



# 星载分布式 InSAR 基线定标新方法

钱方明<sup>1,2,3</sup> 姜挺<sup>1</sup> 楼良盛<sup>2,3</sup> 陈刚<sup>2,3</sup> 刘薇<sup>2,3</sup>

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

3 西安测绘研究所,陕西 西安,710054

**摘要:**为了解决星载分布式干涉合成孔径雷达三维基线的高精度定标问题,提出了一种基线定标新方法。首先,该方法将辅雷达多普勒方程与辅雷达距离改化方程相结合,形成基线定标模型,再基于地面控制点,采用最小二乘迭代解算基线三个轴向误差。与基于辅雷达距离改化方程的基线定标模型相比,该基线定标模型优化了法方程系数矩阵条件数,减小了矩阵的病态程度,提高了定标精度。然后,根据基线定标实际上是利用多个地面控制点交会出基线矢量,以及增大交会角可提高交会精度的原理,给出了控制点布设策略,即在近、远距端两侧布设控制点。与均匀布设控制点方式相比,该方式能显著提高定标精度和稳健性。最后,利用星载分布式干涉合成孔径雷达仿真数据进行基线定标实验,先后开展基于不同控制点数量、不同控制点精度、不同控制点布设策略的基线定标实验。实验结果表明,该方法能实现三维基线高精度定标,对跨轨、顺轨、径向基线的定标精度能达到毫米级,可为星载分布式干涉合成孔径雷达基线定标提供一种新途径。

**关键词:**星载分布式干涉合成孔径雷达;干涉基线;基线定标;最小二乘

**中图分类号:**P237

**文献标志码:**A

星载分布式干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)系统是指利用多颗满足一定编队构形的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星对地面同一地区进行一发多收、自发自收、多发多收或交替发射各自接收式干涉成像,获取 SAR 复影像对的 InSAR 测量系统<sup>[1-2]</sup>。星载分布式 InSAR 已成为星载 InSAR 的发展趋势,与重复轨道 InSAR 相比,其回波之间具有较好的相干性,数据可用率高、产品精度高;与单平台双天线 InSAR 相比,其工程实现难度较低,通过编队构形切换可支撑多任务多模式。

InSAR 测量中的干涉基线是指两颗雷达对同一地面目标观测时,主辅雷达天线相位中心(antenna phase centre, APC)的连线<sup>[3]</sup>,简称基线。基线是干涉测量的基础,InSAR 测量系统的模糊高度和相位的高程敏感度都与基线长度直接相关。此外,基线矢量误差是影响高程精度的主要因素之一,若星载分布式 InSAR 系统的模糊高度为 45 m,雷达波长为 3.2 cm(X 波段),在主雷达视线方向上 1 cm 的基线误差会带来 14 m 左右的高

程误差。基线定标的任务是利用地面控制信息(控制点、数字高程模型数据等)确定基线的系统误差,从而确定真实基线矢量。分布式 InSAR 系统的设计指标中一般要求基线定标的精度在毫米级。基线定标受到了国内外许多学者的关注,文献[4-9]通过建立切向、交向、径向坐标系,对重复轨道、单平台双天线或分布式 InSAR 基线进行了定标,此类方法中大多数没有直接给出定标方法的精度,而是利用标定后基线计算地面点位置,通过地面点的高程和平面定位精度来评估基线定标算法,且只实现了二维基线(跨轨、径向基线或基线长度、基线方位角)定标,其中何秀凤等<sup>[9]</sup>提出的基于卡尔曼滤波和配准参数的基线估计方法,以精轨参数计算的基线为真值,该方法得到的二维基线估计精度为分米级。文献[10-12]在 TanDEM 系统的定标中将基线误差分解为平行基线误差和垂直基线误差,采用不同波位获取的相邻两景数据联合解算二维基线误差,定标后的基线误差优于 2 mm,该方法对数据获取要求较高,且需要较大面积的定标场支持,其定标场选在了澳大利亚北部,范围 400 km×800 km。通

收稿日期:2018-12-20

项目资助:国家自然科学基金(41371439)。

第一作者:钱方明,硕士,助理研究员,主要从事 InSAR 数据处理与几何定标方法研究。122748721@qq.com

常情况下星载 InSAR 的基线是三维的,分布式 InSAR 采用绕飞构型,两星沿航向存在较长的距离(德国 TanDEM-X 系统沿航向距离最大可达到 500 m<sup>[10]</sup>),因此有必要对顺轨基线进行定标。陈刚等<sup>[13]</sup>开展了星载 InSAR 基线定标方法研究,提出了一种星载 InSAR 立体基线定标方法,并利用仿真数据进行了实验,顺轨基线的精度在分米级,其他两个方向基线的精度在厘米级,该方法定标精度较低,无法满足星载分布式 InSAR 系统毫米级定标精度要求。

