

## 双天线干涉 SAR 系统无控制点场景的高精度参考相位快速估计算法\*

陈立福<sup>1,2</sup>, 庞科臣<sup>2</sup>, 李银伟<sup>3</sup>, 粟毅<sup>1</sup>, 袁志辉<sup>2</sup>, 王静<sup>4</sup>

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410004;

3. 上海无线电设备研究所, 上海 200090;

4. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**为解决无控制点场景参考相位的快速估计问题,对影响参考相位的因素进行理论分析,给出参考相位与影响因素的解析关系式。结合系统参数进行仿真分析,分析参考相位对高程误差的影响。根据分析结果,结合外部粗精度高程数据、滤波后的干涉相位及相干系数,提出高精度参考相位快速估计算法,并给出算法详细实现流程。对实际机载双天线干涉合成孔径雷达系统获取的数据进行处理,结果表明:算法在文中的系统参数下可以达到优于2 m的相对高程精度,处理4096×6560像素的数据块时,参考相位估计速度至少增大20倍。

**关键词:**干涉合成孔径雷达;相位解缠;参考相位;数字高程模型;快速估计

**中图分类号:**TN959.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)01-159-07

## Fast estimating algorithm for high precision reference phase based on airborne dual-antenna interferometric SAR system

CHEN Lifu<sup>1,2</sup>, PANG Kechen<sup>2</sup>, LI Yinwei<sup>3</sup>, SU Yi<sup>1</sup>, YUAN Zhihui<sup>2</sup>, WANG Jing<sup>4</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;

3. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China;

4. Communication and Information Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In dual-antenna interferometric synthetic aperture radar system, the reference phase was usually estimated by joint calibration with transferring corresponding points for the scene without ground control points, which is too time-consuming. To solve the problem, the factors influencing the reference phase were analyzed. The analytic formula was given, and simulation was done according to the system parameters. The height error caused by reference phase was analyzed. According to the analysis results, the high precision real-time reference phase estimating algorithm was presented, combined with the extern coarse precision elevation, the filtered interferometric phase and coherence. The detailed flow of the algorithm was given. The processing results of the real data from airborne dual-antenna interferometric synthetic aperture radar system validate that a 2 m relative elevation precision can be achieved with the system in the paper by the algorithm presented, and the estimated speed can reach more than 20 times faster when processing the data of 4096×6560pixel.

**Key words:** interferometric synthetic aperture radar; phase unwrapping; reference phase; digital elevation model; fast estimation

干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术可以获取场景中一个点的三维坐标:距离向坐标、方位向坐标和高程坐标<sup>[1]</sup>。InSAR技术<sup>[2]</sup>可以获得高精度、高可靠性的地表高程以及地表变化信息,因而在地形测量、地球动力学应用及动目标检测等方面得到了广泛应用。随着InSAR技术研究的深入、硬件水平的进步和需求的提高,实时干涉处理变得不再遥不可及。

在InSAR干涉处理中,由两部天线数据产生的图像共轭复乘获取的干涉相位是模 $2\pi$ 后的相位,采用相位解缠的方法可以获取无缠绕干涉相位<sup>[3]</sup>。但该解缠相位与绝对干涉相位仍相差一个 $2\pi$ 的整数倍(此处忽略了系统可能引起的误差因子),使该相位值并不是与距离延迟成比例的绝对干涉相位。如果相位解缠正确的话,在整个干涉图中这个整数就是一个固定的常数。有很多方法可以获取绝对干涉相位,目前采用最多的

\* 收稿日期:2015-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41201468, 61302133, 61302165);上海市自然科学基金资助项目(15ZR1439500);湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(16B004)

作者简介:陈立福(1979—),男,河北沧州人,讲师,博士,硕士生导师,E-mail: lifu\_chen@139.com

方法是利用地面控制点的测量高度和干涉几何关系,通过定标方法<sup>[4-5]</sup>估计基线长度、基线倾角、时间延迟以及参考相位,从而可以确定整个图像的绝对干涉相位。有些研究人员对现有算法做了些改进<sup>[6-8]</sup>,这些方法从一定程度上提高了定标精度,但速度受到较大影响。

2002 年, Dall 等利用自然地物,在无地面控制点的情况下实现了干涉参数定标<sup>[8]</sup>。在没有地面控制点的情况下, Madsen 首次给出了两种估计绝对干涉相位的方法:谱分段估计算法<sup>[9]</sup>和残余延迟估计算法<sup>[10]</sup>。David 对残余延迟估计算法的绝对相位估计精度给出了分析<sup>[11]</sup>。

