

引文格式:陈刚,钱方明,刘志铭,等.天绘二号卫星双基成像几何模型改正算法[J].测绘学报,2022,51(12):2417-2424. DOI:10.11947/j. AGCS.2022.20210328.
CHEN Gang, QIAN Fangming, LIU Zhiming, et al. Algorithm to changing bistatic imaging geometric model for TH-2 satellite [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(12): 2417-2424. DOI: 10.11947/j. AGCS.2022.20210328.

天绘二号卫星双基成像几何模型改正算法

陈 刚^{1,2}, 钱方明^{1,2}, 刘志铭^{1,2}, 楼良盛^{1,2}

1. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

Algorithm to changing bistatic imaging geometric model for TH-2 satellite

CHEN Gang^{1,2}, QIAN Fangming^{1,2}, LIU Zhiming^{1,2}, LOU Liangsheng^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: Imaging geometric model of master and slave satellite directly affects many steps in InSAR data processing, such as complex image rough registration, flat plain effect removing, InSAR location, baseline calibration, block adjustment and ortho-rectification. In order to keep unified algorithm in imaging, both master and slave satellite of TH-2 use bistatic imaging geometric model. For complex image rough registration, flat plain effect removing and InSAR location step, bistatic imaging geometric model just increase algorithm complexity, but for baseline calibration, it brings new challenges. On one hand, most current baseline calibration algorithms are based on monostatic imaging geometric model and can not be used in TH-2; on the other hand, pair position combines to form four baselines, and four baselines exist correlation in calibration, which leads to difficulty for baseline calibration. In order to keep accuracy of baseline calibration, the paper presents algorithm to change bistatic geometric model into monostatic model and analyses the transformation accuracy for slave satellite. It's proved that the algorithm has high accuracy and the brought error can be ignored by theoretical analysis and test.

Key words: InSAR; distributed satellite; equivalent phase center; imaging geometric model; baseline calibration

摘 要:主辅星的成像几何模型直接影响着 InSAR 数据处理的多个环节,包括复影像概略配准、去平地效应、InSAR 定位、基线定标、区域网平差、正射纠正等。天绘二号卫星在成像时,为了保证算法统一,主辅星都采用了收发分置的双基成像几何模型。对于影像概略配准、去平地效应、InSAR 定位等环节,双基成像模型只是增加了算法的复杂度,但对于基线定标,这带来了新的挑战:①现有基线定标算法均针对主辅星为单基成像的几何模型,无法适用于天绘二号;②收发两两组合产生 4 条基线,4 条基线存在相关,导致基线定标难以实施。为了确保基线定标精度,本文提出了主辅星双基成像几何模型改正算法,并对辅星成像几何模型的改正精度进行了分析。理论分析和试验表明该方法引入误差很小,可以忽略不计。

关键词:干涉合成孔径雷达;分布式卫星;等效相位中心;成像几何模型;基线定标

中图分类号:P227

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2022)12-2417-08

天绘二号卫星于 2019 年 4 月发射,通过双星绕飞编队、一发多收的工作模式获取高相干性回波数据^[1],可应用于地形测绘、形变和灾害监测^[2-4]。由于辅星与主星沿飞行方向最大存在约 800 m 的距离,为了确保成像精度,辅星在成像时采用了收发分置的双基成像几何模型(bistatic imaging geometric model)^[5]。为了成像算法统

一,主星成像时也采用了双基成像几何模型。主辅星成像几何模型直接影响着 InSAR 数据处理的多个环节,包括影像概略配准、去平地效应、InSAR 定位、基线定标、区域网平差、正射纠正等。对于影像概略配准、去平地效应、InSAR 定位等环节,采用双基成像模型只是增加了算法的复杂度,而对于基线定标环节,这带来了新的挑

战:① 现有基线定标算法均针对单基几何模型^[6-18],无法直接应用到天绘二号中;② 天绘二号主辅星收发分置成像,两两组合会形成 4 条基线,在进行基线定标时,4 条基线存在相关性,导致定标精度降低,无法满足实际应用需求。

为了保证基线定标精度,必须对主辅星成像几何模型进行简化,使其转化为单基模型。对于辅星而言,通常构建等效相位中心模型,将辅星双基模型转换为自发自收模式^[19-20]。文献[21]提出了联合主辅图像信息的辅图像等效相位中心法,该方法具有无须假设地面高程、精度高等优点,但等效后改变了辅星位置,无法用于后续基线定标。文献[22]提出了基于几何构形的等效相位中心方法,不用改变辅星位置,但对定标模型改正精度分析不够充分,并且也缺乏实际数据验证。

针对天绘二号主辅星成像模型改正需求和现有改正方法存在的问题,本文提出了主辅星双基成像几何模型的改正方法。对于主星,提出了将场景起始时刻向前移动一个斜距传播时间的方法,使主星变为单基模型。对于辅星,提出了对每个点进行干涉相位补偿的方法将其变为单基模型,并对补偿精度进行了分析:① 在有地面控制点时,直接利用主辅星位置和控制点之间的距离差来计算待补偿干涉相位。② 在无地面控制点时,利用辅星接收时刻斜距、速度、主星位置之间的几何关系,直接计算待补偿的干涉相位。利用天绘二号两景试验数据进行改正精度验证,试验结果表明,主星修正前后模型完全等效,辅星修正后 InSAR 定位精度会略有下降,损失在厘米量级,能够满足后续定标需求。

