

文章编号: 1007-4619(2006)02-0221-06

考虑基线去相关的编队 InSAR 测高精度分析

黄海风, 梁甸农

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 针对主星带辅星群编队 InSAR 的双站、斜视、空间基线等特点, 首先建立绝对测高误差与相对测高误差模型; 重点分析了基线去相关对干涉相位误差的影响; 对干涉车轮和钟摆编队的测高性能、对测高精度与基线矢量的关系进行仿真分析; 其次与两种经典近似几何关系下的测高精度分析进行对比。仿真结果表明: 干涉测高精度必须考虑基线去相关的影响; 相对测高精度明显优于绝对测高精度; 经典近似几何给分析测高精度带来很大误差。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 编队飞行; 分布式卫星; 测高精度

中图分类号: TP722.6 文献标识码: A

DEM Accuracy Analysis of Formation InSAR Considering Baseline Decorrelation

HUANG Hai-feng LIANG Dian-nong

(College of Electric Science and Engineering, NUDT, Hunan Changsha 410073, China)

Abstract Based on bistatic squint and spatial baseline characteristics of spaceborne parasitical interferometric synthetic aperture radar (InSAR), models of absolute and relative digital elevation model (DEM) errors are set up. The influence of baseline decorrelation imposing on interferometric phase error is analyzed in detail which is an important influence of DEM error. The absolute and relative DEM performance of interferometric Cartwheel and Pendulum are simulated. The relation of absolute and relative DEM accuracy with baseline vector are simulated too. Two classical approximate geometries including side-glance and identical range-elevation plane geometries are analyzed. The absolute and relative DEM accuracy of them are compared with those of actual geometry. The simulation results show that baseline decorrelation must be considered in DEM accuracy analysis of spaceborne parasitical InSAR. relative DEM accuracy value is prior to absolute DEM accuracy value. the classical approximate geometry bring great errors which cannot be neglected.

Key words interferometric synthetic aperture radar; formation flying; distributed satellite; DEM accuracy

1 引 言

分布式卫星 SAR 是目前提出的一种全新雷达概念系统, 是国际上研究的热点问题之一。主星带辅星群编队干涉 SAR 是星载分布式 SAR 的一种, 它的空间几何关系如图 1 所示, 一个编队小卫星群 (图中以两颗小卫星 S_1 , S_2 代表) 伴随大卫星 S 飞行, 编队构形大小远小于它到大卫星及目标的距离。主星发射雷达脉

冲, 经地面反射, 被小卫星群接收。主星对目标 T 正侧视, 辅星斜视, 辅星间形成空间基线, 这些特点与正侧视情况 (图 2) 完全不同, 因此必须采用新的干涉测高公式和精度分析方法。目前国内外公开文献或是基于传统正侧视干涉 SAR 测高方法进行分析^[1-3], 或是虽考虑了这些特点, 但未考虑空间基线去相关性对测高的影响^[4], 因此都与实际情况不符。