上述几种绝对干涉相位获取算法都可以获取绝对相位,但精度不高或非常耗时。文献[12]提出了基于相位偏置函数(Phase Offset Function, POF)的估计方法,获取数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)精度很高,但要进行两次相反方向飞行及两幅图像的匹配,效率较低,不能用于实时 DEM 生成系统。

### 1 DEM 反演原理

机载双天线干涉 SAR 系统的干涉原理如图 1 所示,由该原理图可得 DEM 反演式(1)<sup>[13]</sup>。

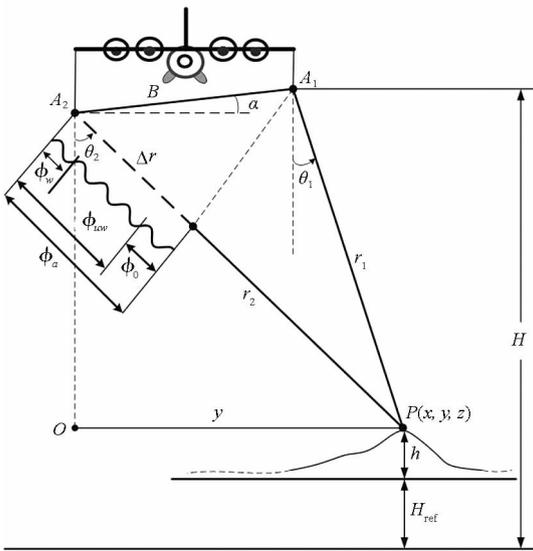


图 1 DEM 反演原理

Fig. 1 DEM reconstruction principle

$$\begin{cases} \theta_2 = \alpha - \arcsin[\lambda \phi_a / (2\pi BQ)] \\ h = H - H_{ref} - r_2 \cos \theta_2 \\ y = r_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,只要载机飞行高度  $H$ 、基线长度  $B$  与倾角  $\alpha$ 、斜距  $r_2$  确定,就可通过绝对相位  $\phi_a$  求得点  $P$  的高程。其中:  $H_{ref}$  为该点的参考高

度;  $Q$  为系数,标准模式  $Q=1$ ,乒乓模式  $Q=2$ 。

由图 1 可知,由于干涉处理时采用的是三角函数计算方法,两天线产生的干涉相位是缠绕相位  $\phi_w$ ,因此要对该相位解缠获取非缠绕相位  $\phi_{uw}$ 。但由于各种误差因素的影响,该相位在整个场景中仍与式(1)的绝对相位  $\phi_a$  相差一个常数值  $\phi_0$ ,  $\phi_0$  称为参考相位。

$$\phi_a = \phi_{uw} + \phi_0 \quad (2)$$

## 2 参考相位误差分析

### 2.1 参考相位误差影响因素分析

造成参考相位误差的原因主要有两个:一是由于两路接收机通道的延迟线不同而产生的两通道间绝对延迟时间误差;二是相位解缠中选择作为起始点的干涉相位与真实绝对相位值相差一个常数值。

#### 2.1.1 两通道不一致延迟误差分析及校正

双天线 InSAR 系统中,两通道不一致会使两通道存在一个固定延迟误差  $\Delta r_{12}$ ,从而造成干涉相位中存在一个常数相位误差<sup>[6]</sup>。在取消了定标的实时系统中,这种不一致可通过两种方法来标定并消除。

一是在实验室利用两天线中一部天线对距其  $R_1$  处的小角反射器发射信号,进而利用两部天线接收信号,设该角反射器距另一部天线距离为  $R_2$ ,若两天线接收回波的信号中心分别为  $t_1$  和  $t_2$ ,则回波信号为:

$$\begin{cases} \text{天线 } A_1: \text{Echo}_{A1} = A(t, R_1)S(t - t_1) \\ \text{天线 } A_2: \text{Echo}_{A2} = A(t, R_2)S(t - t_2) \end{cases} \quad (3)$$

不一致误差  $\Delta r_{12} = c(t_1 - t_2)/(R_1 - R_2)$ ,  $c$  为光速。

二是在飞行测绘前利用设置好的定标场(用于飞前参数标定)布置的  $N$  个定标点确定。通常对  $N$  个定标点求取  $\Delta r$  并剔除异常值后取均值作为系统斜距误差的修正量。由此可以获取两个通道固定的不一致延迟误差为:

$$\Delta r_{12} = Q \cdot (\overline{\Delta r_1} - \overline{\Delta r_2})/2 \quad (4)$$