1 天绘二号卫星成像几何模型

如图 1 所示,不失一般性,设主星在后,辅星在前。对于主星,在 t_1 时刻接收主星 t_0 时刻发射的信号,对于辅星,在 t_3 时刻接收主星 t_2 时刻发射信号,且 $t_3 < t_1$ 。此时主辅星成像几何模型分别由式(1)一式(4)表达^[23]

$$|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_0)| + |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_1)| = R_0 + R_1 \quad (1)$$

$$\frac{\mathbf{V}_m(t_0) \cdot [\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_0)]}{\lambda |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_0)|} +$$

$$\frac{\mathbf{V}_m(t_1) \cdot [\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_1)]}{\lambda |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_1)|} = f_{dm} \quad (2)$$

$$|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_2)| + |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_s(t_3)| = R_2 + R_3 \quad (3)$$

$$\frac{\mathbf{V}_s(t_2) \cdot [\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_2)]}{\lambda |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_2)|} + \frac{\mathbf{V}_s(t_3) \cdot [\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_s(t_3)]}{\lambda |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_s(t_3)|} = f_{ds} \quad (4)$$

式中,符号“ \cdot ”表示矢量点积; $|\cdot|$ 表示矢量的模值; $\mathbf{P}(t) = [x_t, y_t, z_t]^T$ 为地面点坐标; $\mathbf{P}_m(t_i) = [x_{t_i}^m, y_{t_i}^m, z_{t_i}^m]^T$, $\mathbf{P}_s(t_i) = [x_{t_i}^s, y_{t_i}^s, z_{t_i}^s]^T$ 分别表示主辅星在 t_i 时刻位置; $\mathbf{V}_m(t_i)$ 、 $\mathbf{V}_s(t_i)$ 表示主辅星在 t_i 时刻速度; λ 是波长; f_{dm} 、 f_{ds} 分别表示主辅星多普勒中心频率; R_0 、 R_1 、 R_2 分别是主星在 t_0 、 t_1 、 t_2 时刻到 $\mathbf{P}(t)$ 的距离; R_3 是辅星 t_3 时刻到 $\mathbf{P}(t)$ 的距离。

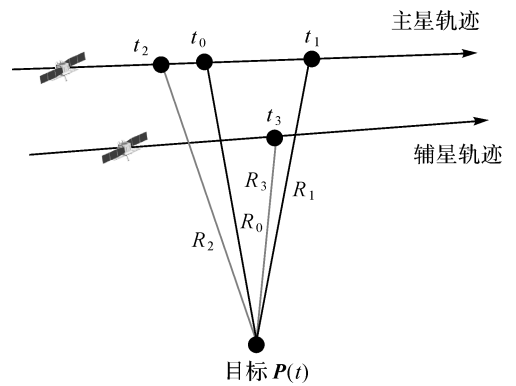


图 1 卫星成像几何

Fig.1 Satellite imaging geometry

根据干涉测量原理,式(3)可以进一步表示为^[24]

$$|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_2)| + |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_s(t_3)| = R_2 + R_3 = \left(R_0 + R_1 + \frac{\lambda \phi}{2\pi} \right) \quad (5)$$

式中, ϕ 是绝对相位。联立方程(1)、式(2)、式(5),通过迭代即可完成 $\mathbf{P}(t)$ 的求解。

2 成像几何模型修正

2.1 主星成像几何模型修正

主星成像几何模型修正的目的是将收、发统一到一时刻(设为 t_k),并使修正后的 $f_{dm} = 0$,此时 $\mathbf{P}(t)$ 与 $\mathbf{P}_m(t_k)$ 连线垂直于主星轨迹,如图 2 所示。当 $\mathbf{P}(t)$ 坐标已知时,可以根据式(6)多普勒方程,准确找到 t_k

$$\frac{\mathbf{V}_m(t_k) \cdot [\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)]}{\lambda |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)|} = \frac{f_{dm}}{2} = 0 \quad (6)$$

通过多普勒方程方法寻找 t_k 需要 $\mathbf{P}(t)$ 已知,因此无法应用到整个场景。考虑到主星收发分置,其斜距 $D_{sm} = \frac{(R_0 + R_1)}{2}$,也即 $\Delta t = t_1 -$

