z)$ 。ERS 1/2 影像文件中附带有 5 个时刻的粗略轨道状态数据, 从 DEOS 中心也可以获取对应影像 27 个时刻的精密轨道坐标数据, 而一幅影像在方位向约有 26500 行数据, 即对应于 26500 个成像时刻, 如何在这些有限数量的轨道数据基础上, 推算影像其余任意时刻的卫星轨道状态数据。据文献 [7] 的研究, 考虑到一幅影像上卫星运行所经历的线路只是整个卫星轨道椭圆上的一很小弧段(如 ERS 1/2 卫星一般为 15 秒左右), 可以仅选择四个参数描述这一弧段, 即: 地心与卫星之间的距离  $R$ , 升交点赤经  $\omega$ , 轨道倾角  $I$  和卫星幅角  $W$ , 这四个参数均为时间的函数, 它们与轨道状态数据的互算关系可参考文献 [8]。为满足干涉分析的需要, 一般情况下, 可使用与 SAR 影像相对应的有限组状态矢量数据, 采用多项式拟合方法, 建立轨道状态参数随时间变化的函数关系<sup>[9, 10]</sup>。这样, SAR 影像任一行像素(对应于已知的卫星时刻)所对应的卫星状态矢量即可很容易地使用多项式计算(内插)出来。

基于已知的粗轨或精轨数据, 对卫星位置三维坐标可分别采用如下三次多项式来拟合,

$$\begin{cases} X_S = a_{00} + a_{01}t + a_{02}t^2 + a_{03}t^3 \\ Y_S = a_{10} + a_{11}t + a_{12}t^2 + a_{13}t^3 \\ Z_S = a_{20} + a_{21}t + a_{22}t^2 + a_{23}t^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $a_{ij}$  为待定系数。使用已知的多组轨道位置数据,  $a_{ij}$  可根据最小二乘求解方法进行解算。对于速度矢量, 也可采取类似的方法来进行建模。此外, 在速度矢量没有提供的情况下, 将式 (1) 对时间求一阶导数, 也可得出如下的速度矢量表达式,

$$\begin{cases} V_X = \dot{X}_S = a_{01} + 2a_{02}t + 3a_{03}t^2 \\ V_Y = \dot{Y}_S = a_{11} + 2a_{12}t + 3a_{13}t^2 \\ V_Z = \dot{Z}_S = a_{21} + 2a_{22}t + 3a_{23}t^2 \end{cases} \quad (2)$$

很显然, 在求出卫星轨道状态矢量随时间  $t$  变化的函数关系后, 就可以内插出雷达成像任意时刻卫星的位置坐标  $(X_S, Y_S, Z_S)$  和速度矢量  $(V_X, V_Y,$

$V_2$ )。在 SAR 影像中, 方位向第  $i$  行像素成像时刻可通过下式计算:

$$t_i = t_0 + \frac{(i-1)}{PRF} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中,  $t_i$  为影像第  $i$  行成像时刻,  $t_0$  为第一行成像时刻,  $PRF$  为雷达脉冲重复频率,  $N$  为影像方位向总行数。其中,  $t_0$  和  $PRF$  均可从影像参数文件中获取。

### 3 理论分析: 轨道数据误差对干涉相位和 高程精度的影响

关于 InSAR 测高的基本原理可参见文献 [ 1 ] 和 [ 3 ], 下面仅对干涉相位信号的构成、几何机理及卫星轨道数据误差的相关影响进行分析。干涉像对的两幅 SAR 影像经过精确配准后, 对同名像素的相位逐一求差, 可得到初始干涉相位图。在没有形变发生的前提下 (如 ERS1/2 卫星 Tandem 模式的干涉像对, 时间间隔仅一天), 初始干涉相位主要包括两部分信号: 参考面相位和地形相位<sup>[1]</sup>。为了计算地表高程, 需要将参考面 (一般选用 WGS84 参考椭球面, 因为卫星定轨即采用此框架) 相位从初始干涉相位中扣除, 以得到反映地形起伏的干涉相位分量。

