

# 斜视条件下机载 InSAR 基线分析及定标法

曾友兵<sup>1,2,3</sup> 洪峻<sup>1,2</sup> 王宇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 微波成像技术国家重点实验室 北京 100190;

3. 中国科学院大学 北京 100190)

**摘要:** 干涉参数定标对机载 InSAR 系统获取高精度数字高程模型具有重要的意义。物理基线长度是干涉定标需标定的重要参数之一。在斜视条件下,有效干涉基线不等于物理基线,并且受到载机姿态角的影响。传统的干涉定标方法直接利用 InSAR 高程反演模型对干涉基线的偏导构建敏感度方程,其标定的基线参数为有效干涉基线,而非实际的物理基线。针对该问题,对斜视条件下的有效干涉基线进行了分析,建立了有效干涉基线与物理基线和载机姿态角之间的关系,并提出了针对实际物理基线的定标方法。最后,利用中国科学院电子学研究所 X 波段机载 InSAR 获取的实际数据进行了外定标处理实验,验证了该方法的有效性。

**关键词:** 机载 InSAR 系统;干涉定标;有效干涉基线;物理基线

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Baseline analysis and calibration method for airborne interferometric SAR in squinted geometry

Zeng Youbing<sup>1,2,3</sup> Hong Jun<sup>1,2</sup> Wang Yu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. National Key

Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China; 3. University

of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Interferometric parameters calibration is of great significance to get high precision digital elevation model for airborne InSAR system. The physical baseline is one of the important parameters for interferometric calibration. In squinted geometry, the interferometric baseline is not equal to the physical baseline, and it's influenced by aircraft attitude. The parameter that the traditional sensitivity equations which are derived by differentiating the elevation equation with respect to the interferometric baseline parameter calibrate is the effective baseline, instead of the real physical baseline. Aiming at this problem, this paper analyses the effective baseline in squinted geometry, and formulates the effective interference baseline with the physical baseline and the aircraft attitude, then proposes a method to calibrate the real physical baseline. Finally, A calibration experiment has been performed with real data acquired by the X-band airborne InSAR of the Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences to verify the method.

**Keywords:** airborne InSAR system; interferometric calibration; effective baseline; physical baseline

## 1 引言

机载干涉合成孔径雷达(interferometric SAR, InSAR)能够快速获取大面积的数字高程模型(digital elevation model, DEM)<sup>[1-3]</sup>,它具有精度高、作业灵活等优点<sup>[4]</sup>。InSAR 系统生成 DEM 的精度受到系统干涉参数精度的限制,这些系统参数主要包括:绝对时间延迟、基线长度、基线倾角和干涉相位等。干涉参数定标即对这些参数的偏差进行定标,以提高 InSAR 生成 DEM 的精度。

目前,针对斜视条件下的机载 InSAR 定标方法中,均将载机飞行过程中的干涉基线视为物理基线并保持不变<sup>[5-8]</sup>,文中将这类方法称为传统方法。实际上,在斜视条件下,有效干涉基线将受到载机姿态角的影响(第2节中将对其进行详细说明),相对于物理基线发生变化<sup>[9]</sup>。传统的定标方法直接利用 InSAR 高程反演模型对干涉基线求偏导构建敏感度方程,其标定的基线参数实际上为有效干涉基线,该基线与定标场区域对应的载机姿态有关,而非实际的物理基线。在不同的方位区间,载机平台的平均姿态不

同,对应的有效干涉基线也不同,因此由传统的定标方法处理得到的参数结果通常只适用于定标场区域,若将其应用到方位向远离定标场对应不同载机姿态的区域,则生成 DEM 的误差明显增大,甚至超出系统高程测量精度要求。为了获取大面积的 DEM 信息,传统的定标方法通常需沿方位向布设大量定标器,或者对条带进行分景处理,利用基于同名点传递的方法对每景图像分别进行标定<sup>[10-11]</sup>,传统的定标方法对野外定标器布设要求较高,同时数据处理工作量较大,不利于 InSAR 系统的实用化应用。