对于该误差的消除方法,在利用非线性扩展的 Chirp Scaling 自配准成像处理<sup>[13]</sup>的干涉系统中,可在第二部天线回波数据完成距离单元徙动校正和距离向聚焦后,在二维频域乘以  $\exp(j4\pi f_r \Delta r_{12}/c)$ 。对于机载双天线 InSAR 系统而言,温度不会发生剧烈变化,两部天线接收通道不调整的情况下,该不一致延迟误差基本保持不变。因此,测绘前做一次测量即可确定该误差并

在成像过程中予以消除。

### 2.1.2 参考高度误差对参考相位的影响

对参考相位影响较大的是相位解缠起始点的本身参考高度与其真实参考高度有较大偏差。

图2给出了当参考高度与真实值  $H_{ref}$  存在  $\delta H_{ref}$  的误差时,引起的双天线路径差的变化情况。

由图2的几何关系可得  $T_1$  处的视角为:

$$\theta_{T_1} = \arctan \left\{ \left[ 1 - \delta H_{ref} / (H - H_{ref} - \delta H_{ref}) \right] \tan \theta_{T_0} \right\} \quad (5)$$

由图2可知:

$$Q \cdot 2\pi \cdot \Delta r / \lambda = \phi_{uw} + \phi_0 \quad (6)$$

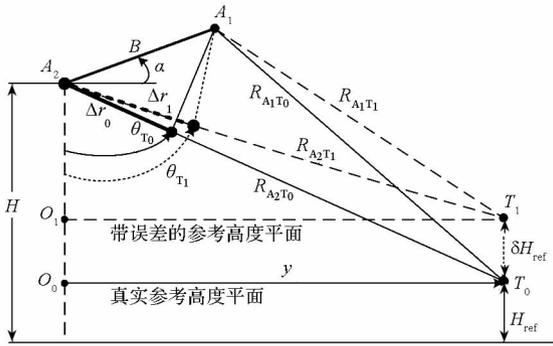


图2 参考高度误差几何关系图

Fig.2 Geometry relation of reference height error

根据图2,对于点  $T_0$ ,真实参考高度为  $H_{ref}$ ,而含有误差的参考高度为  $\delta H_{ref} + H_{ref}$ ,由此可得:

$$\begin{cases} Q \cdot 2\pi \cdot \Delta r_0 / \lambda = \phi_{uw} + \phi_0 \\ Q \cdot 2\pi \cdot \Delta r_1 / \lambda = \phi_{uw} + \phi_0 + \delta \phi_0 \end{cases} \quad (7)$$

则可得参考相位误差为:

$$\delta \phi_0 = Q \cdot 2\pi \cdot (\Delta r_1 - \Delta r_0) / \lambda \quad (8)$$

对于机载双天线 InSAR 系统,一般都满足  $\Delta r \approx -B \sin(\theta - \alpha)^{[13]}$ ,因此可得:

$$\delta \phi_0 = 2\pi QB [\sin(\theta_{T_0} - \alpha) - \sin(\theta_{T_1} - \alpha)] / \lambda \quad (9)$$

其中:  $\theta_{T_1} = \arctan[y / (H - H_{ref} - \delta H_{ref})]$ ,  $y$  是  $A_2$  和  $T_0$  的水平距离;  $\theta_{T_0} = \arctan[y / (H - H_{ref})]$ 。

利用表1参数对误差进行定性和定量分析,其中视角为  $15^\circ \sim 75^\circ$ ,  $Q=2$ 。仿真结果如图3~5所示。

表1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

变量	$H$	$B$	$\alpha$	波长 $\lambda$	$\theta_{BW}$
数值	6000 m	2.3 m	$20^\circ$	0.031 25 m	$25^\circ$

通过分析可得:

1)  $\delta H_{ref} / H_{ref}$  越大,即参考高度误差越大,由

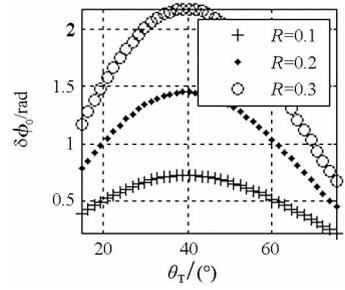


图3 不同  $\delta H_{ref} / H_{ref}$  对参考相位在距离向的影响

Fig.3 Influence of different  $\delta H_{ref} / H_{ref}$  to reference phase in the range