方式投影到参考椭球面上 (设投影点为  $P'$ ), 则有  $S_1P' = S_1P$ 。  $r_1^0$  和  $r_2^0$  分别为两雷达中心到投影点  $P'$  的斜距。  $B_{//}^0$  为基线在参考斜距  $r_1^0$  方向上的投影分量 (即平行基线)。  $B_{\perp}^0$  为基线在垂直于参考斜距方向的投影分量 (即垂直基线, 也称为有效基线)。  $\theta_0$  为参考侧视角。根据相应构像方程和前已述及的轨道状态矢量模型, 可确定投影点  $P'(X, Y, Z)$ 、卫星雷达  $S_1$  和  $S_2$  的空间位置, 即  $r_1^0$  和  $r_2^0$  可计算出来, 则投影点  $P$  到两卫星雷达的斜距差可如下计算:

$$\Delta r^0 = r_1^0 - r_2^0 \approx B_{//}^0 \quad (4)$$

则因参考椭球面引起的相位差  $\varphi$  (即参考面相位) 可按下式计算:

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta r^0 \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  为雷达波长。

值得说明的是, 初始干涉相位为  $0-2\pi$  之间的相位主值 (即存在整数模糊度), 初始干涉图呈现出近似平行的条纹, 这表明参考面相位占据了主导地位 (相对于地形起伏引起的地形相位来说)。

当计算出主、从影像所有对应像素的参考面相位后, 从初始干涉相位中减去参考面相位, 就可得到仅反映地形起伏的相位分量  $\phi$ , 此处理过程可按下式表达:

$$\phi = M \cdot S^* \cdot R^* \quad (\text{其中}, R = \cos\varphi + \sin\varphi) \quad (6)$$

式中,  $M$  为主影像复数值,  $S$  为从影像复数值,  $*$  代表复数共轭,  $\cdot$  表示两复数相乘,  $R$  表示对应于参考面相位  $\varphi$  的复数 (取振幅恒为 1 的参考面复数影像)。

因  $r_1^0$  是卫星  $S_1$  位置坐标的函数, 对于卫星位置坐标分量  $X_S$ , 斜距误差与坐标分量误差  $\Delta X_S$  存在如下关系:

$$\Delta(r_1^0) = \frac{(X_S - X)}{r_1^0} \Delta X_S = \sin\theta_0 \Delta X_S \quad (7)$$

式中,  $X$  是投影点  $P$  的坐标分量。则因卫星位置坐标误差引起的参考面相位误差  $\Delta\varphi$  为:

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \sin\theta_0 \Delta X_S \quad (8)$$

以 ERS-1/2 卫星为例,  $\theta_0 = 21.5^\circ$ ,  $\lambda = 5.6\text{m}$ , 在  $\Delta X_S = 1.0\text{m}$  时, 产生的相位偏差  $\Delta\varphi$  为  $-0.82$  弧度。显然, 由轨道数据不确定性引起的参考相位误差将会等量传播给干涉相位  $\phi$ , 即: 若参考相位误差为  $\Delta\varphi$ , 则干涉相位误差  $\Delta\phi$  为  $\Delta\varphi$ 。