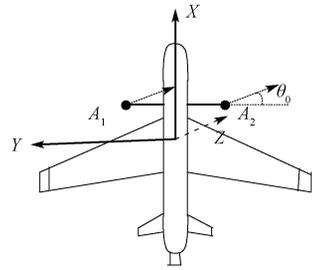
针对斜视条件下传统定标方法存在的上述问题,该文提出了基于物理基线的定标方法。该文首先分析了斜视条件下有效干涉基线随姿态角的变化情况,建立了有效干涉基线与物理基线之间的关系,然后提出了针对实际物理基线的定标方法:将有效干涉基线与物理基线之间的关系代入斜视高程反演模型中,然后对物理基线参数求偏导并构建敏感度方程,求解出物理基线参数偏差,进而对物理基线参数进行校正。在高程反演时,对不同方位向的数据块,根据相应的载机姿态更新其有效干涉基线,然后计算各区域的 DEM。最后,应用一组实际的 InSAR 数据对该方法进行了验证。

## 2 斜视条件下干涉基线分析

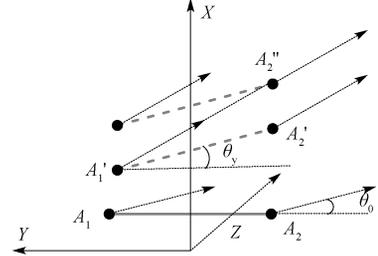
干涉基线是 InSAR 技术的核心和关键,它是获取干涉相位的前提。机载双天线 InSAR 系统通常利用刚性结构将主副天线连接起来,此时,主副天线相位中心的连线即构成物理基线。对定标而言,需准确的标定出物理基线。下面对斜视条件下机载 InSAR 的干涉基线进行分析。

图 1 为斜视条件下的干涉基线示意图。在图 1(a)中,设载机速度方向为 X 轴, Y 轴水平向左并与 X 轴垂直, Z 轴垂直纸面向上, XYZ 构成右手坐标系。A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 分别为主副天线相位中心位置,其连线构成物理基线。InSAR 系统初始斜视角如图中 θ<sub>0</sub> 所示。

载机平台在飞行过程中由于受到气流扰动等因素的影响姿态角会发生变化,在姿态角的影响下,干涉基线构型将发生变化。如图 1(b)所示(简化作图,图中仅示意了偏航



(a) 干涉基线示意图



(b) 姿态角对有效干涉基线的影响示意图

图 1 有效干涉基线示意图

角的影响),当主天线运动到 A<sub>1</sub>' 位置时,副天线位于 A<sub>2</sub>' 位置,由于存在斜视,在同一方位时刻主副天线波束中心照射在不同的位置。当副天线运动至 A<sub>2</sub>'' 位置时,才与主天线波束中心照射在同一位置,因此实际的干涉基线为 A<sub>1</sub>' 与 A<sub>2</sub>'' 的连线,该文中将该基线称为有效干涉基线,由图可知,有效干涉基线相对于物理基线 A<sub>1</sub>A<sub>2</sub> 发生了变化。

设 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>1</sub>'、A<sub>2</sub>'' 坐标分别为 (x<sub>A1</sub>, y<sub>A1</sub>, z<sub>A1</sub>)、(x<sub>A2</sub>, y<sub>A2</sub>, z<sub>A2</sub>)、(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>)、(x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z<sub>2</sub>),由图 1(b)中的几何关系如下。

交轨基线:

$$|\vec{B}_Y| = \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (1)$$

顺轨基线:

$$|B_X| = \left| (y_1 - y_2) \tan \left( \arctan \left( -\frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} \right) + \theta_0 \right) \right| \quad (2)$$

有效干涉基线:

$$|\vec{B}| = \sqrt{\left( (y_1 - y_2) \tan \left( \arctan \left( -\frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} \right) + \theta_0 \right) \right)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (3)$$