本文首先基于主星带辅星群编队 InSAR 的斜视、双站、空间基线的特点, 简要推导了绝对高程和

收稿日期: 2004-11-16; 修订日期: 2005-03-22

作者简介: 黄海风 (1976—), 男, 国防科技大学信息与通信工程专业 2002 级博士生, 主要研究方向为干涉 SAR、分布式 SAR 系统理论

等, 已发表论文 9 篇。

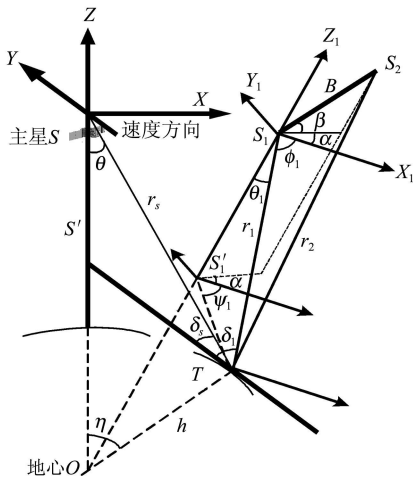


图 1 主星带辅星编队飞行 InSAR 几何关系
Fig 1 Spaceborne parasitical InSAR geometry

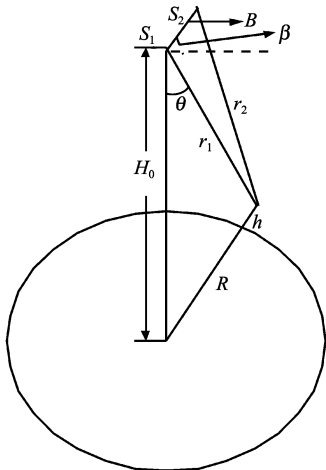


图 2 经典 InSAR 几何关系
Fig 2 Classical geometry of InSAR

相对高程误差的表达式;其次重点分析空间基线去相关对干涉相位误差的影响,完善了测高误差公式,得到距离向和方位向临界基线的计算公式;再次仿真分析比较干涉车轮和钟摆编队构形的测高性能,分析测高精度与基线矢量的关系,得出最优基线的计算公式;分析两种经典近似情形下的测高精度公式,并进行仿真比较;最后是结论。本文的研究结果对于主星带辅星群 InSAR 编队设计具有指导意义。

2 测高精度分析

2.1 高程误差模型

对于一般编队 InSAR 绝对测高几何测量误差的分析,文献 [4] 已给出详细结果,简要说明如下。

如图 1 所示,在 S_1 轨道坐标系下, S_2 点的坐标为 $B = (B \sin \beta, B \cos \beta \cos \alpha, B \cos \beta \sin \alpha)$, B 为基线长度, (α, β) 为基线姿态角, 散射点 T 坐标为 $r_1 = (-r_1 \cos \theta_1, r_1 \sin \theta_1 \cos \psi_1, -r_1 \sin \theta_1 \sin \psi_1)$, θ_1 为 S_1 下视角, ψ_1 为方位角, T 与 S_2 的距离 $r_2 = |B - r_1|$, 干涉相位 $\Delta \phi$ 与波程差 Δr 的关系为 $\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon - r_1)$, T 的地心距 $h = \sqrt{H_0^2 + r_1^2 - 2H_0 r_1 \cos \theta_1}$ 。得到地心距 h (绝对高程) 与 7 个参数: S_1 地心距 H_0 、 T 与 S_1 间的距离 r_1 、基线长度 B 、基线方位角 α 、基线高低角 β 、 S_1 天线的距离-高度平面与轨道面之间的二面角 ψ_1 , 以及干涉相位 $\Delta \phi$ 之间的函数关系:

$$h = \sqrt{H_0^2 + r_1^2 - 2H_0 r_1 \cos \left[\gamma(\alpha, \beta, \psi_1) - \arcsin \left(\frac{\lambda \Delta \phi}{2\pi \sqrt{A(\alpha, \beta, \psi_1) B}} \right) \right]} \quad (1)$$

式中, $\text{tg}[\gamma(\alpha, \beta, \psi_1)] = \frac{\text{tg} \beta}{\cos(\alpha + \psi_1)}$ 和 $A(\alpha, \beta, \psi_1) = \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2(\alpha + \psi_1)$ 。

由 (1) 式可以得到各参数误差的传递系数 (在此从略), 从而求得绝对高程误差的均方差与各参数均方差的关系如下:

$$\sigma_h = \sqrt{(\sigma_{H_0})^2 + (\sigma_{r_1})^2 + (\sigma_B)^2 + (\sigma_\alpha)^2 + (\sigma_\beta)^2 + (\sigma_{\psi_1})^2 + (\sigma_{\Delta \phi})^2} \quad (2)$$

对小块成像区域来说, 除干涉相位误差 $\Delta \phi_\epsilon$ 外, 其他误差都是公共误差, 因此相对高程误差 Γ_ϵ 仅由 $\Delta \phi_\epsilon$ 决定:

$$\Gamma_\epsilon = \frac{\partial h}{\partial \Delta \phi} \Delta \phi_\epsilon \quad (3)$$

同理有高程误差均方差与干涉相位误差均方差的关系如下:

$$\sigma_h = |\sigma_{\Delta \phi}| \quad (4)$$

对于一个各系统参数已经确定的系统, 可由实际各测量误差估计测高可获得的精度。在式 (2) 中除了干涉相位误差, 其他误差均属于几何测量误差。文献 [4] 在分析测高误差时将各参数测量误差值设为定值, 这与实际不符。实际上, 干涉相位误差 $\Delta \phi_\epsilon$ 与基线去相关有关, 必须考虑干涉相位误差 $\Delta \phi_\epsilon$ 与基线矢量的关系 [5]。