针对以上方法的不足,本文提出了一种新的星载分布式 InSAR 三维基线定标方法。首先从改善法方程系数矩阵状态的角度出发,将辅雷达距离改化方程与辅雷达多普勒方程组合,形成新的基线定标模型,给出了基线误差解算方法;然后通过对基线定标原理进行分析,提出了一种在近、远距端两侧布设控制点的策略;最后通过仿真数据实验验证了新基线定标模型和控制点布设策略的正确性和合理性。

## 1 主雷达 APC 坐标系下三维基线定标方法

基线矢量可以表示为辅雷达 APC 相对于主雷达 APC 的偏移,因此以主雷达 APC 为原点建立空间直角坐标系,就可以用 3 个轴向的坐标表示基线矢量。参考卫星轨道数据处理中的卫星中心坐标系<sup>[2]</sup>定义建立主雷达 APC 坐标系,如图 1 所示。 $A_1$  为主雷达 APC,与坐标原点  $O$  重合; $A_2$  为辅雷达 APC, $P(X_d, Y_d, Z_d)$  为地面点; $R_1$ 、 $R_2$  分别为主、辅雷达斜距; $B$  为基线矢量; $S$  为主雷达 APC 在地固系的位置矢量; $V$  为主雷达速度矢量。主雷达速度矢量方向定义为  $Y$  轴,称为顺轨方向; $Y$  轴与  $S$  矢量确定平面的法向量方向定义为  $X$  轴,称为跨轨方向; $X$  轴和  $Y$  轴的正交方向为  $Z$  轴,称为径向。这样对于每一方位时刻,基线矢量在主雷达 APC 坐标系中可分解为顺轨基线  $B_Y$ 、跨轨基线  $B_X$  和径向基线  $B_Z$ 。

### 1.1 三维基线定标模型

分布式 InSAR 对地定位模型可以用主、辅雷达距离和多普勒方程表示,在这 4 个方程中辅雷达距离方程和辅雷达多普勒方程包含基线参数,根据三角形余弦定理可对辅雷达距离方程进行改化<sup>[13]</sup>,将辅雷达距离改化方程和多普勒方程组成基线定标模型,在主雷达 APC 坐标系下,该模型可表示为:

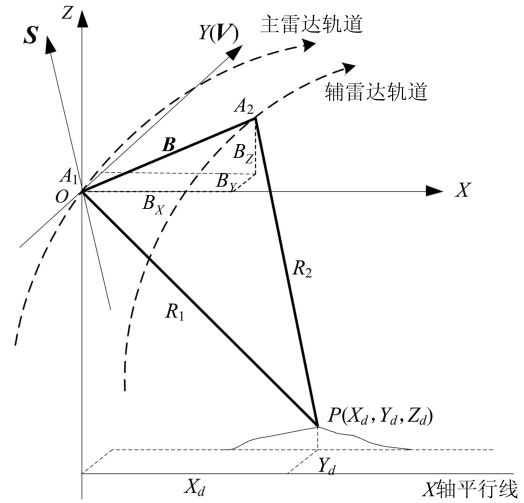


图 1 主雷达 APC 坐标系中表示的基线矢量示意图  
Fig.1 Diagram of Baseline Vector in Main Radar APC Coordinate System

$$\begin{cases} F_R = R_1^2 + B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2 - 2B_X X_d - \\ 2B_Y Y_d - 2B_Z Z_d - \left(R_1 - \frac{\lambda \phi_i}{2\rho\pi}\right)^2 = 0 \\ F_D = V_{X_2}(B_X - X_d) + V_{Y_2}(B_Y - Y_d) + \\ V_{Z_2}(B_Z - Z_d) + \frac{\lambda R_2 f_{d_2}}{2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $(B_X, B_Y, B_Z)$  为基线矢量; $\lambda$  为雷达波长; $\phi_i$  为地面点的绝对干涉相位; $\rho$  表示收发模式, $\rho = 1$  表示一发双收模式, $\rho = 2$  表示自发自收模式; $(V_{X_2}, V_{Y_2}, V_{Z_2})$  为辅雷达速度矢量; $f_{d_2}$  为辅雷达多普勒中心频率。式(1)为非线性方程,若想实现各参数的平差,需对各参数求导,将其线性化。线性化后,式(1)可写成:

$$\begin{cases} F_R = F_{R_0} + a_0 \Delta B_X + a_1 \Delta B_Y + a_2 \Delta B_Z = 0 \\ F_D = F_{D_0} + a'_0 \Delta B_X + a'_1 \Delta B_Y + a'_2 \Delta B_Z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,未知数系数分别为:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{\partial F_R}{\partial B_X} = 2(B_X - X_d) \\ a_1 = \frac{\partial F_R}{\partial B_Y} = 2(B_Y - Y_d) \\ a_2 = \frac{\partial F_R}{\partial B_Z} = 2(B_Z - Z_d) \\ a'_0 = \frac{\partial F_D}{\partial B_X} = V_{X_2} \\ a'_1 = \frac{\partial F_D}{\partial B_Y} = V_{Y_2} \\ a'_2 = \frac{\partial F_D}{\partial B_Z} = V_{Z_2} \end{cases} \quad (3)$$