根据坐标旋转公式,有:

$$x_1 - x_2 = (\cos \theta_y \sin \theta_r \sin \theta_p - \cos \theta_r \sin \theta_y) (y_{A_1} - y_{A_2}) + (\cos \theta_y \sin \theta_p \cos \theta_r + \sin \theta_r \sin \theta_y) (z_{A_1} - z_{A_2}) \quad (4)$$

$$y_1 - y_2 = (\sin \theta_y \sin \theta_p \sin \theta_r + \cos \theta_r \cos \theta_y) (y_{A_1} - y_{A_2}) + (\sin \theta_y \sin \theta_p \cos \theta_r - \cos \theta_r \sin \theta_y) (z_{A_1} - z_{A_2}) \quad (5)$$

$$z_1 - z_2 = \cos \theta_p \sin \theta_r (y_{A_1} - y_{A_2}) + (\cos \theta_p \cos \theta_r) (z_{A_1} - z_{A_2}) \quad (6)$$

式中:(θ<sub>y</sub>, θ<sub>p</sub>, θ<sub>r</sub>) 为载机平台姿态角,分别表示偏航角、俯

仰角和横滚角。(y<sub>A1</sub> - y<sub>A2</sub>)、(y<sub>A1</sub> - y<sub>A1</sub>) 分别可表示为:

$$(y_{A_1} - y_{A_2}) = B_0 \cos \alpha \quad (7)$$

$$(y_{A_1} - y_{A_1}) = B_0 \sin \alpha \quad (8)$$

式中: B<sub>0</sub> 为物理基线长度,即图 1 中的 |A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>|, α 为基线倾角。因此,有效干涉基线长度与物理基线长度之间的关系可表示为:

$$B = B_0 \cdot F(\alpha, \theta_r, \theta_p, \theta_y, \theta_0) \quad (9)$$

其中, F(α, θ<sub>r</sub>, θ<sub>p</sub>, θ<sub>y</sub>, θ<sub>0</sub>) 的表达式为:

$$F(\alpha, \theta_r, \theta_p, \theta_y, \theta_0) =$$

$$\sqrt{\left( (a3 \cdot \cos\alpha + a4 \cdot \sin\alpha) \tan\left(\arctan\left(-\frac{a1 \cdot \cos\alpha + a2 \cdot \sin\alpha}{a3 \cdot \cos\alpha + a4 \cdot \sin\alpha}\right) + \theta_0\right)\right)^2 + (a3 \cdot \cos\alpha + a4 \cdot \sin\alpha)^2 + (a5 \cdot \cos\alpha + a6 \cdot \sin\alpha)^2} \quad (10)$$

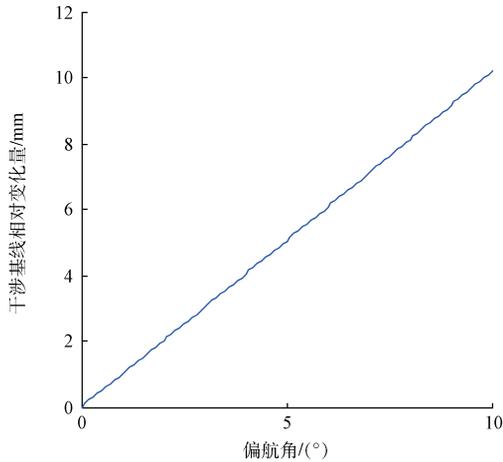
式中:

$$\begin{aligned} a1 &= (\cos\theta_y \sin\theta_r \sin\theta_p - \cos\theta_r \sin\theta_y), \\ a2 &= (\cos\theta_y \sin\theta_p \cos\theta_r + \sin\theta_y \sin\theta_r), \\ a3 &= (\sin\theta_y \sin\theta_p \sin\theta_r + \cos\theta_r \cos\theta_y), \\ a4 &= (\sin\theta_y \sin\theta_p \cos\theta_r - \cos\theta_y \sin\theta_r), \\ a5 &= (\cos\theta_p \sin\theta_r), \\ a6 &= (\cos\theta_p \cos\theta_r) \end{aligned} \quad (11)$$