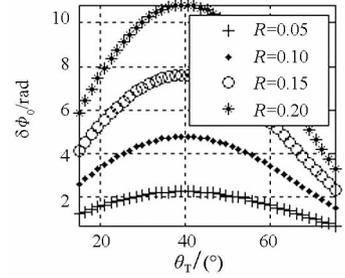


图4 不同  $H_{ref} / H$  对参考相位在距离向的影响

Fig.4 Influence of different  $H_{ref} / H$  to reference phase in the range

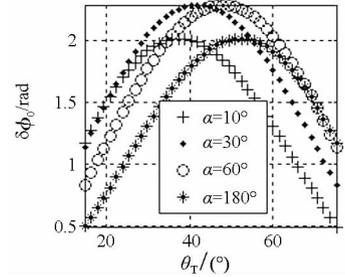


图5 不同基线倾角对参考相位在距离向的影响

Fig.5 Influence of different baseline obliquity to reference phase in the range

$\delta H_{ref}$  引起的  $\delta \phi_0$  越大;

2)  $H_{ref} / H$  越大,即参考高度越大,由  $\delta H_{ref}$  引起的  $\delta \phi_0$  越大;

3) 基线倾角  $\alpha$  大小影响着由  $\delta H_{ref}$  引起的大小及沿距离向的对称中心位置。

### 2.2 参考相位误差对高程精度的影响分析

由式(1)、式(2)可得高程与参考相位的关系为:

$$h = H - H_{ref} - r_2 \cos \left\{ \alpha - \arcsin \left[ \lambda (\phi_{uw} + \phi_0) / (2\pi BQ) \right] \right\} \quad (10)$$

设  $C_0 = \lambda / (2\pi BQ)$ , 并将式(10)两边分别对  $\phi_0$  求微分,经推导可得:

$$\delta h = C_0 r_2 \sin \left\{ \alpha - \arcsin \left[ g(\phi_0) \right] \right\} \cdot \delta \phi_0 / \sqrt{1 - g^2(\phi_0)} \quad (11)$$

其中,  $g(\phi_0) = C_0(\phi_{umw} + \phi_0)$  为  $\phi_0$  的函数。

经化简可得:

$$\delta h = -C_0 \cdot r_2 \cdot \delta\phi_0 / (\cos\alpha + \sin\alpha \cdot \cot\theta_2) \quad (12)$$

由式(12)可知,在系统参数(波长、基线长度与倾角、工作模式)确定的条件下,固定斜距处由参考相位误差引起的高程误差由参考相位误差大小决定,而不同斜距处的高程误差大小还与该采样点入射角大小及斜距  $r_2$  有关。斜距  $r_2$  本质上也由该采样点视角决定,因而参考相位误差引起的高程误差本质上由该点视角决定,并随距离向增加。

图 6 给出了对视角沿距离向采样的几何关系示意图。由此可得:

$$\Delta\theta_{n-k} = \arccos\{H\cos\theta_k/[H + (n-k) \cdot \Delta r \cdot \cos\theta_k]\} - \theta_k \quad (13)$$

其中:  $k, k+1, n$  为距离向采样点的下标。

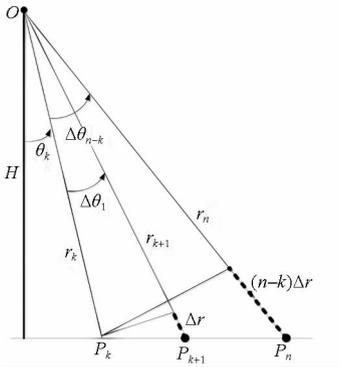


图 6 距离向下视角采样示意图

Fig. 6 Sketch map of view angle sampling in the range

则式(12)经距离向视角离散化后可得:

$$\delta h_n = \frac{-C_0[r_k + (n-k) \cdot \Delta r]}{\sin\alpha + \cos\alpha \cdot \cot(\theta_k + \Delta\theta_{n-k})} \cdot \delta\phi_0 \quad (14)$$

采用表 1 参数对该误差进行仿真。设  $\delta\phi_0 = 0.5 \text{ rad}$ , 可得图 7 和图 8 的结果。经分析可得参考相位误差  $\delta\phi_0$  对高程误差  $\delta h$  有如下影响:

- 1) 高程误差  $\delta h$  随  $\delta\phi_0$  的增大而增大;
- 2) 由  $\delta\phi_0$  引起的高程误差  $\delta h$  随距离向逐渐增大;
- 3) 基线倾角  $\alpha \in [0, \pi/2]$  时, 由  $\delta\phi_0$  引起的高程误差  $\delta h$  随基线倾角增大出现先减小后增大的规律, 在距离向视角  $\theta = \alpha$  处最小, 且为对称中心。