常数项为:

$$F_0 = \begin{bmatrix} F_{R_0} \\ F_{D_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^2 + B_{X_0}^2 + B_{Y_0}^2 + B_{Z_0}^2 - 2B_{X_0}X_d - \\ 2B_{Y_0}Y_d - 2B_{Z_0}Z_d - \left(R_1 - \frac{\lambda\phi_i}{2\rho\pi}\right)^2 \\ V_{X_2}(B_{X_0} - X_d) + V_{Y_2}(B_{Y_0} - Y_d) + \\ V_{Z_2}(B_{Z_0} - Z_d) + \frac{\lambda R_2 f_{d_2}}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $(B_{X_0}, B_{Y_0}, B_{Z_0})$  为基线矢量初值。

当有  $n(n \geq 2)$  个地面控制点, 则可以采用最小二乘法求解, 按照式(2)列出误差方程组。实际计算时, 在式(2)第一个方程中,  $Y_d$  的绝对值相对于  $X_d, Z_d$  较小(若主雷达在零多普勒面内成像的条件下,  $Y_d$  值为 0), 系数  $a_1$  的绝对值相对于  $a_0, a_2$  较小; 在式(2)第二个方程中, 系数  $a'_1$  为速度在  $Y$  轴方向也就是卫星飞行方向的分量, 一般为 7.6 km/s 左右, 它相对其他两个轴方向的分量要大得多, 这与在第一个方程中的情况正好相反。因此, 由两个方程组成的定标模型与只有一个方程的定标模型<sup>[13]</sup>相比, 法方程系数矩阵条件数更优, 矩阵的病态程度更小, 最小二乘解算精度更高。

## 1.2 控制点布设策略

布设控制点的常规方法是在场景内均匀布设, 为了提高定标模型平差解算的精度和稳定性, 一般应尽量多布设控制点, 但在实际情况下, 若场景内地形复杂, 在某些区域布放控制点难度很大, 另外由于成本和时间等因素, 可能无法进行大量控制点的布设, 因此如何能以较少的控制点实现较高的定标精度是值得研究的问题。除了改进模型外, 优化控制点的布设策略也是一种解决问题的途径。图2为基线定标原理示意图, 通过干涉方式可获取高精度斜距  $R_2$  和  $R_3$ , 在已知地面点  $P_1, P_2$  点坐标后, 以斜距  $R_2$  和  $R_3$  为半径做圆弧, 两个圆弧交于  $A_2$ , 从而求解出基线矢量。在其他误差条件不变情况下, 要想提高交会精度, 就必须拉大  $P_1$  和  $P_2$  点之间距离, 即增加  $\angle P_1 A_2 P_2$  的角度, 因此, 当采用多个控制点进行基线定标时, 控制点应尽量布设在近距端和远距端附近。