对干涉相位进行相位解缠, 求解出各像素的绝对干涉相位值, 再根据雷达构像几何关系, 基于解缠后的相位值计算各像素的地面高程。由轨道数据误

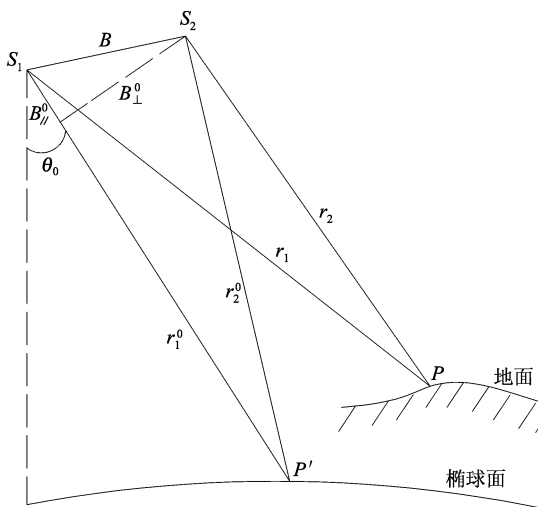


图 1 地面点与参考椭球面投影点关系

Fig. 1 Relationship between points on ground and reference ellipsoid surface

图 1 显示了 InSAR 系统中卫星瞬时位置、地面目标点和参考椭球面的相对关系。这里,  $S_1$  和  $S_2$  为卫星雷达位置。  $r_1$  和  $r_2$  分别为两雷达中心到同一地面点  $P$  的斜距。  $B$  为空间基线 (两雷达中心的间距)。为了计算参考面相位, 将地面点  $P$  按等斜距

差引起的相位误差  $\phi$  与高程误差  $h$  的关系为:

$$h = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{r_1 \sin\theta}{B_{\perp}} \phi \quad (9)$$

设轨道位置数据误差引起的干涉相位误差  $\phi$  为  $-0.82$  弧度,  $B_{\perp}$  为  $200\text{m}$ ,  $r_1$  为  $852\text{km}$ , 则高程误差  $h$  为  $5.7\text{m}$ 。

综合上述方程式 (8) 和 (9), 可得到图 2 所示的卫星位置误差对高程精度影响的关系图。

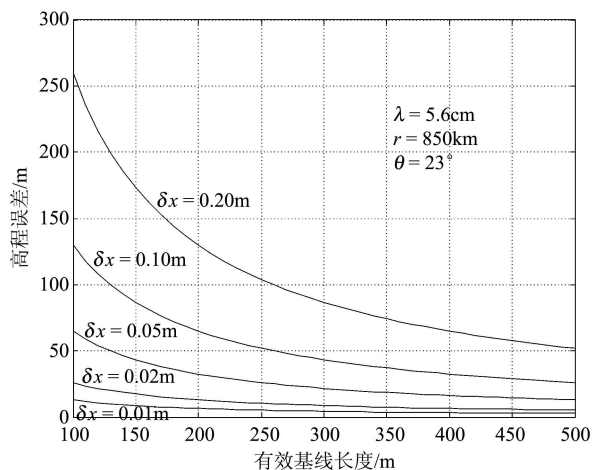


图 2 高程精度与卫星位置误差关系

Fig 2 Relationship between elevation accuracy and satellite positioning error

## 4 实验结果与分析

为进一步分析轨道状态数据对参考面相位、干涉相位和高程精度的影响, 实验选用欧洲空间局 ERS-1/2 卫星飞越上海地区所获取的两幅 C 波段复数 SAR 影像作为研究对象。影像成像时间为 1996 年 3 月 25 日 (ERS-1) 和 1996 年 3 月 26 日 (ERS-2), 时间间隔为 1 天, 可以忽略地表形变。SAR 影像的斜距向和方位向分辨率分别为  $7.9\text{m}$  和  $4.0\text{m}$ , 单一影像地面覆盖范围约为  $100\text{km} \times 100\text{km}$ , 像素信息以复数值来表达。影像重叠区域的中心经度约为  $121^{\circ}28' \text{E}$ , 纬度约为  $31^{\circ}10' \text{N}$ 。选用 ERS-2 影像作为干涉对的主影像, 中心像元的有效基线长度为  $111.8\text{m}$ 。下面对粗、精轨道数据精度及其对干涉相位和高程精度的影响进行对比与分析。