### 3 高精度参考相位快速估计算法

该算法将完成两部分参考相位估计和误差消除: 两通道不一致延迟造成的误差和由外部粗精度 DEM 估计的参考相位, 算法流程如图 9 所示。

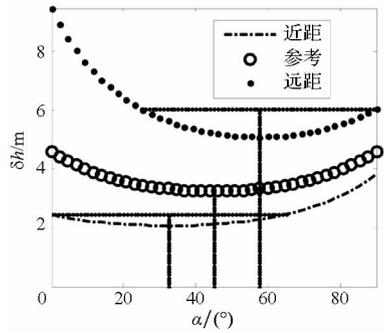


图 7 DEM 误差随基线倾角的变化曲线

Fig. 7 DEM error varies from baseline obliquity

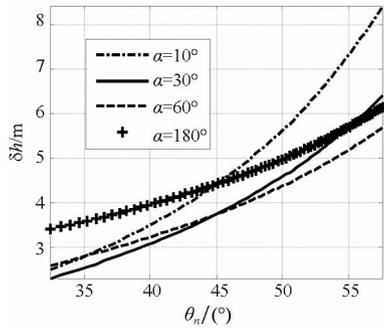


图 8 DEM 误差沿距离向的变化曲线

Fig. 8 DEM error varies in the range

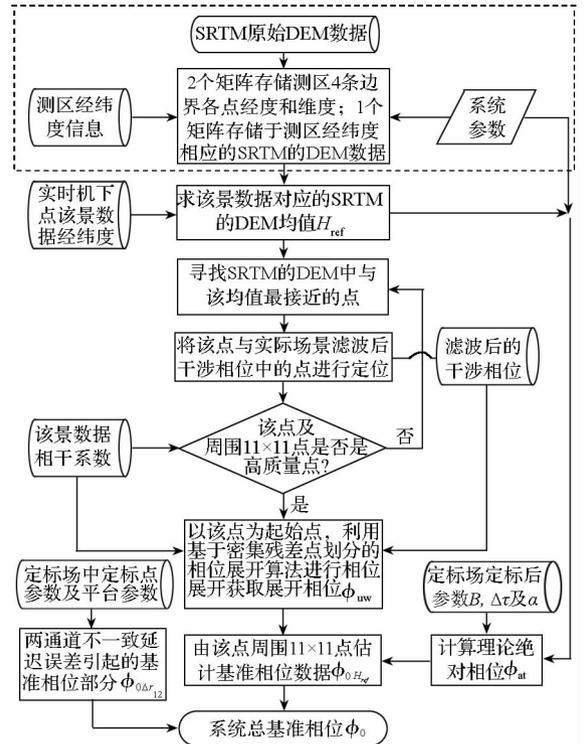


图 9 高精度参考相位快速估计算法

Fig. 9 Fast estimating algorithm of reference phase

估计并消除两通道的不一致延迟造成的参考相位  $\phi_{0\Delta r_{12}}$ 。首先在实验室或测区飞行前的定标场实测两通道不一致延迟误差  $\Delta r_{12}$ , 进而第二部天线完成距离单元徙动校正和距离向聚焦后, 在二维频域乘以  $\exp(j4\pi f_r \Delta r_{12}/c)$ , 从而消除两通道

不一致延迟引起的参考相位部分。

由参考高度估计参考相位  $\phi_{0H_{ref}}$ 。此部分参考相位估计充分利用航天飞机雷达地形测绘使命 (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 的粗精度 DEM 数据 (SRTM 精度在 15 m 至 30 m 之间), 并将相位解缠<sup>[14]</sup>融入其中, 从而实现了高精度参考相位估计。此部分参考相位估计需注意以下几点:

- 1) 以  $H_{ref}$  为参考高度, 由图 1 的干涉几何关系, 计算理论绝对相位  $\phi_{at} = -2\pi Q\Delta r_0/\lambda$ 。
- 2) 由两部分参考相位获取总参考相位以及绝对干涉相位  $\phi_0 = \phi_{0H_{ref}} + \phi_{0\Delta r_{12}}$ ,  $\phi_a = \phi_0 + \phi_{uw}$ 。
- 3) 为节省处理时间, 图 9 中虚线方框部分在进行正式飞行测绘之前预先计算并存储起来。
- 4) 反演公式 (1) 中  $\theta_2 = \alpha - \arcsin[\lambda(\phi_{uw} + \phi_0)/2\pi B]$  应在  $[-\pi/2, \pi/2]$  之间, 否则反演时会出现问题。