## 2 实验与分析

### 2.1 实验数据与定标精度评估方法

为了验证算法的正确性, 本文利用 InSAR 仿真数据进行定标实验, 仿真数据的优势是可以设定与实际情况相似的误差值, 通过比较定标出的

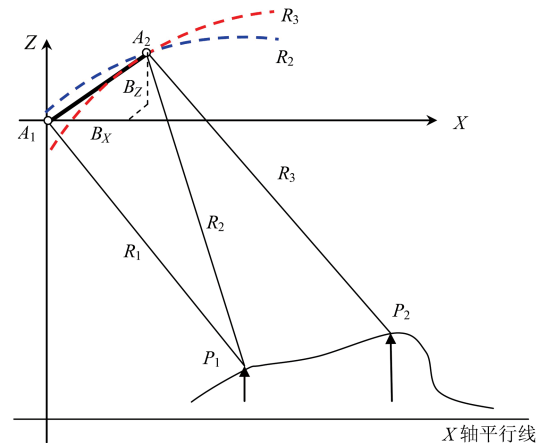


图2 基线定标原理示意图

Fig.2 Diagram of Baseline Calibration Principle

误差值与设定值之间的偏差, 来确定定标算法的精度。仿真所使用的主要参数如下: 轨道高度为 538.22 km; 主星多普勒中心频率为  $-7.12$  Hz; 辅星多普勒中心频率为  $-75.31$  Hz; 脉冲重复频率为 3 490 Hz; 主星速度为 7 656.55 m/s; 波长为 0.03 m; 分辨率为  $3.20 \text{ m} \times 1.61 \text{ m}$  (方位向  $\times$  距离向); 地面场景大小为  $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ , 场景大地高范围 4.22~397.78 m。首先对场景进行电磁建模, 得到雷达回波数据; 然后进行成像处理、干涉处理, 得到基线参数和干涉相位数据。基线定标中主要误差源为控制点地面坐标误差、干涉相位误差、斜距误差<sup>[14]</sup>, 原始仿真数据无误差, 为了与实际情况接近, 分别加入误差。实际中控制点地面坐标的误差由图像上刺点误差和数字表面模型误差决定, 一般在亚米级, 因此给控制点地面坐标(3个坐标分量)分别加入随机误差  $e_1 \sim N(0, \sigma_1^2)$ ,  $\sigma_1 = 0.3 \text{ m}$ 。InSAR 高程测量相位误差最大值在  $30^\circ$  左右<sup>[15]</sup>, 因此干涉相位加入随机误差  $e_2 \sim N(0, \sigma_2^2)$ ,  $\sigma_2 = 30^\circ$ 。斜距误差由设备内延迟误差和大气延迟误差组成, 最大误差在 3 m 左右, 因此斜距加入随机误差  $e_3 \sim N(0, \sigma_3^2)$ ,  $\sigma_3 = 3 \text{ m}$ 。参考国外 TanDEM 系统定标前的基线误差为厘米级, 同时存在少量的随机误差影响, 因此给跨轨基线  $B_X$ 、顺轨基线  $B_Y$ 、径向基线  $B_Z$  分别增加了  $-5.00 \text{ cm}$ 、 $-5.00 \text{ cm}$ 、 $5.00 \text{ cm}$  的常数误差(系统误

差),并且给每个分量加入随机误差  $e_4 \sim N(0, \sigma_4^2)$ ,  $\sigma_4=0.1$  cm。

由于主要误差源属于随机误差,因此定标结果会在真值附近随机波动,为了抑制随机误差的影响,需要进行多次定标实验。从精度评估角度来说,应该采用准确度作为衡量基线定标方法精度的指标,准确度指数学期望与真值的接近程度,常用偏差表示,这里准确度是指多次定标标出误差的数学期望与加入系统误差值的偏差。同时将标准差作为另外一个判据,标准差是指随机变量与其数学期望的接近程度,它表征算法受偶然误差影响的程度。标准差越小,说明单次定标结果与数学期望值越接近,算法的稳健性也越好,少量的定标实验即可满足精度要求;标准差越大,说明算法的稳健性较差,需要大量的定标实验方能满足定标要求。InSAR 基线定标的主要目的是提高数字高程模型(digital elevation model, DEM)产品精度,因此可将基线定标后生成 DEM 精度与基线定标前生成 DEM 精度进行比较,来验证各种条件下定标方法的正确性。

## 2.2 基线定标实验结果与分析

### 2.2.1 不同控制点数量定标

本实验设计了 5 种控制点布设方案,方位向  $\times$  距离向分别为 20(5 $\times$ 4)、60(10 $\times$ 6)、100(10 $\times$ 10)、140(14 $\times$ 10)、180(15 $\times$ 12) 个控制点在场景中均匀分布。通过像坐标量测将控制点转刺到图像上,利用以上 5 种控制点布设方案进行基线定标实验。

实验中,每种控制点布设方案都进行了 200 次定标,迭代终止条件设置为前后两次计算得到的每个轴向基线改正数之差的绝对值都小于 0.1 mm,每次定标的迭代次数为 2 次,5 种控制点布设方案的法方程系数矩阵条件数为  $3.75 \times 10^4$  左右,统计均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  记录在表 1 中,同时计算出准确度的绝对值  $|\delta|$ 。在场景中均匀选取 100(10 $\times$ 10) 个地面点(与控制点不重合)作为检查点,验证定标前后 DEM 的精度,定标前由于各种误差源的存在,生成的 DEM 平面位置精度为 55.22 m,高程精度为 48.94 m,定标后 DEM 平面位置精度  $\epsilon_p$  和高程精度  $\epsilon_h$  记录在表 1 中。