$t_0 = \frac{2D_{sm}}{C}$ (C 为光速), 因此可以将整个场景向前移动一个时刻, 使其满足式(6)。

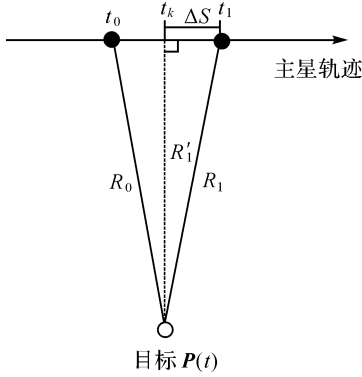


图 2 主星成像时刻

Fig.2 Master satellite imaging time

当卫星轨道高度不高时, Δt 很小。以轨道高度 514 km、速度 7.4 km/s、斜距 640 km 为例, 此时 $\Delta t = 0.0043$ s, 主星收发时刻的距离为 $0.0043 \times 7400 = 31.82$ m。考虑到修正前 $f_{dm} = 0$, 为了使方程式(2)成立, t_0, t_1 必然位于 t_k 两侧, 并且有 $R_0 \approx R_1$, 因此可以将场景成像起始时刻整体向前移动 $\frac{\Delta t}{2}$, 也即 $t_k = t_1 - \frac{\Delta t}{2}$, 此时主星成像几何模型变为单基模型, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)| &= R'_1 \\ \frac{\mathbf{V}_m(t_k) \cdot [\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)]}{\lambda |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)|} &= \frac{f_{dm}}{2} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

收发时刻进行了调整, 斜距也相应发生了变化, 需要对斜距进行修正, 其表达式为: $R'_1 = \sqrt{R_1^2 - \Delta S^2}$ 。由于 ΔS 较小, $|R'_1 - R_1| = 0.00079$ m, 这个误差可以忽略不计。

主星成像几何模型经过修正后, 式(5)需要相应变化, 变为

$$\begin{aligned} |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_2)| + |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_s(t_3)| &= \\ R_3 + R_2 &= \left(2R'_1 + \frac{\lambda\phi}{2\pi} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 辅星成像几何模型修正

在将主星修正为单基模型后, 主辅星成像几何模型如图 3 所示, 此时仍会存在 B_1 和 B_2 两条基线。对于定标而言, 两条基线之间依然相关, 无法标定。考虑到 B_2 是由于辅星收发位置不一致产生, 因此必须将其消除。

对式(8)进行变换, 考虑到 $|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_2)| =$

R_2 , 则有

$$\begin{aligned} |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_s(t_3)| &= \left(2R'_1 + \frac{\lambda\phi}{2\pi} \right) - R_2 = \\ \left(R'_1 + \frac{\lambda\phi}{2\pi} \right) + R'_1 - R_2 & \end{aligned} \quad (9)$$

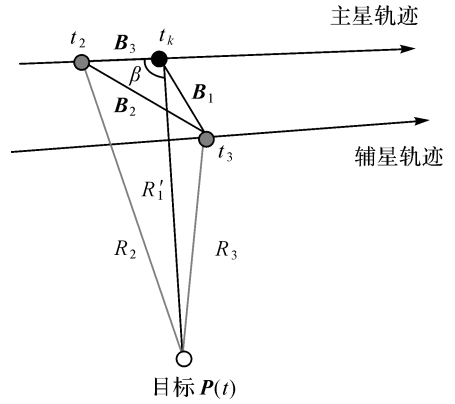


图 3 主星等效后成像几何模型

Fig.3 Equivalent imaging geometric model of master satellite

设 $R'_1 - R_2 = \Delta R = \frac{\lambda\phi_{cmp}}{2\pi}$, 那么式(9)变为

$$|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_s(t_3)| = R'_1 + \frac{\lambda(\phi + \phi_{cmp})}{2\pi} \quad (10)$$

对比式(10)与常规 InSAR 距离差方程^[24,25], 可以看出, 只需要对当前点补偿一个干涉相位 ϕ_{cmp} , 那么辅星就可以变成单基成像几何模型, 如图 4 所示。

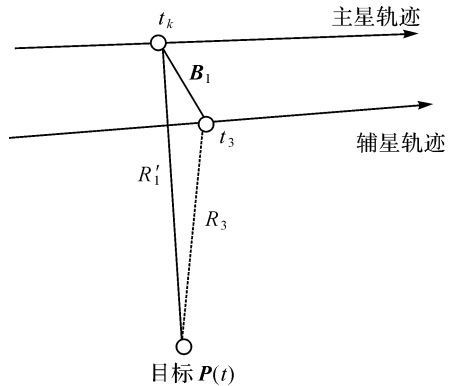


图 4 修正后辅星成像几何模型

Fig.4 Fixed imaging geometric model of slave satellite

2.2.1 控制点补偿法

当 $\mathbf{P}(t)$ 点坐标已知时, 此时 $R_2 = |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_2)|$, $R'_1 = |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)|$, 因此有

$$\phi_{cmp} = \frac{2\pi}{\lambda} (|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)| - |\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_2)|) \quad (11)$$

将 $\mathbf{P}_m(t_2)$ 写成 $\mathbf{P}_m(t_k)$ 与基线 \mathbf{B}_3 的表达式:

$$\mathbf{P}_m(t_2) = \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3, \mathbf{B}_3 = [\Delta B_x \ \Delta B_y \ \Delta B_z]^T.$$