2.2 干涉相位误差受空间基线影响的分析

干涉相位误差与两个通道信号相关系数 γ 的关系是 [3]

$$\Delta \phi_\epsilon = \sqrt{(1 - \gamma^2) / 2\gamma^2} \quad (5)$$

若不考虑体散射去相关的影响^[2],有

$$\gamma = \gamma_{\text{spatial}} / (1 + \text{SNR}^{-1}) \quad (6)$$

式中, SNR 为信噪比, γ_{spatial} 为仅考虑空间基线去相关后的相关系数, 以下重点分析 γ_{spatial} 受基线长度和姿态角的影响。

如图 1, 目标 T 位于主星 S 的距离-高度平面内 (OST 平面)。双站 SAR 成像过程中, 目标在雷达不同方位上的回波, 经方位向聚焦后压缩到该距离-高度平面上, 地面位置以 (x y) 描述: x 对应方位向, 即沿航迹方向; y 对应距离向, 即沿主星天线垂直地面的主平面 (距离-高度平面) 在地面的交线方向。图像的两维为 (x r), 双站 SAR 图像信号模型为:

$$f(x, r) = \iint \sigma(x', y') \exp\left\{-j2\pi \frac{r_s(y') + r_l(y')}{\lambda}\right\} \times \exp\left\{j\pi \frac{f_{lc} + f_{lcl}}{V} (x - x')\right\} \times \sin\left\{\pi \frac{r - [r_s(y') + r_l(y')]/c}{2\rho_r}\right\} \times \sin\left\{\pi \frac{x - x'}{\rho_x}\right\} dx' dy' \quad (7)$$

式中, $\sigma(x', y')$ 为点目标的雷达散射截面积; $r_s(y')$ 、 $r_l(y')$ 分别是 (x', y') 所在距离高度平面内, (x', y') 与主星、小卫星的斜距; $(f_{lc} + f_{lcl})/2$ 为双站 SAR 对应的多普勒中心频率; f_{lc} 是主星多普勒中心频率; f_{lcl} 是辅星若为完整发射接收雷达时的多普勒中心频率, $\rho_r = c/(2B_w)$, 代表在主星斜距分辨率; B_w 为发射信号带宽; $\rho_x = V/B_d$, B_d 为多普勒带宽。现考虑以 (x_0, y_0) 为中心的一小块地面区域的雷达图像。小块区域内附近点在自身所在距离高度平面内到主星、小卫星的斜距可近似表示为:

$$r(y') = r(y_0) + u' \cos\delta_s, \quad r_l(y') = r_l(y_0) + u' \cos\delta_l$$

式中, $u' = y' - y_0$, δ_s 、 δ_l 分别为主星雷达、小卫星雷达视线方向与 (x_0, y_0) 所在距离线方向的夹角。则 (7) 式变为

$$f'(x, u) = \exp\left\{-j2\pi \frac{r(y_0) + r_l(y_0)}{\lambda}\right\} \times \left\{ \sigma(x, u) \exp\left\{-j2\pi \frac{\sin\theta + \cos\delta_l}{\lambda} u\right\} \right\} \otimes_{x, u} \times \left\{ \exp\left\{j\pi \frac{f_{lc} + f_{lcl}}{V} x\right\} \sin\left\{\pi \frac{u}{\rho_r}\right\} \sin\left\{\pi \frac{x}{\rho_x}\right\} \right\} \quad (8)$$

式中, $\rho_y = 2\rho_r / (\sin\theta + \cos\delta_l)$, 是双站 SAR 系统的地距分辨率。将 (8) 式变换到二维波数域, 有

$$G(k_x, k_u) = \exp\left\{-j2\pi \frac{r(y_0) + r_l(y_0)}{\lambda}\right\} \times$$

$$\Sigma\left[k_x, k_u + 2\pi \frac{\sin\theta + \cos\delta_l}{\lambda}\right] \text{rect}\left[\frac{k_u}{\rho_{k_u}}\right] \times \text{rect}\left[\frac{k_x - \pi(f_{lc} + f_{lcl})/\lambda}{\rho_{k_x}}\right] \quad (9)$$