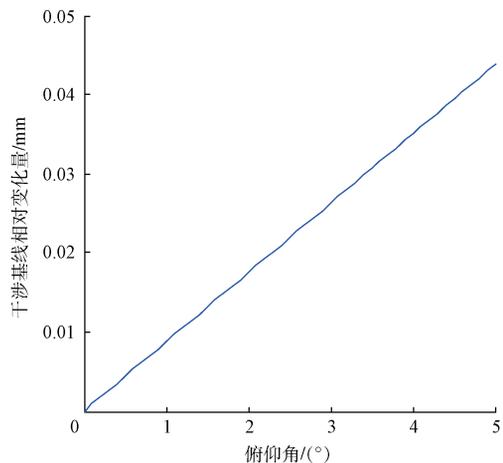
由式(9)可知,在斜视条件下,有效干涉基线是物理基线和载机姿态角的函数。

图 2 显示了有效干涉基线相对物理基线的变化量随各个姿态角的变化情况。为了突出各个姿态角对有效干涉基线的影响程度,仿真中对 3 个姿态角行了分离。其中,姿态角的变化范围均根据载机系统的实际飞行状态给出。仿真采用的系统参数如表 1 所示。

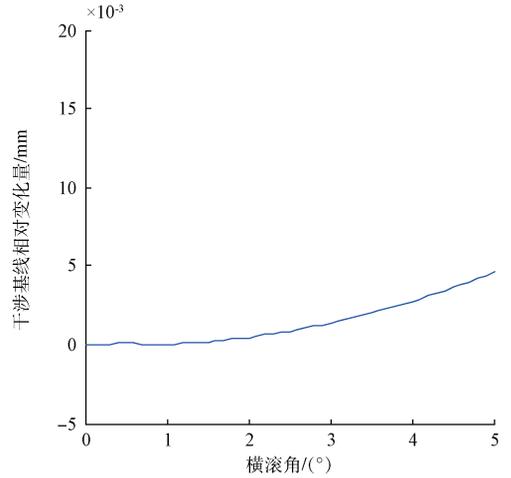
图 2(a)~(c)分别显示了有效干涉基线长度的相对变化量随偏航角、俯仰角和横滚角的变化情况,由图 2 可以



(a) 偏航角对有效干涉基线影响



(b) 俯仰角对有效干涉基线影响



(c) 横滚角对有效干涉基线影响

图 2 姿态角对有效干涉基线的影响

表 1 有效干涉基线分析仿真参数表

参数	参数值
物理基线长度	2.197 1 m
初始基线倾角	0.5°
初始斜视角	1.5°

看出,偏航角对干涉基线的影响最为显著,在仿真参数条件下,有效干涉基线长度相对物理基线长度的变化量达到毫米级,并且随着偏航角增大近似线性增大。通常毫米级的基线误差可引起米级的高程误差,因此由偏航角引起的有效干涉基线变化量不可忽略。由图 2(b)和(c)可以看出俯仰角对干涉基线长度的影响小于 0.05 mm,而横滚角的影响则更加微小,仅引起微米级的变化量,该量级的基线变化通常可以忽略。

在实际飞行过程中,载机平台的姿态角随方位时间变化,但对于一景 SAR 图像来说,在成像时,运动补偿已将姿态补成平均姿态,因此其有效干涉基线为该区域平均姿态所对应的有效干涉基线。

### 3 基于物理基线的定标方法

#### 3.1 斜视条件下的高程反演模型

斜视条件下机载 InSAR 的几何关系如图 3 所示,图中  $A_1$ 、 $A_2$  分别为主副天线相位中心位置, $x$ - $y$ - $z$  为大地坐标系,其中为  $x$  轴为载机飞行方向, $z$  轴为高程方向, $y$  轴与  $x$  轴、 $z$  轴垂直并构成右手坐标系。 $P$  为目标点位置, $H$  为主天线  $A_1$  高度, $r_1$  为主天线  $A_1$  到目标点  $P$  的斜距, $v$  为载