### 4.1 粗、精轨道状态数据精度的比较

不失一般性, 下面仅对 ERS-2 主影像的轨道数据进行分析。主影像卫星位置文件中附有 5 组 ESA 粗轨状态数据, 这 5 组数据分别是卫星 5 个时刻的

位置坐标和速度矢量, 数据的起始时刻为  $9136.786$  秒 (以这一天的零时为时间参考基准), 数据时间间隔为  $4.167$  秒。同时, 从 DEOS 中心获取了该幅影像时间内 27 个时刻的精密轨道位置数据, 起始历元为  $9131.000$  秒, 时间间隔为  $1.0$  秒。粗、精轨道数据的坐标框架均为 WGS-84 坐标系, 主影像方位向第一行成像时刻为  $9137.268$  秒。

基于式 (1)、(2) 和 (3) 中的模型, 编写了相应的 Matlab 程序来计算卫星任意时刻的轨道位置, 表 1 列出了粗、精轨道对应位置的计算结果及差异对比情况。从表 1 结果可知, 粗、精轨道数据坐标差值平均值为:  $|\Delta_x| = 0.126\text{m}$ ,  $|\Delta_y| = 0.776\text{m}$ ,  $|\Delta_z| = 0.969\text{m}$ , 两种轨道数据三维坐标综合平均差值为  $1.248\text{m}$ 。由于 DEOS 精密轨道综合利用了激光逆向反射器 (LRR) 和精密测距测速系统 (PRARE) 等技术, 其轨道精度优于  $5\text{cm}$ <sup>[5,6]</sup>, 以精密轨道数据为评价基准, 通过比较可以发现, ERS-1/2 影像附带的 ESA 粗轨数据综合精度在  $1\text{m}$  左右。

表 1 粗轨与精轨同一历元卫星位置对比

Table 1 Comparison of satellite position at the same epoch between coarse and precise orbits

历元 /s	ESA 粗轨位置 /m	DEOS 精轨位置 /m	差值 /m
9136.786	X -3491464.100	-3491463.869	0.231
	Y 5054596.880	5054596.839	-0.041
	Z 3677719.980	3677720.323	0.343
9140.953	X -3494419.000	-3494418.874	0.126
	Y 5071646.900	5071647.264	0.364
	Z 3651427.560	3651427.314	-0.246
9145.120	X -3497298.030	-3497298.004	0.026
	Y 5088603.570	5088604.336	0.766
	Z 3625066.130	3625065.301	-0.829
9149.287	X -3500101.190	-3500101.263	-0.073
	Y 5105466.530	5105467.689	1.159
	Z 3598636.200	3598634.784	-1.416
9153.454	X -3502828.480	-3502828.655	-0.175
	Y 5122235.410	5122236.961	1.551
	Z 3572138.270	3572136.260	-2.010

### 4.2 粗、精轨参考面相位和干涉相位的精度比较

对上海 ERS 干涉像对, 分别利用 ESA 5 组粗轨

数据和 DEOS 27组精轨数据, 根据雷达构像三个方程, 计算主影像上所有像素在参考椭圆面上的投影点, 从而计算出各像素的参考面相位, 得到对应的两幅参考面相位图。从这两幅图来看, 均呈现出极强规律的相似条纹, 对二者求差, 就可以找出它们的差异。图 3 为使用粗 精轨道数据计算所得到的参考面相位差异图, 图 4 显示了干涉处理过程中主从影像的相关系数图<sup>[1]</sup>。

从图 3 来看, 参考面相位差异图的条纹频率在空间尺度上呈现渐变的趋势, 整个区域范围表现出两个周期条纹的差异, 这主要是由于轨道数据精度的不一致所造成的。从图 4 的相关系数图来看, 影像的整体相关系数均较高, 只有周边的海域和中间的黄浦江、淀山湖呈现黑色, 这些水体由于对雷达波镜面反射以及反射面的不稳定性, 即使时间间隔仅一天, 也难以实现反射信号的强相关, 其余地面目标相关系数在 0.6—0.95 之间, 相关性较好, 有利于干涉相位的正确解缠和三维重建。