可以看出,干涉相位的补偿精度取决于 $x_t, y_t, z_t, x_{t_k}^m, y_{t_k}^m, z_{t_k}^m, \Delta B_x, \Delta B_y, \Delta B_z$ 的精度,下面分析控制点补偿法引入的干涉相位误差。

$$k_{x_t} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial x_t} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_t - x_{t_k}^m}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)|} - \frac{x_t - x_{t_k}^m - \Delta B_x}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3|} \right) \quad (12)$$

$$k_{y_t} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial y_t} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{y_t - y_{t_k}^m}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)|} - \frac{y_t - y_{t_k}^m - \Delta B_y}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3|} \right) \quad (13)$$

$$k_{z_t} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial z_t} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{z_t - z_{t_k}^m}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)|} - \frac{z_t - z_{t_k}^m - \Delta B_z}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3|} \right) \quad (14)$$

$$k_{x_{t_k}^m} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial x_{t_k}^m} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_{t_k}^m - x_t}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)|} - \frac{x_{t_k}^m + \Delta B_x - x_t}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3|} \right) \quad (15)$$

$$k_{y_{t_k}^m} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial y_{t_k}^m} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{y_{t_k}^m - y_t}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)|} - \frac{y_{t_k}^m + \Delta B_y - y_t}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3|} \right) \quad (16)$$

$$k_{z_{t_k}^m} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial z_{t_k}^m} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{z_{t_k}^m - z_t}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k)|} - \frac{z_{t_k}^m + \Delta B_z - z_t}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3|} \right) \quad (17)$$

$$k_{\Delta B_x} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial \Delta B_x} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_{t_k}^m + \Delta B_x - x_t}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3|} \right) \quad (18)$$

$$k_{\Delta B_y} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial \Delta B_y} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{y_{t_k}^m + \Delta B_y - y_t}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3|} \right) \quad (19)$$

$$k_{\Delta B_z} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial \Delta B_z} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{z_{t_k}^m + \Delta B_z - z_t}{|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{B}_3|} \right) \quad (20)$$

由于各项误差独立,总的干涉相位误差可表示为各项误差平方和开方。控制点三轴误差不大于 ± 5 cm、轨道三轴误差不大于 ± 3 cm^[25]。在编队条件下,主辅星沿飞行方向位置在发生变化,为

了确保空间同步精度,对地观测时其变化范围控制在 $[-800 \text{ m}, 800 \text{ m}]$,因此 \mathbf{B}_3 模值变化范围也在 $[-800 \text{ m}, 800 \text{ m}]$ 。考虑到 \mathbf{B}_3 是主星同一轨道不同时刻位置之差,而位置通过速度积分而来,利用 GNSS 进行速度测量,速度三轴误差 $\leq 2 \text{ mm/s}$ ^[26],因此 \mathbf{B}_3 的误差与其模值有关,表达式为 $d\mathbf{B}_3 = dV \frac{|\mathbf{B}_3|}{|\mathbf{V}|}$,其中 dV 是速度三轴误差。图 5 给出了方位向基线变化在 $0 \sim 800 \text{ m}$ 情况下,控制点法补偿引入的干涉相位误差。

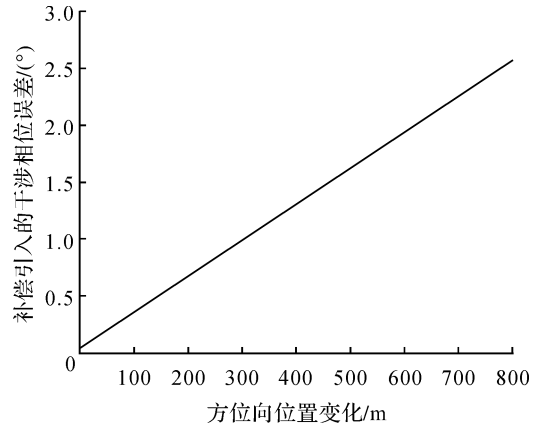


图 5 补偿引入的干涉相位误差

Fig. 5 Compensation for the interferometric phase error introduced

由图 5 可以看出,利用控制点进行修正引入的干涉相位误差与方位向基线长度基本成正比,方位向基线越长,补偿引入的误差越大。最大误差为 2.7° 左右,按照高程模糊度 30 m 计算,引起的高程误差为 0.22 m ,基本可以忽略不计。

2.2.2 几何关系补偿法

设 $\mathbf{B}_3 = \mathbf{P}_m(t_2) - \mathbf{P}_m(t_k)$,根据三角定律,可得

$$R_2 = \sqrt{(R'_1)^2 + |\mathbf{B}_3|^2 - 2R'_1 |\mathbf{B}_3| \cos \beta} \quad (21)$$

式中, β 是矢量 \mathbf{B}_3 和矢量 \mathbf{R}'_1 夹角。

当 t_2 与 t_k 时刻较近时,可以认为 $\mathbf{P}_m(t_k)$ 与 $\mathbf{P}_m(t_2)$ 的连线与速度 $\mathbf{V}(t_k)$ 的方向相同,而根据式(7)可知

$$\cos(\pi - \beta) = -\cos \beta \approx \frac{\lambda f_{\text{dm}}}{2|\mathbf{V}_m(t_k)|} \quad (22)$$