机平台速度,  $\beta$  为主天线斜视角,  $B$  为基线长度,  $\alpha$  为基线倾角,  $\theta_L$  为下视角。由图中几何关系可得目标点  $P$  的三维位置模型为:

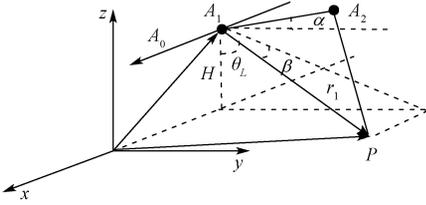


图 3 干涉 SAR 斜视几何示意图

$$P = A_1 + r_1 \begin{bmatrix} \sin\beta \\ \sqrt{\sin^2\theta_L - \sin^2\beta} \\ -\cos\theta_L \end{bmatrix} \quad (12)$$

目标点  $P$  的高度可表示为:

$$h = H - r_1 \cos\theta_L \quad (13)$$

式中:下视角  $\theta_L$  的表达式为:

$$\theta_L = \arccos(\cos\theta_p \cos\theta_{ol}),$$

$$\theta_{ol} = \alpha + \theta_r - \arcsin\left(\frac{\lambda\Phi}{2\rho\pi B} + \frac{\left(\frac{\lambda\Phi}{2\rho\pi}\right)^2 - B^2}{2\rho B}\right) \quad (14)$$

式中:  $\lambda$  为信号波长,  $\Phi$  为干涉相位,  $\rho$  代表工作模式, 标准模式下  $\rho = 1$ , 乒乓模式下  $\rho = 2$ 。则目标点  $P$  的高程重建模型可表示为:

$$h = H - r_1 \cos\theta_p \cos(\alpha + \theta_r - \arcsin\theta_{ol}) \quad (15)$$

### 3.2 基于物理基线的定标方法

由式(15)可知,影响目标高程的主要参数有:斜距、基线长度、基线倾角以及干涉相位等。本文中基于敏感度矩阵条件数最小准则<sup>[12]</sup>,选择基线长度、基线倾角和干涉相位 3 个参数共同构建敏感度方程求解干涉参数偏差。

传统的定标方法直接利用式(15)对各参数的偏导建立敏感度方程,由于式中的干涉基线实际上为有效干涉基线,因此传统的定标方法标定的基线参数为有效干涉基线。针对该问题,本文提出了对实际的物理基线参数进行定标的方法:在构建敏感度矩阵时将第 2 节中建立的有效干涉基线与物理基线的关系式(9)代入高程反演模型中,然后对物理基线参数求偏导,建立敏感度方程并求解其偏差,从而对实际的物理基线进行标定。

根据式(9)和(15),目标高程对物理基线参数的偏导为:

$$\frac{\partial h}{\partial B_0} = \cos\theta_p \cdot \frac{(B + r_1 \sin(\alpha + \theta_r - \theta_{ol})) \sin\theta_{ol}}{B \cos(\alpha + \theta_r - \theta_{ol})} \cdot F(\alpha, \theta_r, \theta_p, \theta_y, \theta_0) \quad (16)$$

目标高程对干涉相位和基线倾角的偏导为:

$$\frac{\partial h}{\partial \Phi} = -\cos\theta_p \cdot \frac{\lambda(r_1 + B \sin(\alpha + \theta_r - \theta_{ol})) \sin\theta_{ol}}{2\pi B \cos(\alpha + \theta_r - \theta_{ol})} \quad (17)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = r_1 \cdot \cos\theta_p \cdot \sin\theta_{ol} \cdot$$

$$\left(1 + \frac{(B + r_1 \sin(\alpha + \theta_r - \theta_{ol}))}{r_1 \cos(\alpha + \theta_r - \theta_{ol})} F(\alpha, \theta_r, \theta_p, \theta_y, \theta_0) \cdot \frac{\partial F(\alpha, \theta_r, \theta_p, \theta_y, \theta_0)}{\partial \alpha}\right) \quad (18)$$