表 1 控制点均匀分布的定标实验结果

Tab.1 Results of Calibration Experiments with Evenly Distributed Control Points

控制点数量/个	基线分量	系统误差/cm	$\mu$ /cm	$\sigma$ /cm	$ \delta $ /cm	$\epsilon_p$ /cm	$\epsilon_h$ /cm
20	$B_X$	-5.00	-4.48	7.95	0.52	355.31	75.23
	$B_Y$	-5.00	-5.29	5.60	0.29		
	$B_Z$	5.00	5.46	6.99	0.46		
60	$B_X$	-5.00	-5.29	4.06	0.29	354.89	75.40
	$B_Y$	-5.00	-5.10	3.34	0.10		
	$B_Z$	5.00	4.75	3.57	0.25		
100	$B_X$	-5.00	-4.77	2.81	0.23	355.19	75.23
	$B_Y$	-5.00	-5.05	2.43	0.05		
	$B_Z$	5.00	5.20	2.47	0.20		
140	$B_X$	-5.00	-4.85	2.65	0.15	355.33	75.21
	$B_Y$	-5.00	-4.88	2.13	0.12		
	$B_Z$	5.00	5.13	2.33	0.13		
180	$B_X$	-5.00	-5.05	2.25	0.05	355.44	75.26
	$B_Y$	-5.00	-5.13	2.02	0.13		
	$B_Z$	5.00	4.95	1.98	0.05		

从表 1 中可以看出:(1)顺轨基线准确度绝对值随控制点数量的增加先减小后增加,其他两个方向基线标准差与准确度绝对值随控制点数量的增加而减小,标准差减小的幅度更大。(2)5 种控制点布设方案基线三轴定标结果的准确度绝对值大多在毫米级,有的甚至达到亚毫米级,也

就是多次定标标出误差的数学期望与误差设定值(真值)之间的偏差很小,说明了基于辅雷达距离改化方程和多普勒方程的基线定标模型是正确的,且具有较高的定标精度。(3)控制点数量对于定标精度具有重要影响。随着控制点数量增多,跨轨基线、径向基线定标准确度绝对值逐渐

减小, 顺轨基线定标准确度绝对值保持在1 mm左右; 3个轴向基线的标准差逐渐减小, 算法的稳健性逐渐提升。因此在实际定标中, 应尽可能多布设控制点来提高定标精度和稳健性。(4) 通过基线定标可显著提高DEM精度, DEM平面精度可提高一个数量级, DEM高程精度可提高两个数量级。由于存在其他误差源, 基线定标后, 生成的DEM平面精度为3.55 m左右, 高程精度为0.75 m左右, 不同控制点数量情况下, 精度差别

在毫米级。

2.2.2 不同控制点精度定标

由于地面控制点获取途径不同, 精度会存在较大的差异, 因此给控制点地面坐标分别加入随机误差2.0 m、1.0 m、0.5 m、0.1 m后进行定标实验, 分析控制点精度对定标结果影响, 在场景中均匀选取60(10×6)个控制点, 其他误差源加入的误差大小与§2.1中的相同, 将结果记录在表2中。

表2 不同控制点精度的定标实验结果

Tab.2 Results of Calibration Experiments with Control Points of Different Accuracy

控制点精度/m	基线分量	系统误差/cm	$\mu/cm$	$\sigma/cm$	$ \delta /cm$	$\epsilon_p/cm$	$\epsilon_h/cm$
2.0	$B_X$	-5.00	-5.45	4.59	0.45	357.35	76.22
	$B_Y$	-5.00	-5.65	22.38	0.65		
	$B_Z$	5.00	4.61	4.03	0.39		
1.0	$B_X$	-5.00	-5.36	4.14	0.36	354.88	75.42
	$B_Y$	-5.00	-5.33	11.18	0.33		
	$B_Z$	5.00	4.69	3.64	0.31		
0.5	$B_X$	-5.00	-5.31	4.06	0.31	354.88	75.40
	$B_Y$	-5.00	-5.16	5.58	0.16		
	$B_Z$	5.00	4.73	3.57	0.27		
0.1	$B_X$	-5.00	-5.27	4.08	0.27	354.89	75.39
	$B_Y$	-5.00	-5.03	1.10	0.03		
	$B_Z$	5.00	4.76	3.59	0.24		

从表2可以看出, 随着地面控制点精度提高, 3个轴向基线的准确度绝对值和标准差逐渐减小, 定标精度和算法的稳健性逐渐提升。利用定标后基线生成DEM, 其平面精度和高程精度基本稳定, 不同控制点精度情况下, 精度差别在毫米级。因此在实际定标中, 应尽可能采用高精度控制点。

2.2.3 不同控制点布设策略定标

在场景中选取两个子条带, 子条带的距离向宽为3 km, 方位向长度与场景方位向长度一致,

每个子条带布设30个控制点, 控制点在子条带内均匀分布, 共布设60个控制点。如图3所示, 三角形为控制点, 矩形框为场景的边界, 水平方向为方位向, 竖直方向为距离向, 虚线为子条带距离向边界。图3(a)表示两个子条带位于距离向中部(不重叠); 图3(b)表示两个子条带分别位于场景距离向宽度1/3、2/3处; 图3(c)表示两个子条带分别位于近、远距端。利用以上3种控制点布设方式进行基线定标实验, 各种误差源加入的误差大小与§2.1中的相同。