从初始干涉相位中去除参考相位, 得到仅反映地形起伏的相位分量。图 5 和图 6 分别为根据粗 / 精轨道数据计算得到的反映地形起伏的干涉相位图。尽管初始干涉相位相同, 但由于采用不同精度的轨道数据计算并得到了不同精度的参考面相位, 从而导致了最终干涉相位的差异。图 5 中整幅图上有近 3 个干涉条纹, 每个条纹对应于模糊高 83.7m, 如果利用该干涉图计算地表高程, 从西至东将得到约 250m 的高差。图 6 中仅有一个条纹, 大部分区域具有相同颜色(干涉相位空间变化很小), 表明地势较为平坦, 如果利用该干涉图计算数字高程模型, 从西至东将得到 80m 左右的高差。参考上海 1:5 万数字高程模型, 整个地区地势平坦, 高差很小, 大部分区域地面高程为 1—2m, 仅在西边的青浦区、松江区和淀山湖附近有局部 90m 高程的地形。由此可以发现, 利用 DEOS 精轨数据计算所得到的 DEM 与参考 DEM 吻合程度相当高, 而利用 ESA 粗轨数据直接计算高程所引起的误差是相当显著的。

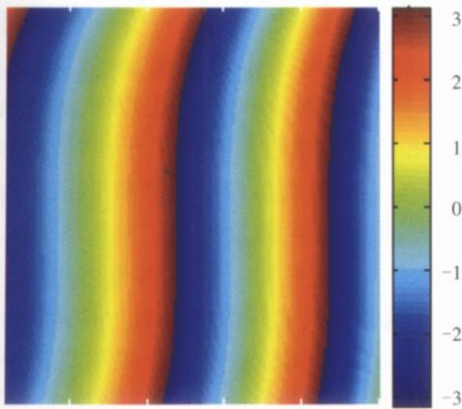


图 3 参考面相位差异图  
Fig.3 Difference map of reference phase

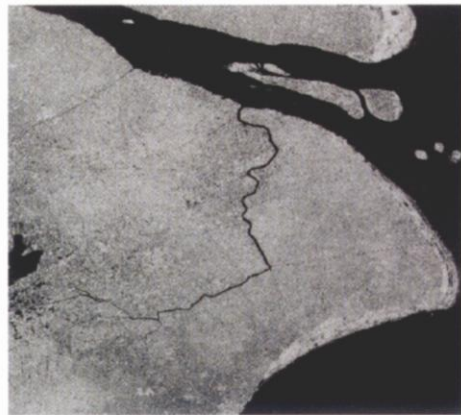


图 4 相关系数图  
Fig.4 Coherence map

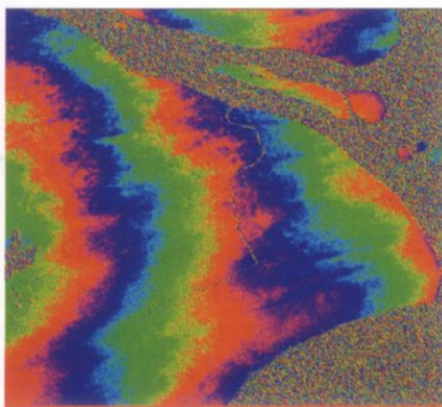


图 5 粗轨数据干涉相位  
Fig.5 Interferogram derived with coarse orbit

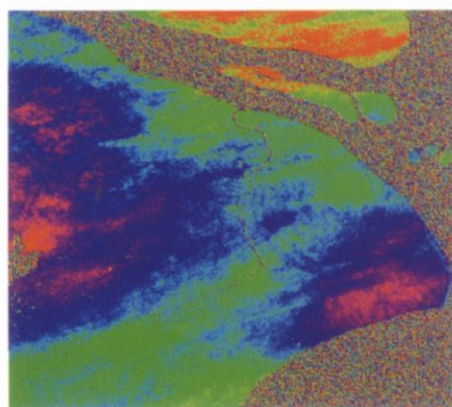


图 6 精轨数据干涉相位  
Fig.6 Interferogram derived with precise orbit

### 4.3 粗 精轨道 DEM 的精度比较

分别使用粗 精轨道数据进行干涉处理,对干涉相位进行相位解缠并恢复绝对相位值后,便可逐像素计算对应地面点高程<sup>[3]</sup>,并取样成地面规则格网,格网大小为  $25\text{m} \times 25\text{m}$ ,建立起两种轨道数据下的数字高程模型。以已有的上海地区 1:5 万高精度数字高程模型作为参考基准,将两种轨道数据建立的 DEM 与参考 DEM 进行比较,分别得到两个 DEM 差异(近似认为是高程误差)结果,图 7 和图 8 显示了这两种情况下的高程误差分布结果,图中的横坐标、纵坐标和竖坐标分别表示 WGS 84 大地经度、纬度和高程误差。