式中:

$$\frac{\partial F(\alpha, \theta_r, \theta_p, \theta_y, \theta_0)}{\partial \alpha} = \frac{1}{F(\alpha, \theta_r, \theta_p, \theta_y, \theta_0)} \cdot$$

$$\left(F_y \cdot \tan\theta_i \cdot \left((a_4 \cos\alpha - a_3 \sin\alpha) \tan\theta_i - F_y \sec^2\theta_i \cdot \frac{a_2 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_4}{F_x^2 + F_y^2}\right) + (a_4 \cos\alpha - a_3 \sin\alpha) \cdot F_y + (a_6 \cos\alpha - a_5 \sin\alpha) \cdot F_z\right) \quad (19)$$

式中:

$$F_x = a_1 \cdot \cos\alpha + a_2 \cdot \sin\alpha,$$

$$F_y = a_3 \cdot \cos\alpha + a_4 \cdot \sin\alpha,$$

$$F_z = a_5 \cdot \cos\alpha + a_6 \cdot \sin\alpha,$$

$$\theta_i = \arctan\left(-\frac{F_x}{F_y}\right) + \theta_0 \quad (20)$$

式(16)~(18)描述了各干涉参数对目标高程的影响程度。此时,敏感度矩阵为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial \Phi} |_1 & \frac{\partial h}{\partial \alpha} |_1 & \frac{\partial h}{\partial B_0} |_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial h}{\partial \Phi} |_L & \frac{\partial h}{\partial \alpha} |_L & \frac{\partial h}{\partial B_0} |_L \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中:行向量代表某一特定地面控制点处的高程对各参数的偏导,  $L$  代表选用的控制点数目。目标高程差和干涉参数偏差的关系式可表示为:

$$\mathbf{F} \times \Delta \mathbf{X} = \Delta \mathbf{h} \quad (22)$$

式中:  $\Delta \mathbf{h}$  为  $L \times 1$  控制点高程误差向量,  $\Delta \mathbf{X}$  为  $3 \times 1$  个待估计干涉参数偏差向量,  $\mathbf{F}$  为  $L \times 3$  敏感度矩阵。利用足够数目的地面控制点高程信息,通过求解式(22)的最小二乘解,即可得到各参数的偏差值,进而对各参数进行校正。重复图4中的

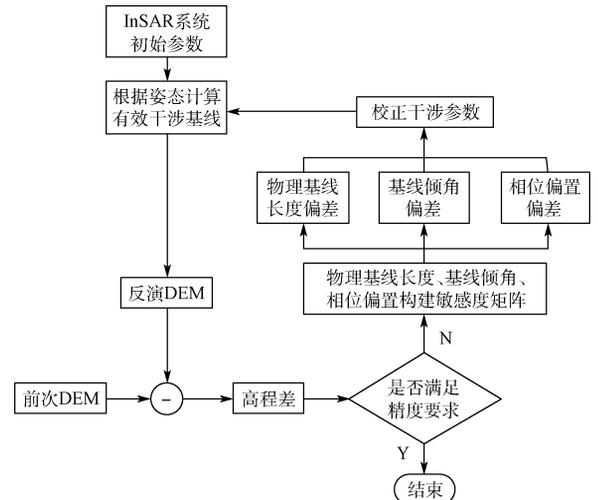


图 4 定标方法流程

定标流程,直至前后两次的 DEM 高程差值满足精度要求为止。

#### 4 实验与结果分析

实验采用中国科学院电子学研究所机载 InSAR 获取的一组实际数据,该 InSAR 系统工作在 X 波段,其主要系统参数如表 2 所示。图像获取时间为 2014 年 9 月 30 日,获取区域位于我国陕西省某地,地形以平地为主,图像范围内分布有道路、农田和建筑物等。