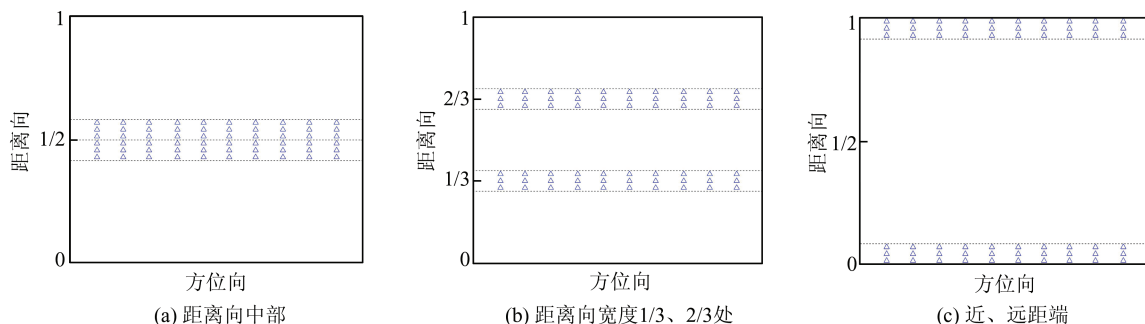


图3 控制点子条带位置示意图

Fig.3 Diagrams of Control Points Sub-band Location

图 4 为 3 种控制点布设方式基线定标结果统计示意图,每个正方形表示一次定标标出的基线分量误差值。图 5 为基线三轴标出值与设定值互差示意图。从图 4、图 5 中可以看出,随着控制点子条带在距离向间距变大,标出三轴误差的均值与系统误差设定值之间的偏差变小,单次标出的跨轨基线、径向基线误差值与误差均值的偏差也变小,单次标出的顺轨基线误差值与误差均值的偏差变化量很小。

将定标实验的均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  记录在表 3 中,同时计算出准确度的绝对值  $|\delta|$ ,可见标准差与准确度绝对值随着控制点子条带在距离向间距变大而减小,跨轨基线、径向基线的标准差与

准确度绝对值减小幅度较顺轨基线的大。利用定标后基线生成 DEM,其平面精度和高程精度基本稳定,不同控制点子条带位置情况下,精度差别在毫米级。

比较表 1 和表 3 可知,60 个控制点两侧布设于近、远距端方式的定标结果优于均匀布设方式,接近 140 个控制点均匀布设方式的定标结果。由此可以推出,若要达到相同的定标精度,前者布设方式所需的控制点数量明显少于后者。控制点布设策略对于定标精度同样具有重要影响,控制点在近、远距端两侧布设的方式能显著提高定标精度和稳健性,这与理论分析一致,是一种较好的布设策略。

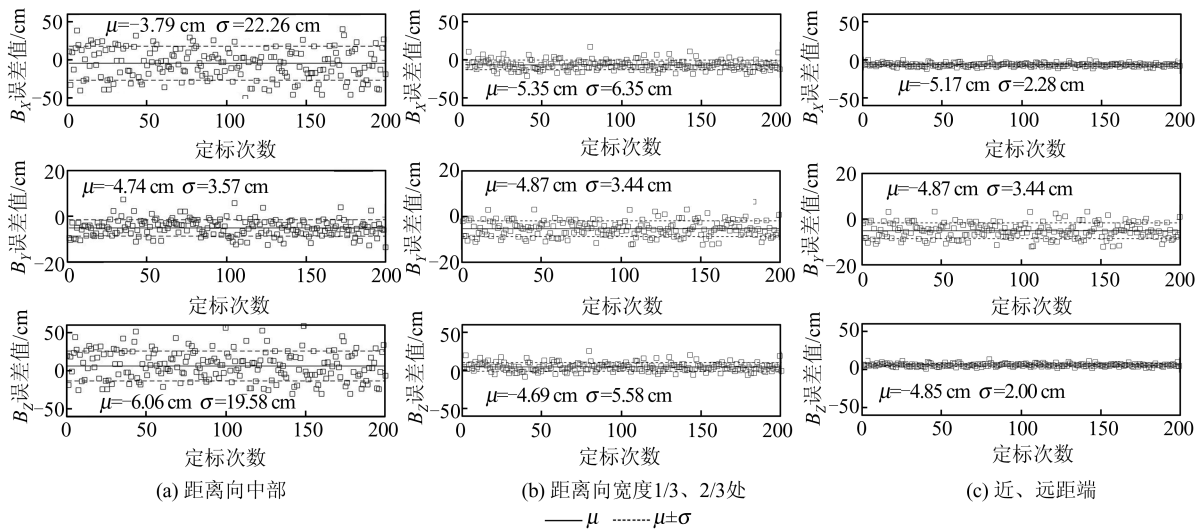


图 4 控制点子条带不同位置时定标误差统计

Fig.4 Calibration Error Statistics for Sub-bands of Control Points at Different Positions