## 4 数据验证与分析

### 4.1 算法的数据验证

为验证提出的算法, 选用实际获取的机载 InSAR 数据进行处理, 用 DEM 的均方误差对结果进行评价。对于没有定标点的场景, 采用与传统

定标方法获取 DEM 的均方误差作为衡量标准, 包括绝对高程误差  $\sigma_{h_{jd}}$  和相对高程误差  $\sigma_{h_{xd}}$ 。

$$\sigma_{h_{jd}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [h_p(m, n) - h_{Tr}(m, n)]^2} \quad (15)$$

$$\sigma_{h_{xd}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [h_p(m, n) - h_{Tr}(m, n) - (\mu_p - \mu_{Tr})]^2} \quad (16)$$

其中:  $h_p, \mu_p$  和  $h_{Tr}, \mu_{Tr}$  分别为利用该方法和传统定标方法获取场景的 DEM 与 DEM 均值 (只统计场景中相干系数在 0.5 以上的点)。

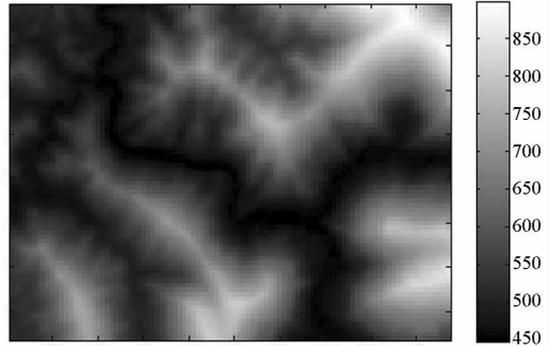
对于存在定标点的场景, 采用统计定标点高程的均方误差  $\sigma_{h_{GCP}}$  的方法分析高程精度。其中,  $h$  为反演的场景 DEM,  $h_{GCP}$  为定标点实测高程,  $N$  为定标点数目。

$$\sigma_{h_{GCP}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [h(n) - h_{GCP}(n)]^2} \quad (17)$$

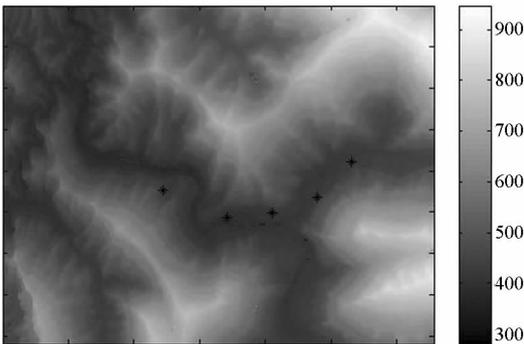
图 10 (a) 所示为 SAR 幅度图像, 由该图可知, 场景为起伏较大的山区。在河流附近的平地区域布置了一些定标点 (图 10(c)、图 10(d) 中用星点标记了 5 个定标点的位置)。图 10 (b) 为该场景对应的 SRTM 系统获取的 DEM 数据。



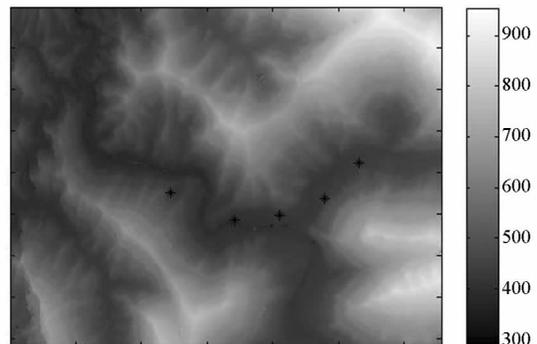
(a) 场景的 SAR 幅度图像  
(a) SAR image for the scene



(b) 场景对应 SRTM 的 DEM  
(b) Corresponding DEM of SRTM



(c) 方法一获取的 DEM  
(c) DEM generated by method one



(d) 方法二获取的 DEM  
(d) DEM generated by method two

图 10 机载 InSAR 数据处理结果

Fig. 10 Processing results of airborne InSAR data

图 10 (c) 为采用传统干涉定标算法(方法一)获取的场景 DEM, 图 10 (d) 为本文提出算法(方法二)反演的 DEM, 两种方法都是采用基于密集残差点划分的相位解缠算法<sup>[14]</sup>, 且两者的起点相同。

根据式 (17) 计算 5 个定标点的均方高程误差, 分别为 1.09 m (传统方法) 和 1.46 m (本文方法)。表 2 给了三种不同方法获取的 5 个定标点 DEM 数值。

表 2 不同方法获取的五个定标点 DEM 数值

Tab. 2 DEM values of five ground control points with different methods

方法	定标点标号				
	1	2	3	4	5
定标场测量/m	454.12	407.62	417.48	420.17	416.82
传统方法/m	452.35	408.35	416.15	418.26	417.32
本文方法/m	451.57	405.23	418.93	422.73	418.70

