

DOI: 10.7652/xjtuxb201404015

地球同步轨道合成孔径雷达干涉测量模型

杨桃丽¹, 索志勇¹, 李真芳¹, 楚江^{1,2}, 保铮¹

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安; 2. 西安卫星测控中心, 710043, 西安)

摘要: 针对现有文献采用地球同步轨道合成孔径雷达(GEOSAR)测量地形高度和地貌形变时误差较大的问题,提出了一种新的 GEOSAR 干涉测量模型。在考虑地球曲面、斜距、基线、平台高度、干涉相位和数字高程模型(DEM)等因素的情况下,推导了干涉 GEOSAR 的绝对测高精度、相对测高精度与形变测量精度的数学模型,建立了一种既适用于高轨干涉 SAR 系统,也适用于低轨干涉 SAR 系统的干涉测量模型。根据该模型计算了 GEOSAR 测高误差和形变测量误差,并与实验仿真结果进行了比较,验证了该模型的有效性。研究表明,所提 GEOSAR 干涉测量模型与 Bruno 所提模型相比,适用范围更广,且误差精度提高至米量级。

关键词: 地球同步轨道;合成孔径雷达;干涉;形变

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0085-05

Model of Geosynchronous Synthetic Aperture Radar Interferometry

YANG Taoli¹, SUO Zhiyong¹, LI Zhenfang¹, CHU Jiang^{1,2}, BAO Zheng¹

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: For the low measuring accuracy of terrain height and deformation by geosynchronous synthetic aperture radar (GEOSAR) in available literatures, a new GEOSAR interferometry model is presented. This model is suitable for both high orbit SAR and low orbit SAR, and the mathematical expressions of the accuracy of absolute height, relative height and change detection are derived by considering the earth curve, slant range, baseline, platform height, interferometric phase and digital elevation model (DEM). The height and deformation errors in the new model are evaluated and compared with those from the simulated experiments to confirm the validity of this model. It indicates that the newly proposed model is suitable to a wider application range than Bruno's model with an accuracy of meter level.

Keywords: geosynchronous; synthetic aperture radar; interferometry; deformation

干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)和差分干涉合成孔径雷达(differential SAR interferometry, D-InSAR)具有全天时、全天候观测特性,在地表监测中越来越受到重视。虽然中低轨 InSAR 和 D-InSAR 已经实现并得到了广泛应用,但由于其观测场景较小,重访时间周

期较长,对广域快时间地表监测还存在很大的局限性。相比低轨道 SAR(low earth orbit SAR, LEO-SAR)的观测场景,地球同步轨道 SAR(geosynchronous SAR, GEOSAR)的观测场景可达几千万平方千米,如美国的 GESS(global earthquake satellite system)^[1],其观测区域近 8 000 万 km²,针对我国

收稿日期: 2013-08-07。 作者简介: 杨桃丽(1987—),女,博士生;索志勇(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41001282,41371439);中央高校基本科研业务费资助项目(K5051302014,K5051202016)。
网络出版时间: 2014-01-15 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140115.1446.003.html>

的国土面积,至多一颗卫星即可实现全境覆盖。由于 GEOSAR 较短的重访周期,使得其非常适合进行地表形变检测。现有的大多数文献主要针对 GEOSAR 成像处理^[2-7],鲜有文献对 GEOSAR 干涉及差分干涉性能进行分析,同时大多数文献都是在平地模型的假设前提下对低轨道 SAR 或机载 SAR 系统进行性能分析^[8-11],而 GEOSAR 的卫星平台高度达到 30 000 km 以上,利用平地模型将引起极大的误差,因此非常有必要针对 GEOSAR 系统重新分析其干涉性能。文献[12-13]简要分析了利用 GEOSAR 进行干涉测高的相对测高精度,但考虑因素并不全面,部分公式推导不明确,且存在一些问题,同时未对绝对测高精度和形变测量精度进行分析。

针对以上问题,本文提出了一种基于地球曲面的 GEOSAR 干涉测量模型,对影响相对测高精度、绝对测高精度和形变测量精度的各因素进行了建模与分析,同时更正了部分现有文献存在的问题,为 GEOSAR 干涉及差分干涉系统设计和工程实现提供了参考。

1 GEOSAR 干涉基线

卫星在运行过程中,会受到各种力的影响,导致其运行轨道随时间变化而产生一定的漂移,即轨道摄动。利用重复航过期间卫星轨道位置漂移形成的垂直有效基线即可进行干涉处理。为使卫星能覆盖中国大部分区域,在本文的分析中设轨道偏心率为 0.005,轨道倾角为 60° ,升交点赤经为 105° 。图 1 给出了因轨道摄动得到的重轨 1 天和重轨 2 天的垂直有效基线,假设下视角为 4° 。可以看出,因轨道摄动形成的垂直有效基线长度在千米量级以上。

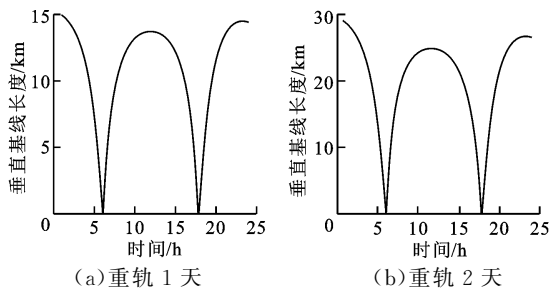


图 1 因轨道摄动得到的垂直基线长度随时间的变化情况

目标点高程可通过以下 2 式计算得到^[8,10]

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda}B\sin(\theta - \alpha) = -\frac{4\pi}{\lambda}(B_x\sin\theta - B_y\cos\theta) \quad (1)$$

$$\cos\theta = \frac{(H_s + R_e)^2 + r_1^2 - (h + R_e)^2}{2r_1(H_s + R_e)} \quad (2)$$