表 2 InSAR 系统参数

参数	参数值
基线长度/m	2.197 1
基线倾角/rad	0.000 546 2
工作频率/GHz	9.6
初始斜视角/rad	0.019 984
平台飞行高度/m	3 410.704
初始斜距/m	3 517.089
工作模式	乒乓模式

图 5(a)为定标场区域 SAR 图像,图中白色方框标记了地面控制点的分布情况,每一控制点处均布设有角反射器,其坐标由差分 GPS 测量得到,高程精度优于 5 cm。实验采用第 3 节中提出的定标方法,利用定标场数据对干涉系统参数进行定标,标定出系统的物理基线长度、基线倾角和干涉相位偏置。为了验证该方法的有效性,实验还选取了不同方位处的两块数据区(I)和(II),相应的场景 SAR 图像分别如图 5(b)、(c)所示。每块数据中均选取 10 个高程检查点,图中三角形表示检查点的分布情况,检查点坐标信息由西安煤航信息产业有限公司野外实测得到。在反演数据区(I)、(II)的场景 DEM 时,根据定标得到的物理基线长度和各数据区对应的载机姿态计算出相应的

有效干涉基线,再代入高程反演模型中计算各区域场景高度。表 3 给出了干涉参数的标定结果,表 4 给出了各数据区高程检查点的精度情况,并与利用传统定标方法所得的结果进行对比。

表 3 参数定标结果

参数	传统方法	改进方法
基线长度/m	2.215 069	2.212 333
基线倾角/rad	0.002 114 66	0.001 104 8
相位偏置/rad	707.120 59	707.440 24

表 4 检查点高程中误差

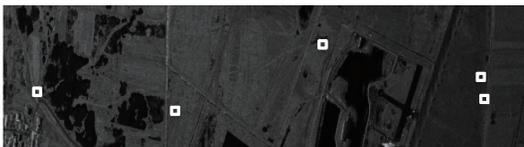
	数据区	传统方法	改进方法
高程	定标场	0.305 6	0.300 3
	(I)	0.489 7	0.305 3
中误差/m	(II)	0.705 7	0.568 8

由表中数据可知,传统定标方法所标定的基线长度为 2.215 069 m,该基线实际为定标场区域对应的有效干涉基线,将该基线参数结果用于非定标场区域(I)和(II)时,两区域得检查点高程中误差分别为 0.489 7 和 0.705 7 m,高程精度与定标场区域相比明显变差。其中数据区(II)所对应的平均姿态角相对定标场变化较大,因此其反演得到的高程中误差更大。利用该文的定标方法标定的物理基线长度为 2.212 333 m,根据数据区(I)和(II)对应的载机姿态角计算出两区域对应的有效干涉基线分别为 2.214 592 和 2.215 101 m,然后分别计算各区域的高程,最终数据区(I)和(II)的高程检查点中误差分别为 0.305 3 和 0.568 8 m,与传统定标方法的结果相比,高程精度分别提高了 0.184 4 和 0.136 9 m。实验结果说明了本文定标方法的有效性。

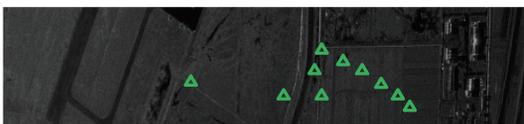
传统的定标方法标定的基线参数为有效干涉基线,在高程反演时没有考虑有效干涉基线随姿态角变化的情况,仍然将定标场区域的有效干涉基线应用到其他方位向的数据区,因此导致高程误差增大。而该文的定标方法标定的基线参数为实际的物理基线,其不随方位时间变化。对于不同方位向的数据区,在高程反演时分别根据各数据区域的姿态角对有效干涉基线进行更新,得到的高程精度比传统方法明显提高。实验结果证明了该文方法的有效性。