式中, $\Sigma(k_x, k_u)$ 是 $\sigma(x, u)$ 的傅里叶变换, $\rho_{k_u} = 2\pi/\rho_y$, $\rho_{k_x} = 2\pi/\rho_x$ 。上式说明由主星和辅星 1 组成的双站 SAR 图像截取了地面后向散射系数频谱的一部分:

$$\text{距离向} \left[2\pi \left(\frac{\sin\theta + \cos\delta_l}{\lambda} - \frac{1}{2\rho_r} \right), 2\pi \left(\frac{\sin\theta + \cos\delta_l}{\lambda} + \frac{1}{2\rho_r} \right) \right],$$

$$\text{方位向} \left[\frac{\pi}{V} (f_{lc} + f_{lcl}) + \frac{\pi}{\rho_x}, \frac{\pi}{V} (f_{lc} + f_{lcl}) + \frac{\pi}{\rho_x} \right]$$

对于由主星和辅星 2 组成的双站 SAR 图像也有上述结论, 假设辅星 1 和 2 的地距分辨率近似相等, 则二者的距离向频谱偏移和方位向频谱偏移分别为:

$$\Delta k_u = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos\delta_1 - \cos\delta_2) = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \Delta\delta \quad (10)$$

$$\Delta k_x = \frac{\pi}{V} (f_{lcl1} - f_{lcl2}) = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \Delta\varphi \quad (11)$$

式中, φ_1 、 φ_2 分别为辅星 1、2 的圆锥角 (图 1)。式 (10) 中 δ_1 和 δ_2 不在同一平面, 因此 $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$ 是对正侧视相干角概念的扩展。由式 (10) 和式 (11) 可得两个通道信号的相关系数:

$$\gamma_{\text{spatial}} = \gamma_u \times \gamma_x = \left[1 - \frac{\Delta k_u}{2\pi/\rho_y} \right] \times \left[1 - \frac{\Delta k_x}{2\pi/\rho_x} \right] = \left[1 - \rho_y \sin\frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \Delta\delta / \lambda \right] \times \left[1 - \rho_x \sin\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \Delta\varphi / \lambda \right] \quad (12)$$

假设主星、辅星 1 和 2 的距离高度平面基本重合, 得到相关系数近似表达式:

$$\gamma_{\text{spatial}} \approx [1 - \rho_y \cos\theta_c \Delta\theta / \lambda] \times [1 - \rho_x \sin\varphi_c \Delta\varphi / \lambda] \approx \left[1 - \frac{\rho_y B_{\perp}^r}{\lambda} \cos\theta_c \right] \times \left[1 - \frac{\rho_x B_{\perp}^s}{\lambda} \sin\varphi_c \right] \quad (13)$$

式中, B_{\perp}^r 为空间基线在辅星距离高度平面上的投影在视线垂线方向上的分量, 称为距离向有效垂直基线, B_{\perp}^s 为空间基线在水平面上的投影在水平视线垂线方向上的分量, 称为方位向有效垂直基线, $\theta_c = (\theta_1 + \theta_2)/2$, $\varphi_c = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$ 。当 $\gamma_{\text{spatial}} = 0$ 时, 此时对应的距离向和方位向临界基线分别为:

$$B_{\perp c}^r = \lambda r / (\rho_y \cos\theta_c) \text{ 和 } B_{\perp c}^s = \lambda r / (\rho_x \sin\varphi_c) \quad (14)$$

从以上分析可知: 与传统正侧视干涉几何类似, 相干角是基线去相关的本质, 与航高无关, 基线是

表现量,它对相关性的影响与航高有密切关系。距离向和方位向基线同时影响干涉的相关性,各自有效基线越长,相关性越弱,当任一基线达到临界值时,相关性为零,干涉相位无法获取,测高误差无穷大。