此时,式(11)可变为

$$\phi_{\text{cmp}} = \frac{2\pi}{\lambda} (R'_1 - R_2) = \left(R'_1 - \sqrt{(R'_1)^2 + |\mathbf{B}_3|^2 + R'_1 |\mathbf{B}_3| \frac{\lambda f_{\text{dm}}}{2|\mathbf{V}_m(t_k)|}} \right) \quad (23)$$

需要指出的是,利用多普勒方程来求解 β 的前提是 t_2 与 t_k 时刻较近。当 t_2 与 t_k 时刻较远时,利用多普勒方程计算出的夹角和实际夹角有一个差异。经过对在轨实际数据的统计,两个角度差异最大可达 0.002° 。

影响 ϕ_{cmp} 的主要误差源有斜距误差 m_R 、基线 B_3 模值测量误差 $m_{|B_3|}$ 、速度模值误差 $m_{|V_m|}$,各误差对 ϕ_{cmp} 的误差传递系数如下

$$k_R = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial R'_1} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(1 - \frac{2R'_1 + |B_3| \frac{\lambda f_{\text{dm}}}{|V_m(t_k)|}}{2\sqrt{(R'_1)^2 + |B_3|^2 + R'_1 |B_3| \frac{\lambda f_{\text{dm}}}{|V_m(t_k)|}}} \right) \quad (24)$$

$$k_B = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial B_3} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(- \frac{2|B_3| + R'_1 \frac{\lambda f_{\text{dm}}}{|V_m(t_k)|}}{2\sqrt{(R'_1)^2 + |B_3|^2 + R'_1 |B_3| \frac{\lambda f_{\text{dm}}}{|V_m(t_k)|}}} \right) \quad (25)$$

$$k_{|V_m|} = \frac{\partial \phi_{\text{cmp}}}{\partial |V_m|} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{R'_1 |B_3| \frac{\lambda f_{\text{dm}}}{|V_m(t_k)|^2}}{2\sqrt{(R'_1)^2 + |B_3|^2 + R'_1 |B_3| \frac{\lambda f_{\text{dm}}}{|V_m(t_k)|}}} \right) \quad (26)$$

轨道高度为 514 km、速度为 7.4 km/s、斜距为 640 km、速度精度为 0.002 m/s(三轴)、斜距误差 m_R 为 1 m, B_3 基线模值变化范围为 $[-800 \text{ m}, 800 \text{ m}]$ 。与 2.2.1 节一样, $m_{|B_3|}$ 误差与方位向基线变化相关,补偿引入的干涉相位误差 m_ϕ 与方位向基线 B_3 之间的关系如图 6 所示。可以看出,该方法引起的误差较控制点补偿法小,但这是没有考虑 β 角近似的情况。以 β 角近似引起 $0.000 01^\circ$ 误差为例,在 B_3 变化范围为 $[-800 \text{ m}, 800 \text{ m}]$ 时,引起的干涉相位最大误差为 1.6° 。因此如果考虑 β 角近似引起的误差,那么该方法引起的误差大于控制点补偿法。

3 试 验

3.1 试验数据介绍

为了验证本文方法的有效性,利用两景天绘二号卫星数据进行试验。场景 1 地点为河北赤诚,

获取时间为 2019 年 9 月 26 日,入射角为 41.19° 、斜距为 701.33 km、影像采样间隔为 $2.027 \times 0.936 \text{ m}$ (方位向 \times 距离向)、高程模糊度为 27.09 m,共布设了 9 个控制点,一景内主辅星沿方位向距离变化范围在 110~130 m 之间,原始影像、概略覆盖范围分别如图 7(a)、(b) 所示。场景 2 地点为新疆哈密,获取时间为 2019 年 9 月 26 日,入射角为 34.16° 、斜距为 626.15 km、影像采样间隔为 $1.53 \times 0.936 \text{ m}$ (方位向 \times 距离向),高程模糊度为 20.54 m,共布设了 7 个控制点,一景内主辅星沿方位向距离变化范围在 86~91 m 之间,原始影像和概略覆盖范围分别如图 7(c)、(d) 所示。