#### 5 结 论

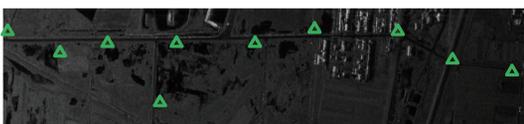
该文建立了机载 InSAR 斜视条件下有效干涉基线与物理基线之间的关系,并将其应用到敏感度方程定标模型中,从而对实际的物理基线进行定标,在高程反演时分别根据不同方位向的数据块对应的姿态更新其有效干涉基线。实验结果表明,与传统的定标方法相比,该方法在方



(a) 定标点区域



(b) 数据区(I)检查点



(c) 数据区(II)检查点

图 5 定标点及检查点分布情况

位向远离定标场的区域能获得更高的高程精度,验证了该文方法的有效性。该文的定标方法对于应用机载 InSAR 进行大面积高程测绘具有重要的参考意义。

## 参考文献

- [1] 耿辉,谢亚楠,王波,等. SAR 测高原理及精度分析[J]. 电子测量技术,2011,4(2):39-41.
- [2] 曹名宇,李世强,李宁. 多基线 InSAR 最大后验高程反演算法的改进[J]. 国外电子测量技术,2015,34(7):55-61.
- [3] KOBAYASHI T, UMEHARA T, UEMOTO J, et al. Evaluation of digital elevation model generated by an airborne interferometric SAR (Pi-SAR2)[C]. IEEE 2014 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014:378-381.
- [4] 罗华,雷斌,胡玉新. 融合机载高分辨率 InSAR 数据的 DEM 生成方法[J]. 国外电子测量技术,2013,32(8):26-30.
- [5] 靳国旺,张薇,向茂生,等. 一种机载双天线 InSAR 干涉定标新方法[J]. 测绘学报,2010,39(1):76-81.
- [6] 申琳,曾琪明,焦健. 机载 SAR 干涉定标参数分离式解算方法[J]. 地球信息科学学报,2015,17(7):862-870.
- [7] 毛永飞. 机载双天线干涉 SAR 误差补偿与定标技术

研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所,2012:65-76.

- [8] 王萌萌,黄国满,罗新,等. 基于点相位改正的机载干涉 SAR 定标算法[J]. 测绘科学,2014,39(4):97-101.
- [9] 韩松涛. 机载双天线干涉 SAR 数据处理关键技术研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所,2010:31-40.
- [10] 姜丽敏. 干涉 SAR 区域网连接点检测方法研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所,2012:7-8.
- [11] 胡继伟,洪峻,明峰,等. 一种适用于大区域稀疏控制点下的机载 InSAR 定标方法[J]. 电子与信息学报,2011,33(8):1792-1797.
- [12] 张薇. 机载双天线干涉 SAR 定标方法研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所,2009:43-45.

## 作者简介

曾友兵,硕士研究生,研究方向为机载 InSAR 定标技术。

洪峻,研究员,博士生导师,研究方向为 SAR 定标技术、机载 SAR 系统设计。

王宇,副研究员,研究方向为机载 SAR 定标技术。

E-mail:zengyoubing91@foxmail.com

(上接第 33 页)

- [7] 黄金磊. 高速动车组弓网系统电磁骚扰特性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2013.
- [8] 钟德胜,韦道准,虞凯. 弓网离线电弧电磁干扰机理及防护[J]. 铁路通信信号工程技术,2014(6):39-43.
- [9] 武晋泽,唐晋娥,董有尔,等. 常压下气体放电等离子体振荡的实验与理论研究[J]. 物理学报,2012,61(19):350-354.
- [10] 刘艳峰,魏兵,任新成. 近场通信天线场分布特性仿真[J]. 电子测量技术,2015,38(8):132-134.

- [11] 吴书伟,李显欣. 浅谈高速电力机车电磁干扰的测试[J]. 电气化铁道,2011(1):41-44.

## 作者简介

何成功,1989 年出生,硕士研究生。主要研究方向为电磁干扰建模与仿真、微波测量技术研究。

邓联文(通讯作者),1969 年出生,博士生导师,教授。主要研究方向为电磁波吸收材料和抗电磁干扰等。

E-mail:dlw626@163.com