图 11 给出了当参考高度由 573 m 变化到 586 m 时四种 DEM 误差随参考高度误差变化的情况。由结果可知,  $\sigma_{hGr}$  基本保持 1.15 m 不变;  $\sigma_{hGmy}$  随参考高度变化, 且在  $H_{ref} = 581$  m 时达到最小。在这个参考高度时, 绝对和相对高程误差均近似为 1.25 m。此外, 系统误差和其他干涉处理误差导致一个固有 DEM 误差, 这解释了当没有参考高度误差时系统仍有 1.15 m 左右的高程误差。图 12 给出了参考相位随参考高度变化情况。

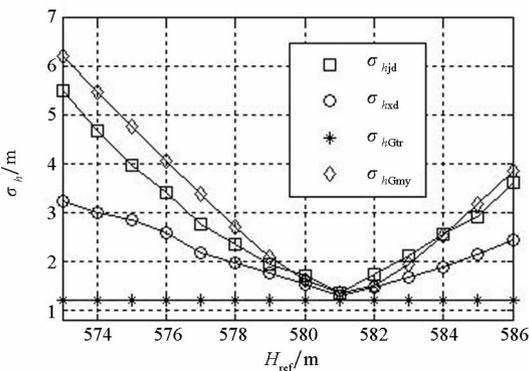


图 11 DEM 误差随参考高度误差的变化

Fig. 11 DEM error varies with reference height

表 3 给出了两种算法对中科院电子所机载双天线 InSAR 系统 2010 年获取 10 组数据处理的情况。这 10 组数据是没有定标点的数据, 但都已经分别利用有定标点的区域进行了同名点提取并进行了 DEM 精度的分析, 数据尺寸大小为  $4096 \times 6560$  像素。处理时间计算从相位解缠至产生 DEM, 利用 VC2008 软件, 处理器配置为: Core™2

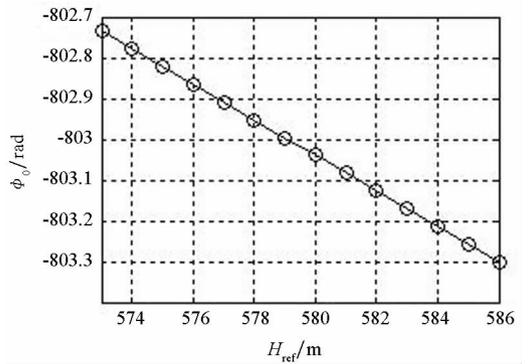


图 12 参考相位随参考高度的变化

Fig. 12 Reference phase varies with reference height

Duo CPU, T5450 @ 1.66 GHz, 1.67 GHz, 6 G 内存。 $t_{tra}$  和  $t_{my}$  为利用传统的定标方法和本文方法进行处理的时间,  $\sigma_{hjd}$  和  $\sigma_{hxd}$  为式 (15) 和式 (16) 中定义的方法获取的绝对和相对高程误差。处理结果表明: 本文方法获取的 DEM 精度比传统方法的略低, 但比目前其他快速参考相位估计方法<sup>[10]</sup> 的精度要高得多。本文处理精度已经能满足大部分干涉需求; 而本文在处理速度上却比传统方法快 20 倍左右, 当处理的数据量增大时, 处理的速度优势将更加明显。

在场景地形没有较多较大突变区域时, 利用本文算法能获得较高精度的 DEM; 当场景地形突变较大时, 要考虑选择场景中的缓变区域进行参考高度估计, 会降低算法的自动化程度。当基线倾角、基线长度、定标场有微小变化时, 要实时进行检测, 并利用干涉运动补偿方法进行补偿。

表 3 10 组 InSAR 数据的处理结果比较

Tab. 3 Processing results of ten sets of InSAR data

名称	$\sigma_{hjd}/m$	$\sigma_{hxd}/m$	$t_{tra}/s$	$t_{my}/s$
第 1 组	3.12	1.83	968	54
第 2 组	3.02	1.73	956	48
第 3 组	2.81	1.50	938	38
第 4 组	2.79	1.46	929	35
第 5 组	2.93	1.59	940	40
第 6 组	2.68	1.40	932	36
第 7 组	2.69	1.40	972	59
第 8 组	2.64	1.39	944	41
第 9 组	2.80	1.46	925	31
第 10 组	3.15	1.80	956	48
10 组均值	2.86	1.56	946	43