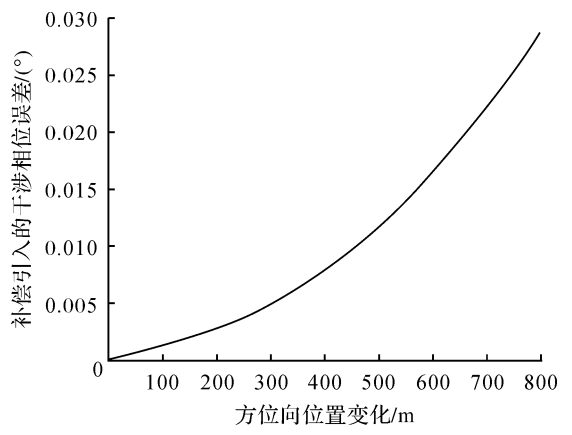


图 6 补偿引入的干涉相位误差

Fig.6 Compensation for the interferometric phase error introduced

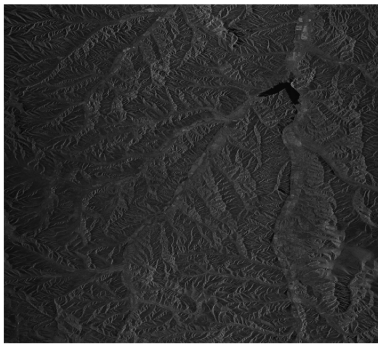
3.2 主星成像几何模型修正精度

评价主星成像几何模型修正精度方法是比较修正前后多普勒方程的残差,修正前后分别利用式(2)、式(7)计算,表 1 给出了比较结果和最终统计均值。

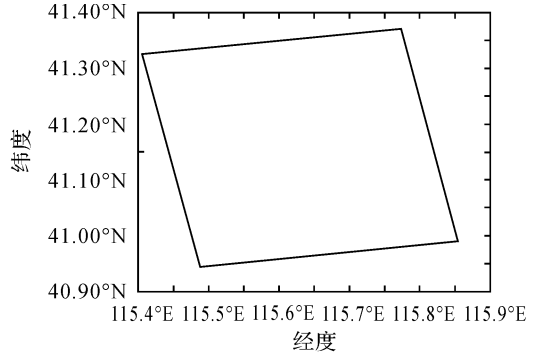
表 1 主星成像几何模型修正精度对比

Tab.1 Accuracy comparison of master satellite imaging geometric model between origin and modification

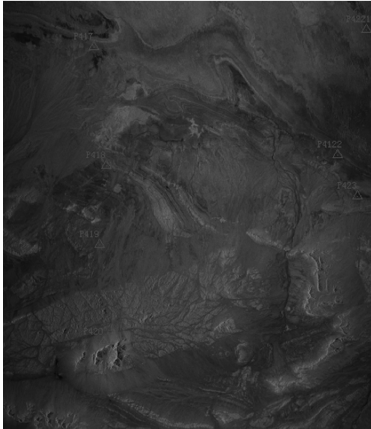
			Hz		
场景 1			场景 2		
点名	修正前	修正后	点名	修正前	修正后
CCA1	0.490	0.490	P4221	0.480	0.480
CCA2	0.497	0.497	P4122	0.487	0.487
CCA3	0.475	0.475	P417	0.196	0.196
CCA4	0.497	0.497	P418	0.250	0.250
CCB2	0.605	0.605	P419	0.243	0.243
CCC1	0.616	0.616	P420	0.188	0.188
CCC2	0.639	0.639	P423	0.491	0.491
CCC3	0.670	0.670	均值	0.33	0.33
CCC4	0.681	0.681			
均值	0.58	0.58			



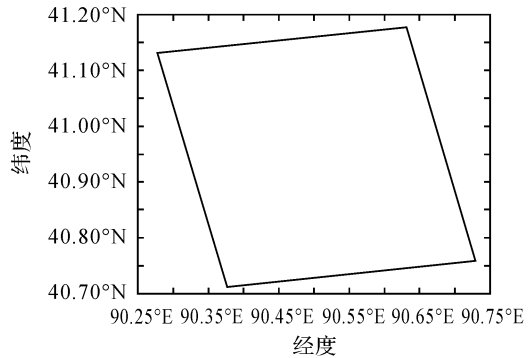
(a) 河北赤诚原始影像



(b) 概略覆盖范围



(c) 新疆哈密原始影像



(d) 概略覆盖范围

图7 试验数据

Fig.7 Experimental data

由表1可以看出,无论是场景1还是场景2,修正后多普勒方程残差与修正前完全相同,在0值附近,说明本文提出主星成像几何模型修正后与原方程等效,没有引入新误差。

3.3 辅星成像几何模型修正精度

评价辅星成像几何模型修正精度方法是比较修正前与修正后控制点 InSAR 测量坐标之差,即

联立式(1)一式(3)求解每个控制点修正前坐标,再联立式(1)、式(2)、式(10)求解修正后坐标,然后计算修正前后坐标之差。由于比较的是修正前后控制点 InSAR 测量坐标之差,而不是比较 InSAR 测量坐标与控制点外业测量坐标之差,因此在修正模型精度高的情况下,其差值很小(表2)。

表2 辅星成像几何模型修正前后定位精度

Tab.2 Accuracy comparison of slave satellite imaging geometric model between origin and modification m