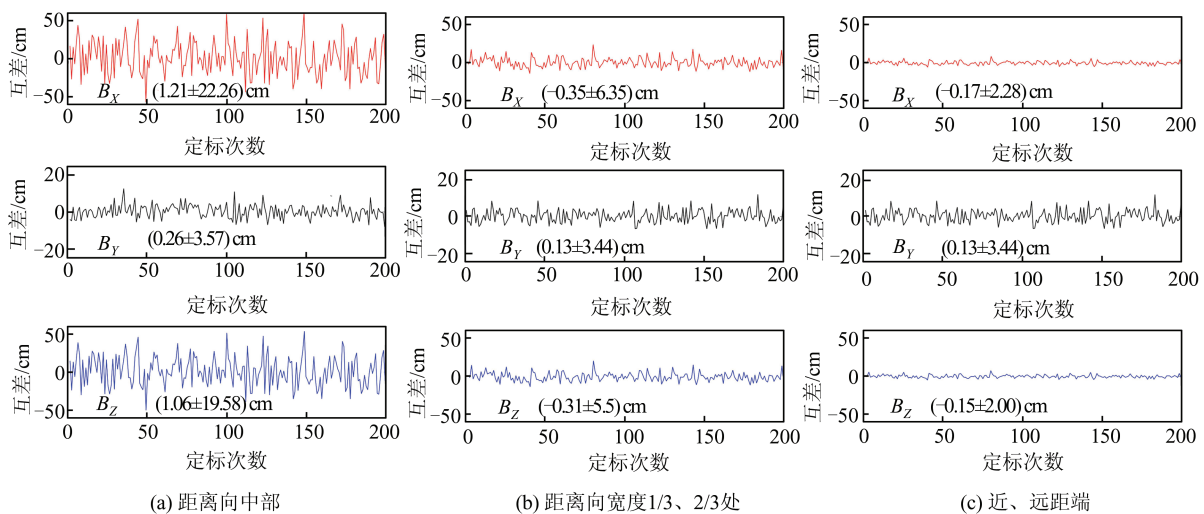


图 5 控制点子条带不同位置时标出值与设定值互差

Fig.5 Difference Between the Calibrated Value and the Set Value for Sub-bands of Control Points at Different Positions

表3 控制点子条带不同位置的定标结果/cm

Tab.3 Calibration Results for Sub-bands of Control Points at Different Positions/cm

子条带位置	基线分量	系统误差	$\mu$	$\sigma$	$ \delta $	$\epsilon_p$	$\epsilon_h$
距离向中部	$B_X$	-5.00	-3.79	22.26	1.21		
	$B_Y$	-5.00	-4.74	3.57	0.26	356.19	75.37
	$B_Z$	5.00	6.06	19.58	1.06		
距离向宽度1/3、2/3处	$B_X$	-5.00	-5.35	6.35	0.35		
	$B_Y$	-5.00	-4.87	3.44	0.13	355.04	75.38
	$B_Z$	5.00	4.69	5.58	0.31		
近、远距端	$B_X$	-5.00	-5.17	2.28	0.17		
	$B_Y$	-5.00	-4.87	3.44	0.13	355.12	75.30
	$B_Z$	5.00	4.85	2.00	0.15		