#### 4.2 算法的快速性能分析

提出的参考相位估计算法将参考相位估计融合于相位解缠算法中, 其中外部粗精度相关 DEM

数据在飞行测绘前已经根据测区情况进行计算及存储,因而节省了处理时间。该算法流程中只是相位解缠花费时间较多,这部分在传统定标处理中也花费同样时间;而其他部分只是小区域的简单计算,不需要迭代处理,因而运算量非常小。

因而这也就解释了表 3 中两种算法的处理时间相差较大的原因,43 s 的处理时间主要是相位解缠,而传统定标方法的时间则主要是同名点参数的确定及相位解缠,两种算法采用相同的解缠方法时,约花费 900 s 的时间在寻找并确认同名点信息。

## 5 结论

本文针对实时 InSAR 系统中参考相位不能快速准确估计的问题,提出了高精度参考相位快速估计算法。通过对中科院电子所获取的 InSAR 数据的处理,表明该算法虽然获取的 DEM 精度比传统定标算法略低,但速度优势非常明显,非常适合实时干涉处理系统。

由于定标场数据不易获取及保密等原因,文中只采用了一个包含 5 个定标点的试验定标场景进行验证,一定程度上验证了算法的精度;后续将争取采用拥有更多定标点场景的数据验证本算法,并进一步完善。

本算法在高程起伏不大的区域获取的 DEM 精度较高,但在起伏剧烈的山地区域精度会受到一定影响,因而该算法仍需进一步改进。

## 参考文献 (References)

- [1] Chen L F, Xie W B, Huang Y F. Estimation of initial phase offset in real-time for airborne dual-antenna InSAR system[C]//Proceedings of IET International Radar Conference, 2013.
- [2] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 88(3): 333 - 382.
- [3] 葛仕奇, 陈亮, 丁泽刚, 等. 利用梯度重建的稳健多频 InSAR 相位解缠方法 [J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 367 - 373.  
GE Shiqi, CHEN Liang, DING Zegang, et al. A robust multi-frequency phase unwrapping method based on gradient reconstruction [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(3): 367 - 373. (in Chinese)
- [4] 毛永飞, 向茂生, 韦立登. 一种机载干涉 SAR 区域网平面定位算法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(1): 166 - 171.  
MAO Yongfei, XIANG Maosheng, WEI Lideng. A block positioning method for airborne InSAR system [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(1): 166 - 171. (in Chinese)
- [5] Chen J, Quegan S, Yin X J. Calibration of space-borne linearly polarized low frequency SAR using polarimetric selective radar calibrations [J]. Progress in Electronics Research, 2011, 114: 89 - 111.
- [6] 韩松涛, 向茂生. 一种基于特征点权重的机载 InSAR 系统区域网干涉参数定标方法 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1244 - 1247.  
HAN Songtao, XIANG Maosheng. A bundle adjustment calibration method for airborne InSAR system based on weighting of feature points [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1244 - 1247. (in Chinese)
- [7] 云焯, 曾琪明, 焦健, 等. 基于参考 DEM 的机载 InSAR 定标方法 [J]. 测绘学报, 2014, 43(1): 74 - 82.  
YUN Ye, ZENG Qiming, JIAO Jian, et al. Calibration of airborne interferometric SAR data based on reference DEM [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(1): 74 - 82. (in Chinese)
- [8] Dall J, Christensen E L. Interferometric calibration with natural distributed targets [C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, 1: 170 - 172.
- [9] Madsen S N, Zebker H A, Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 246 - 256.
- [10] Madsen S N. On absolute phases determination techniques in SAR interferometry [C]//Proceedings of SPIE Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery II, 1995, 2487: 393 - 401.
- [11] Imel D A. Accuracy of the residual-delay absolute-phase algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(1): 322 - 324.
- [12] Mura J C, Pinheiro M, Rosa R, et al. A phase-offset estimation method for InSAR DEM generation based on phase-offset functions [J]. Remote Sensing, 2012, 4(3): 745 - 761.
- [13] 陈立福, 韦立登, 向茂生, 等. 机载双天线干涉 SAR 非线性近似自配准成像算法 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2208 - 2214.  
CHEN Lifu, WEI Lideng, XIANG Maosheng, et al. Auto-registration imaging algorithm of non-linear approximation for airborne dual-antenna InSAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(9): 2208 - 2214. (in Chinese)
- [14] 陈立福, 向茂生, 汪丙南. 基于密集残差区域划分的快速相位展开算法 [J]. 宇航学报, 2012, 33(2): 190 - 199.  
CHEN Lifu, XIANG Maosheng, WANG Bingnan. Fast phase unwrapping algorithm based on partitioning the dense residues regions [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(2): 190 - 199. (in Chinese)