点名	场景1						点名	场景2					
	控制点补偿法			几何关系补偿法				控制点补偿法			几何关系补偿法		
	高斯北	高斯东	高度	高斯北	高斯东	高度		高斯北	高斯东	高度	高斯北	高斯东	高度
CCA1	0.035	0.011	-0.032	-0.063	0.015	0.066	P4221	0.031	0.017	-0.029	0.015	0.013	-0.021
CCA2	-0.026	0.012	0.022	0.065	0.022	-0.067	P4122	-0.039	0.007	0.031	-0.022	0.011	0.025
CCA3	0.036	0.015	-0.031	0.067	0.023	-0.068	P417	-0.029	0.014	0.025	-0.008	0.008	0.013
CCA4	0.041	0.009	-0.039	-0.064	0.017	0.065	P418	0.028	0.009	-0.027	-0.013	0.015	0.023
CCB2	-0.027	0.012	0.021	-0.053	0.024	0.059	P419	0.034	0.013	-0.033	0.012	0.012	-0.018
CCC1	0.029	0.017	-0.026	-0.062	0.013	0.063	P420	-0.033	0.015	0.031	0.009	0.014	-0.012
CCC2	0.036	0.013	-0.031	0.061	0.031	-0.065	P423	0.026	0.012	0.025	-0.015	0.017	0.021
CCC3	-0.028	0.007	0.026	0.066	0.029	-0.069	中误差	0.031	0.012	0.028	0.014	0.013	0.020
CCC4	0.038	0.018	-0.034	0.057	0.016	-0.060							
中误差	0.035	0.0013	0.029	0.062	0.021	0.064							

采用控制点法进行补偿,根据主辅星一景内沿方位向距离的变化,计算出理论上引起的干涉相位误差最大分别为 0.5° 、 0.4° ,再根据各自景的高程模糊度,计算出理论上对应高程误差为 0.037 、 0.023 m,而实际处理结果分别为 0.029 、 0.028 m,与 2.2 节理论分析吻合,说明了方法的有效性。采用几何关系法进行补偿,如果只看图 6,引起的干涉相位误差量级在 0.001° ,等效前后应该相等。但在 2.2.2 节也指出,该方法利用多普勒方程计算出的夹角 β 和实际夹角有一个差异,对两个场景所有控制点 β 角进行统计,场景 1 和场景 2 的夹角差异的均值分别为 $0.000\ 035^\circ$ 、 $0.000\ 011^\circ$,由于 β 角近似引入的干涉相位误差分别为 0.9° 和 0.31° ,对应高程误差分别为 0.066 、 0.21 m,控制点实际处理结果分别为 0.064 和 0.020 m,也说明了本文方法的有效性。

由表 2 还可以看出,无论哪种方法,其补偿引起的误差与地形关系不大。采用控制点补偿法,补偿结果较为稳定,其精度主要取决于轨道、控制点和速度精度,而几何关系补偿法主要取决于夹角 β 近似引起的误差。需要指出的是,辅星是通过逐点补偿干涉相位来进行模型修正,由式(11)、式(21)可知,补偿的干涉相位与主星位置、基线三轴分量、主星斜距等因素相关,每个点的补偿结果不一样,当前场景的补偿结果无法应用到下一场景。对于基线定标,场景中会布设高精度控制点,此时两种补偿方法都可使用,但控制点法精度更高;对于其他应用如区域网平差,场景中只有少量控制点甚至没有控制点,此时可以采用几何关系法对每景数据进行补偿。

4 结 语

天绘二号卫星主辅星均采用双基成像几何模型,对于后续基线定标带来困难。为了简化定位模型,保证基线定标的精度,本文提出了主辅星成像几何模型修正方法,并从理论上分析了修正精度。修正后,主辅星成像几何模型均变为单基成像几何模型。利用天绘二号两景数据对修正精度进行了试验,试验结果表明,主星修正后与修正前完全等价,辅星修正后系统定位精度有所下降,下降在厘米量级,基本可忽略不计。利用修正后的成像几何模型进行基线定标,定标后绝对平面和高程精度分别提升了 34% 和 44% 。

参考文献:

- [1] 楼良盛,刘志铭,张昊,等.天绘二号卫星工程设计与实现[J].测绘学报,2020,49(10):1252-1264. DOI:10.11947/j. AGCS.2020.20200175.
LOU Liangsheng, LIU Zhiming, ZHANG Hao, et al. TH-2 satellite engineering design and implementation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(10): 1252-1264. DOI:10.11947/j. AGCS.2020.20200175.
- [2] 张勤,黄关文,杨成生.地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J].测绘学报,2017,46(10):1300-1307. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170453.
ZHANG Qin, HUANG Guanwen, YANG Chengsheng. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1300-1307. DOI: 10. 11947/j. AGCS.2017.20170453.
- [3] 朱建军,李志伟,胡俊.InSAR 变形监测方法与研究进展 [J].测绘学报,2017,46(10):1717-1733. DOI:10.11947/j. AGCS.2017.20170350.
ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717- 1733. DOI:10.11947/j. AGCS.2017.20170350.
- [4] LI Zhenhong, YU Chen, XIAO Ruya, et al. Entering a new era of InSAR: advanced techniques and emerging applications[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2022, 5(1): 1-4.
- [5] 仇晓兰,丁赤彪,胡东辉.双站 SAR 成像处理技术[M].北京:科学出版社,2010.
QIU Xiaolan, DING Chibiao, HU Donghui. Bistatic SAR imaging processing technology [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [6] 李品. InSAR 系统的定标方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2008.
LI Pin. Research on calibration method for InSAR system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [7] GONZÁLEZ 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.
- [8] GONZÁLEZ J H, ANTONY J M W, BACHMANN M, et al. Bistatic system and baseline calibration in TanDEM-X to ensure the global digital elevation model quality[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 73:3-11.
- [9] BACHMANN M, GONZÁLEZ J H, KRIEGER G, et al. Calibration of the bistatic TanDEM-X interferometer[C]// Proceedings of the 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Nuremberg, Germany: VDE, 2012: 97-100.