2 3 仿真分析

以 Envisat 为例,参数见表 1,以干涉车轮和钟摆编队构形为例,对测高精度进行仿真分析。

表 1 Envisat 及其星载 ASAR 系统主要参数

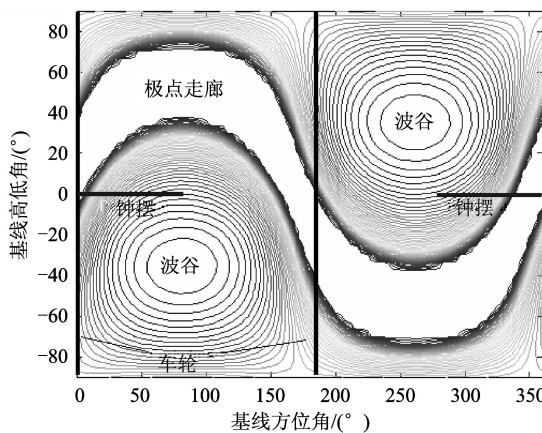
Table 1 Parameters of Envisat and ASAR

| 系统卫星参数 | | 系统雷达参数 | |
|---------|------------|-----------------|--------|
| 卫星轨道半长轴 | 7162.977km | 发射信号波长 | 5.6cm |
| 偏心率 | 0.0004262 | 发射脉冲带宽 | 16MHz |
| 轨道倾角 | 98.5496° | 发射脉冲宽度 | 25μs |
| 升交点赤经 | 133.0121° | 脉冲重复频率 (典型值) | 2000Hz |
| 近地点幅角 | 123.2966° | 波束中心视角 | 30° |

采用表 1 参数,设主星和辅星群编队的参考卫星距离约为 100km,则 $\theta_c \approx \theta_1 = 35.31^\circ$; $\varphi_c \approx \varphi_2 = 95.15^\circ$, $\psi_1 = 98.93^\circ$ 。取双站 SAR 信噪比 $SNR = 6dB$ 。各测量量的误差取 $H_{0c} = 1m$, $n_c = 3m$, $B_c = 0.1m$, $\alpha_c = 5''$, $\beta_c = 5''$, $\psi_{1c} = 5''$, $B_{1c}^x \approx 4395m$, $B_{1c}^y \approx 11120m$ 。针对不同编队构形对应的基线矢量集合, $\Delta\phi_c$ 可根据式 (5)、(6) 和 (13) 计算。

2 3 1 干涉车轮和钟摆的测高性能分析

假设干涉车轮沿航迹振幅取 12km,干涉钟摆沿



(a)

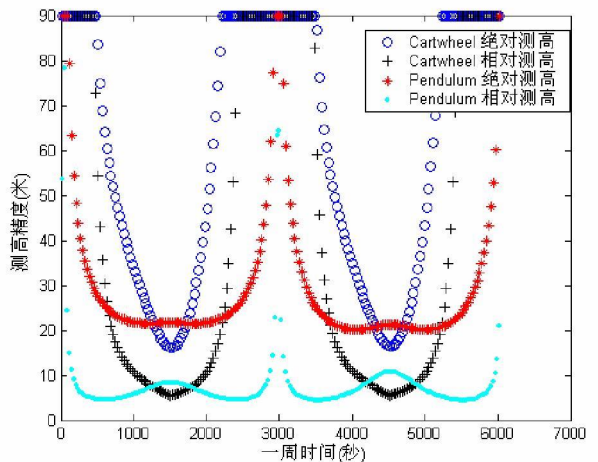
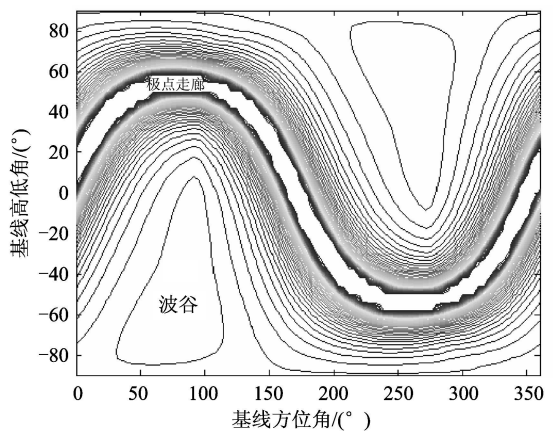


图 3 干涉车轮、钟摆绝对测高与相对测高精度

Fig 3 DEM accuracy of interferometric Cartwheel and Pendulum

2 3 2 测高精度与空间基线的关系

根据高程精度公式,可知绝对测高精度和相对测高精度与基线矢量的长度、两个姿态角都有关,为显示方便,取定基线长度 ($B = 4km$),得到绝对高程精度和相对高程精度随基线姿态角变化情况(如图 4(a)和 (b)等高线图),二者随基线姿态角变化的规律基本相同,图 4 中极点走廊区对应测高误差很大



(b)

图 4 测高精度与基线姿态角的关系,等高线图 ($B = 4km$)