### 3 结 语

本文提出了一种星载分布式InSAR基线定标新方法,该方法基于辅雷达距离改化方程和多普勒方程的定标模型,可采用均匀或近、远距端两侧布设控制点的策略,在条件允许的情况下优先选择后一种策略,同时应尽可能采用高精度地面控制点,通过最小二乘平差迭代计算确定基线误差,基线定标精度能达到毫米级。本文提出的方法与国外TanDEM系统中的定标方法相比,精度相当,增加了对顺轨基线的定标,从而可实现三维基线定标,所需场地面积较小,一景数据范围(约30 km×30 km)即可满足要求,控制点的布设方式相对灵活,兼顾了定标精度与地面控制条件,因此具有一定优势。本文提出的方法可为星载分布式InSAR基线定标提供一种新途径。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang Yongjun. Study on Error Analysis and DEM Precision Improvement Methods of Spaceborne Distributed InSAR[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011(张永俊. 星载分布式InSAR系统的误差分析与DEM精度提高方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011)
- [2] Lou Liangsheng, Tang Xiaotao, Niu Rui. Analysis of Influence on System Performance from InSAR Space Synchronization Based on Formation Satellites Based InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(10): 892-894(楼良盛, 汤晓涛, 牛瑞. 基于卫星编队InSAR空间同步对系统性能影响的分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(10):892-894)
- [3] Tu J, Gu D F, Wu Y, et al. Error Modeling and Analysis for InSAR Spatial Baseline Determination of Satellite Formation Flying [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012(4):346-360
- [4] Small D. Baseline Modelling for ERS-1 SAR Interferometry [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Piscataway, New Jersey, USA, 1993
- [5] Knedlik S, Loffeld O. Baseline Estimation and Prediction Referring to the SRTM [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Piscataway, New Jersey, USA, 2002
- [6] Zink M, Geudtner D. Calibration of the Interferometric X-SAR System on SRTM [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Piscataway, New Jersey, USA, 1999
- [7] Costantini M, Minati F, Quagliarini A, et al. SAR Interferometric Baseline Calibration Without Need of Phase Unwrapping [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Piscataway, New Jersey, USA, 2004
- [8] Liu Guoxiang. Monitoring Surface Deformation Area by Radar Interferometry [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006(刘国祥. 利用雷达干涉测量技术监测区域地表形变[M]. 北京:测绘出版社, 2006)
- [9] He Xiufeng, He Min. InSAR Earth Observation Data Processing Method and Comprehensive Measurement [M] Beijing: Science Press, 2012:63-65(何秀凤, 何敏. InSAR对地观测数据处理方法与综合测量[M]. 北京:科学出版社, 2012:63-65)
- [10] Gonzalez J H, Bachmann M, Krieger G, et al. Development of the TanDEM-X Calibration Concept: Analysis of Systematic Errors [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 716-726
- [11] Bachmann M, Gonzalez J H, Krieger G, et al. Calibration of the Bistatic TanDEM-X Interferometer [C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, German, 2012

- [12] Antony J W, Gonzalez J H, Schwerdt M, et al. Results of the TanDEM-X Baseline Calibration [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6 (3) : 1 495 - 1 501
- [13] Chen Gang, Tang Xiaotao, Qian Fangming. A Three-Dimensional Baseline Calibration Method of Spaceborne InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(1) : 37-41 (陈刚, 汤晓涛, 钱方明. 星载 InSAR 立体基线定标方法 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, 39(1):37-41)
- [14] Zhao S Y, Gu D F, Yi B, et al. Error Analysis for the Baseline Estimation and Calibration of Distributed InSAR Satellites [C]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Piscataway, New Jersey, USA, 2016
- [15] Lou Liangsheng, Tang Xiaotao, Huang Qilai. Influence of Azimuth Base-Line on Formation-Flying Satellites Based InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32 (1) : 59-61 (楼良盛, 汤晓涛, 黄启来. 基于卫星编队 InSAR 方位向基线影响分析 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(1):59-61)

## A New Method of Space-Borne Distributed InSAR Baseline Calibration

QIAN Fangming<sup>1,2,3</sup> JIANG Ting<sup>1</sup> LOU Liangsheng<sup>2,3</sup> CHEN Gang<sup>2,3</sup> LIU Wei<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geographical Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China

<sup>3</sup> Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

**Abstract:** To solve the problem of high precision calibration of three-dimensional baseline of space-borne distributed interferometric synthetic aperture radar (InSAR), a new method of baseline calibration is proposed. Firstly, this method combines the slave radar Doppler equation and the slave radar distance modification equation to form the baseline calibration model. Based on the ground control points, the least square iteration is used to solve the baseline three axial errors. Compared with the baseline calibration model based on the slave radar distance modification equation, the baseline calibration model optimizes the coefficient matrix condition number of the normal equation, reduces the morbidity of the matrix, and improves the calibration precision. Then, according to the baseline calibration, the baseline vector is actually used to intersect by the ground control points, and the intersection angle can be increased to improve the accuracy of the intersection. The control point layout strategy is given, that is, the control points are laid separately at the near and far ends of the radar footprint at ground. Compared with the way of laying control point uniformly, we can significantly improve the calibration precision and robustness. Finally, the spaceborne distributed InSAR simulation data was used to carry out the baseline calibration experiments based on different control points number, different control points precision, and different control points layout. The experiments show that the new method can achieve high-precision result of three-dimensional baseline calibration, namely, millimeter-scale in cross-track, along-track and radial baseline direction respectively, which can provide a new way for the baseline calibration of spaceborne distributed InSAR.

**Key words:** space-borne distributed interferometric synthetic aperture radar; interference baseline; baseline calibration; least-square

**First author:** QIAN Fangming, master, assistant researcher, specializes in InSAR data processing and geometry calibration method. E-mail: 122748721@qq.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China(41371439).

**引文格式:** QIAN Fangming, JIANG Ting, LOU Liangsheng, et al. A New Method of Space-Borne Distributed InSAR Baseline Calibration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1) : 126-133. DOI:10.13203/j.whugis20180199(钱方明, 姜挺, 楼良盛, 等. 星载分布式 InSAR 基线定标新方法 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(1) : 126-133. DOI:10.13203/j.whugis20180199)