- [10] ANTONYJ W, GONZALEZJ 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): 1495-1501.
- [11] 楼良盛, 刘志铭, 李崇伟. 卫星编队 InSAR 基线的确定方法[J]. 遥感信息, 2013, 28(2): 9-11, 23.
LOU Liangsheng, LIU Zhiming, LI Chongwei. Technique of determining baseline for InSAR based on formation-flying satellites[J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(2): 9-11, 23.
- [12] 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.
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.
- [13] 陈刚. 分布式 InSAR 干涉定标关键技术研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2014.
CHEN Gang. Research on key technologies of interferometric calibration of distributed InSAR[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2014.
- [14] 陈刚, 钱方明, 楼良盛. 分布式 InSAR 基线定标算法[J]. 测绘科学与工程, 2016(4): 27-32, 43.
CHEN Gang, QIAN Fangming, LOU Liangsheng. Baseline calibration algorithm for distributed InSAR[J]. Geomatic Science and Engineering, 2016(4): 27-32, 43.
- [15] ZHAO Shuyuan, GU Defeng, YI Bin, et al. Error analysis for the baseline estimation and calibration of distributed InSAR satellites[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China: IEEE, 2016: 4179-4182.
- [16] 吴丹芹. 机载/星载 InSAR 定标模型与方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
WU Danqin. Modeling and methodology for airborne and spaceborne InSAR calibration[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [17] 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.
QIAN Fangming, JIANG Ting, LOU Liangsheng, et al. A new method of spaceborne distributed InSAR baseline calibration[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(1): 126-133.
- [18] 钱方明. 微波干涉测绘卫星干涉定标关键技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2020.
QIAN Fangming. Research on key technologies of interferometric calibration for microwave interferometric surveying and mapping satellites [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2020.
- [19] 易予生, 张林让, 刘昕, 等. 双站 SAR 图像几何失真校正方法研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(2): 231-234.
YI Yusheng, ZHANG Linrang, LIU Xin, et al. Method for geometric distortion correction of the bistatic SAR[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(2): 231-234.
- [20] 黄海风, 梁甸农. 一种新的星载双站 SAR 斜视等效距离模型[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2209-2212.
HUANG Haifeng, LIANG Diannong. A new effective squint range model of spaceborne bistatic SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2209-2212.
- [21] 刘艳阳, 李真芳, 杨娟娟, 等. 分布式卫星 InSAR 目标定位近似闭式解[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(4): 87-93.
LIU Yanyang, LI Zhenfang, YANG Juanjuan, et al. Quasi-closed-form solution for distributed satellites InSAR geolocation[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(4): 87-93.
- [22] 陈刚. 一种新的分布式 InSAR 卫星等效相位中心模型[J]. 测绘科学与工程, 2013(6): 29-33.
CHEN Gang. A new equivalent phase center model of distributed spaceborne InSAR[J]. Geomatic Science and Engineering, 2013(6): 29-33.
- [23] 孙亚飞, 江利明, 柳林, 等. TanDEM-X 双站 InSAR 地形提取及精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 100-105.
SUN Yafei, JIANG Liming, LIU Lin, et al. Generating and evaluating digital terrain model with TanDEM-X bistatic SAR interferometry[J]. Geomatics and information Science of Wuhan University, 2016, 41(1): 100-105.
- [24] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi. Interferometric measurement of spaceborne synthetic aperture radar[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [25] TANG Xinming, LI Tao, GAO Xiaoming, et al. Research on key technologies of precise InSAR surveying and mapping applications using automatic SAR imaging [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2019, 2(2): 27-37. DOI: 10.11947/j.JGGS.2019.0204.
- [26] 秦显平, 钱方明, 楼良盛. 天绘二号卫星相对定轨初步结果[J]. 测绘科学与工程, 2021(1): 10-14.
QIN Xianping, QIAN Fangming, LOU Liangsheng. Preliminary results of the relative orbit determination of Tianhui-2 satellite [J]. Geomatics Science and Engineering, 2021(1): 10-14.

(责任编辑: 陈品馨)

收稿日期: 2021-06-15

修回日期: 2022-10-31

第一作者简介: 陈刚(1976—), 男, 研究员, 研究方向为 InSAR 数据处理及干涉定标。

First author: CHEN Gang(1976—), male, research fellow, majors in data process of InSAR and interferometry calibration.

E-mail: splitter_ch@163.com