(a) 绝对测高精度 $\sigma_h - (\alpha, \beta)$; (b) 相对测高精度 $\sigma_h - (\alpha, \beta)$

的情况,波谷区对应测高误差很小的情况,极点走廊中心线对应 $B'_1=0$,即基线姿态角满足关系 $\text{tg}^3 \text{tg} \theta_1 = -\cos(\alpha + \psi_1)$,波谷最低点对应 B'_1 ,取其最大值 B ,即 $\alpha = -\psi_1 \approx 95^\circ$ 和 $\beta = \theta_1 \approx 35.3^\circ$ 的情况。由公式 (2)、(4) 和 (6) 也可以得到这一结论。当基线 $B=5.2\text{km}$ 时,测高精度随基线姿态角变化的规律如图 5 所示,在原来的波谷区域出现了极点,这是因为在这些位置的距离向有效基线达到了临界值,使得相关性为零,测高误差无穷大。当基线姿态角固定时,一方面,基线增大,测高误差对各参数误差不敏感,测高误差减小,另一方面,基线增大,基线去相关增大,干涉相位误差增大,测高误差增大,因此存在最优基线 $B_{\text{opt}}(\alpha, \beta)$: $\sigma_h(B_{\text{opt}}(\alpha, \beta)) = \min_B(\sigma_h(B, \alpha, \beta))$,可以通过优化计算方法得到,例如,上述波谷最低点对应的最优基线为 2.2km ,绝对测高误差为 14.8m 。

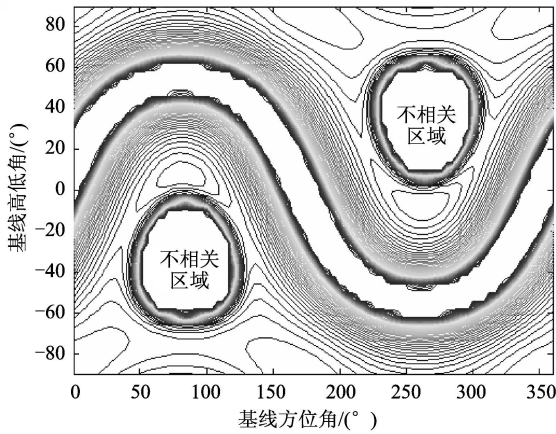


图 5 基线去相关对测高精度的影响

Fig 5 Influence of baseline decorrelation

3 与“经典近似”情形比较

对主星带辅星群干涉 SAR 几何关系作两种近似:(1)斜视、同距离高度平面近似;(2)正侧视投影近似。以下分析这两种近似对测高精度带来的影响,即与实际几何关系下的测高精度进行对比。

3.1 与斜视、同距离高度平面情况对比

此时 $\alpha + \psi_1 = 0$, OS_1S_2 平面和 OS_1T 平面重合,式 (2) 中各参数误差的传递函数作相应改变。

3.2 与正侧视投影情况对比

此时 $\psi_1 = 90^\circ$,同时将各几何参数投影到卫星 S_1 的距离高度平面内(补偿沿航迹基线对干涉相位值的影响),得到如图 2 的几何关系。因此地心距 h 由五个参数: S_1 地心距 H_0 、 T 与 S_1 间的距离 r_1 、投影基线长度 B' 、投影基线高低角 β' 、投影干涉相位 $\Delta\phi'$ 决定:

$$h = g(Y)$$

式中, $Y = (H_0, r_1, B', \beta', \Delta\phi')^T$

投影前,地心距 h 由 7 个参数决定(如式 (1)):

$$h = f(X)$$

式中, $X = (H_0, r_1, B, \alpha, \beta, \psi_1, \Delta\phi)^T$

由投影关系,可以得到投影前后的变量 Y 和 X 及其各自误差的关系:

$$Y = k(X) \text{ 和 } \sigma_Y = \frac{\partial k}{\partial X} \sigma_X$$

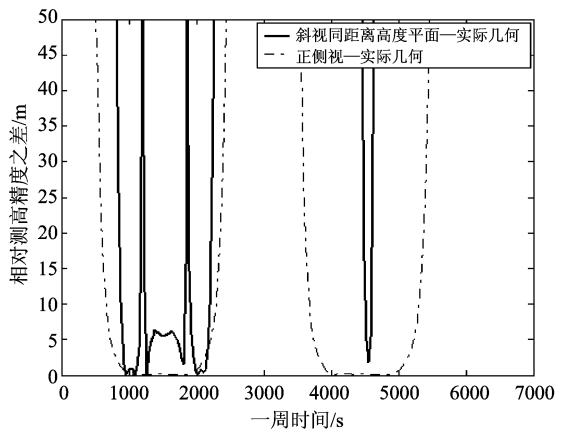
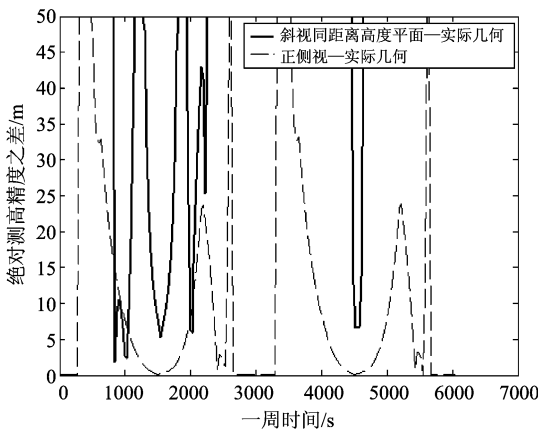


图 6 不同几何下 Cartwheel 测高精度比较

(a) Cartwheel 绝对测高精度之差; (b) Cartwheel 相对测高精度之差

投影前,干涉测高误差 σ_h 与各变量误差 σ_x 的关系是:

$$\sigma_h = \frac{\partial f}{\partial X} \sigma_x$$

投影后,干涉测高误差 σ_h 与投影后的各变量误差 σ_Y 的关系是:

$$\sigma_h' = \frac{\partial g}{\partial Y} \sigma_Y = \frac{\partial g}{\partial Y} \frac{\partial k}{\partial X} \sigma_x = \frac{\partial g}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial X} \sigma_x = \frac{\partial g}{\partial X} \sigma_x = \sigma_h$$

上式表明,投影前后的干涉测高误差不变,因此只要将实际几何下的测高误差公式中的 ψ_1 取为 90° 即可。

3.3 仿真分析

采用前述 Cartwheel 参数,对两种近似几何下的测高精度与实际几何下的测高精度之差进行仿真(如图 6 所示)。仿真结果表明,无论是绝对测高还是相对测高,斜视同距离高度平面近似,和正侧视带来的测高精度计算误差(与实际几何对比)都比较大,并且斜视同距离高度平面要比正侧视大。这说明对于主星带辅星群干涉测高来说,由于其几何关系具有双站、斜视和空间基线等特点,不能用经典几何关系和相应的测高精度分析方法来研究。

4 结 论

干涉测高精度必须考虑基线去相关的影响;由

于相对高程精度只考虑了干涉相位误差的影响,因此明显小于绝对高程精度;经典近似几何给分析测高精度带来较大误差,不能基于经典近似几何对主星带辅星群编队 InSAR 测高精度进行分析。

参 考 文 献 (References)

- [1] Fiedler H, Krieger G, Jochim F, et al. Analysis of Satellite Configurations for Spaceborne SAR Interferometry [A]. International Symposium Formation Flying Mission & Technologies [C]. Toulouse France 2002.
- [2] Krieger G, Wendler M. Comparison of the Interferometric Performance for Spaceborne Parasitic SAR Configurations [A]. 4th European Conference on Synthetic Aperture Radar [C]. Germany 2002.
- [3] Paul A Rosen, Scott Hensley, Ian R Joughin, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry [A]. Proceedings of the IEEE [C]. 2000, 88(3): 333-382.
- [4] Dong Z, Liang D N, He F. Analyze the Height Measure Accuracy of Spaceborne Bistatic SAR Interferometry [A]. Seminar on Distributed Spacecraft New Concept & Applied Technology [C]. Beijing 2004. [董臻,梁甸农,何峰. 星载双基地 SAR 干涉测高精度分析 [A]. 分布式航天器新概念及其应用技术研讨会论文集 [C]. 北京, 2004.]
- [5] Huang H F, Liang D N, He F, et al. Restrictions of Spaceborne Parasitical InSAR Formation Configuration Design [A]. Annual Meeting of Space Electronic Science [C]. Yichang 2004. [黄海风,梁甸农,何峰等. 星载寄生式干涉 SAR 编队设计约束条件分析 [A]. 空间电子学学术年会会议集 [C]. 宜昌, 2004.]