根据图 7 和图 8 所示的结果,对高程误差进行统计计算,结果如表 2 所示。粗轨 DEM 高程误差平均值为  $92.5\text{m}$ ,标准偏差为  $\pm 45.2\text{m}$ ,这说明粗轨高程存在一个系统偏差,从误差分布图来看(见图 7),高程误差由西向东呈线性变化(减小)趋势,因此可以断定,粗轨 DEM 存在一个明显的线性系统偏差。

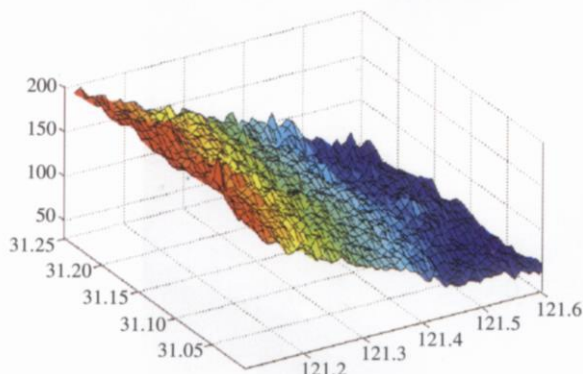


图 7 粗轨 DEM 误差

Fig.7 Errors in DEM generated with coarse orbit

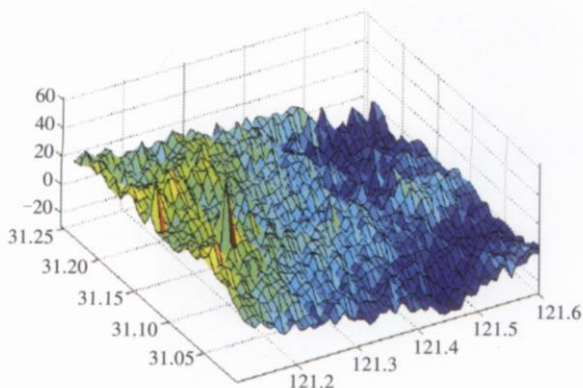


图 8 精轨 DEM 误差

Fig.8 Errors in DEM generated with precise orbit

表 2 粗 精轨道 DEM 误差统计

Table 2 Statistics of errors in DEM generated with coarse/precise orbit

	误差均值 $\bar{m}$	标准偏差 $\sigma$
粗轨 DEM 精度	92.5	$\pm 45.2$
精轨 DEM 精度	5.1	$\pm 12.2$

精轨 DEM 高程误差均值为  $5.1\text{m}$ ,标准偏差为  $\pm 12.2\text{m}$ ,从误差分布图来看(见图 8),高程误差无明显的变化规律,误差分布具有较强的随机性,由此可以断定,利用精轨数据干涉处理建立的 DEM 具有较高的准确性,相对于粗轨 DEM 来说,精轨 DEM 精度提高了将近 4 倍。

## 5 结 论

本文在介绍卫星轨道状态矢量内插方法的基础上,从理论和实际两方面分析了轨道数据误差对参考椭球面相位、地形干涉相位和 DEM 精度的影响。以上海局部地区作为实验场,基于 ERS-1/2 卫星 SAR 影像数据,分别使用 ESA 粗略轨道数据和 DEOS 精密轨道数据进行了干涉处理,对粗 精轨道数据精度、粗 精轨道参考面相位和干涉相位的精度以及粗 精轨道 DEM 的精度进行了对比与分析。卫星轨道数据的不确定性对 InSAR 参考面相位、干涉相位和 DEM 的精度具有较大的影响。具体结论如下:

(1)因 DEOS 定轨综合采用了多种观测技术,轨道数据精度较高,因此,DEOS 精轨数据能够满足高精度干涉 DEM 的建立。而 ESA 粗轨数据精度仅为  $1\text{m}$  左右,如果直接用于 DEM 生成,将导致严重的误差传播,从而产生显著的 DEM 误差。

(2)使用 ESA 粗轨数据进行干涉处理,所得到的参考相位和干涉相位存在明显的系统偏差。实验中利用粗轨数据计算得到的干涉相位表现出 3 个周期的干涉条纹(对应于  $250\text{m}$  的高程变化),而用精轨数据计算所得到的干涉相位仅有 1 个周期干涉条纹(对应于  $80\text{m}$  的高程变化),精轨干涉相位精度明显高于粗轨干涉相位精度。

(3)使用精轨数据干涉处理得到的 DEM,与实际地形起伏(1:5 万参考 DEM)吻合较好。相对于粗轨 DEM 来说,精轨 DEM 精度提高了将近 4 倍。精轨 DEM 高程误差均值( $5.1\text{m}$ )和标准偏差( $\pm 12.2\text{m}$ )相对较小,误差呈现随机性;而粗轨

DEM 误差均值 ( 92. 5m)和标准偏差 (  $\pm 45. 2m$ )难以接受, 且误差自西向东呈现显著线性变化趋势, 表明了使用粗轨数据建立的 DEM 具有明显的系统偏差, 在此情况下, 建议使用足够的地面控制点校正粗轨 DEM。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Liu G X. Mapping of Earth Deformations with Satellite Radar Interferometry: A Study of Its Accuracy and Reliability Performances[ D]. HongKong: Publication of The Hong Kong Polytechnic University, 2003
- [ 2 ] Liu G X, Ding X L, Li Z L, *et al*. Pre and co seismic Ground Deformations of the 1999 ChiChi Taiwan Earthquake Measured with SAR Interferometry [ J]. *Computers and Geoscience* 2004 **30**(4): 333—343.
- [ 3 ] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations [ J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986 **91**(B5): 4993—4999
- [ 4 ] Ding X L, Liu G X, Li Z W, *et al*. Ground Subsidence Monitoring in HongKong with satellite SAR interferometry[ J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 2004 **70**(10): 1131—1137
- [ 5 ] Zhang F R, Huang G, Liao X H, *et al*. Precision ERS-2 Orbit Determination Combining Multiple Tracking Techniques [ J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**(20): 1756—1760.
- [ 6 ] Scharroo R, Visser P. Precise Orbit Determination and Gravity Field Improvement for the ERS Satellites [ J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998 **103**(C4): 8113—8127.
- [ 7 ] Zhang Y H, Lin Z J, Zhang J X, *et al*. Geometric Rectification of SAR Images [ J]. *ACTA Geodaetica et Cartographica Sinica* 2002 **31**(2): 134—138. [张永红, 林宗坚, 张继贤等. SAR 影像几何校正 [ J]. *测绘学报*, 2002 **31**(2): 134—138 ]
- [ 8 ] Tamouss J, Pkemen B. Parametric Modeling of Spaceborne SAR Image Geometry with Application to SEASAT/SPOT Image Registration [ J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 1994 **60**(6): 755—766
- [ 9 ] Kampes B, Hanssen R F, Perski Z. Radar Interferometry with Public Domain Tools [ A]. Proceedings of Fringe 2003 Workshop [ C]. Frascati, Italy, 1—5 December 2003.
- [ 10 ] Kampes B, USA I S, Doris. The Delft Object-oriented Radar Interferometric Software [ A]. Proceedings ITC 2nd ORS Symposium [ C]. Enschede, Netherlands, 16—20 August 1999