式中: φ 为 2 次航过的干涉相位差; λ 为波长; B 为 2 次航过形成的基线长度; α 为基线倾角; $B_x = B\cos\alpha$ 为水平向基线长度; $B_y = B\sin\alpha$ 为高度向基线长度; θ 为雷达下视角; r_1 和 r_2 分别为 2 次航过雷达天线相位中心到目标点的斜距; R_e 为地球半径; H_s 为卫星平台高度; h 为目标点的高程值,即待求量。对于 GEOSAR 系统来说,一般均采用 L 波段^[12],因此本文在下面的分析中均假设雷达载频为 1.25 GHz。

为便于下文分析,重写式(2)为

$$h = ((H_s + R_e)^2 + r_1^2 - 2r_1(H_s + R_e)\cos\theta)^{1/2} - R_e \quad (3)$$

若在卫星 2 次航过期间,地表发生了形变,则跨越形变期获取的 2 幅 SAR 图像组成的干涉相位中还包含形变相位

$$\varphi_{\text{def}} = \frac{4\pi}{\lambda}d \quad (4)$$

式中: d 为 2 次航过期间沿雷达视线方向的地表形变量。

2 绝对测高精度

绝对测高精度的定义为数字高程模型(digital elevation model, DEM)中目标点的高程与实际地面上对应点的真实高程之间的均方根值。绝对高程精度反映了 DEM 与真实地形沿高度向上的整体偏移和扭曲。影响 GEOSAR 绝对测高精度的因素有斜距误差 Δr_1 、基线误差 ΔB 、卫星平台高度误差 ΔH_s 以及干涉相位误差 $\Delta\varphi$ 。假设各影响因素之间是相互独立的,则总的绝对测高误差可以表示为^[8]

$$\Delta h_{\text{abs}} = ((\Delta h_{r_1})^2 + (\Delta h_B)^2 + (\Delta h_{H_s})^2 + (\Delta h_\varphi)^2)^{1/2} \quad (5)$$

式中: Δh_{r_1} 、 Δh_B 、 Δh_{H_s} 和 Δh_φ 分别表示由斜距误差、基线误差、卫星平台高度误差和干涉相位误差引起的绝对测高误差。

2.1 斜距误差

利用式(3)对目标高程 h 关于斜距 r_1 求导可得

$$\Delta h_{r_1} = \frac{r_1 - (H_s + R_e)\cos\theta}{h + R_e}\Delta r_1 \quad (6)$$

若目标高程为 0 m,下视角为 4° ,则斜距测量误差 5 m 引起的绝对测高误差为 4.42 m。

2.2 基线误差

垂直有效基线是实现干涉处理的基础,垂直有效基线是指物理基线在垂直于雷达视线方向上的投影。垂直有效基线越长,基线误差引起的绝对和相对高程误差就越小。利用式(1)和式(3)对目标高程

h 分别关于 B_x 和 B_y 求导得

$$\Delta h_{B_x} = \frac{r_1(H_s + R_e)\sin^2\theta}{(h + R_e)B_{\perp}}\Delta B_x \quad (7)$$

$$\Delta h_{B_y} = -\frac{r_1(H_s + R_e)\sin\theta\cos\theta}{(h + R_e)B_{\perp}}\Delta B_y \quad (8)$$

式中: ΔB_x 为水平基线误差; ΔB_y 为高度向基线误差; $B_{\perp} = B\cos(\theta - \alpha)$ 表示垂直有效基线。由此可得因基线误差引起的绝对测高误差为

$$\Delta h_B = (\Delta h_{B_x}^2 + \Delta h_{B_y}^2)^{1/2} \quad (9)$$

假设基线长度为 20 km,基线水平倾角为 5° ,目标高程为 0 m,下视角为 4° ,则两轴基线误差 10 cm(即 ΔB_x 和 ΔB_y 均为 10 cm)引起的绝对高程误差为 87.1 m。

2.3 平台高度误差

利用式(3)对目标高程 h 关于 H_s 求导可得平台高度误差引起的绝对测高误差为

$$\Delta h_{H_s} = \frac{(H_s + R_e) - r_1\cos\theta}{h + R_e}\Delta H_s \quad (10)$$

若目标高程为 0 m,下视角为 4° ,则平台高度误差 10 m引起的绝对测高误差为 9.14 m。

2.4 干涉相位误差

利用式(1)和式(3)对目标高程 h 关于干涉相位 φ 求导可得

$$\frac{\partial h}{\partial \varphi} = \frac{\lambda r_1(H_s + R_e)\sin\theta}{4\pi(h + R_e)B_{\perp}} \quad (11)$$

由此可得干涉相位误差 $\Delta\varphi$ 引入的绝对测高误差为

$$\Delta h_{\varphi} = \frac{\lambda r_1(H_s + R_e)\sin\theta}{4\pi(h + R_e)B_{\perp}}\Delta\varphi = h_{\text{amb}} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (12)$$

式中

$$h_{\text{amb}} = \frac{\lambda r_1(H_s + R_e)\sin\theta}{2(h + R_e)B_{\perp}} \quad (13)$$

为系统模糊高度,定义为引起 2π 相位变化所对应的高程变化^[10]。假设干涉基线为 20 km,则下视角 4° 对应的系统模糊高度约为 104 m。文献[12]给出的系统模糊高度定义与式(13)形式相同,但 θ 的定义为雷达地面入射角,在 GEOSAR 系统模型下,两者相差很大,若按文献[12]所给出的定义可得模糊高度约为 703 m。通过详细分析推导和实验验证,我们认为文献[12]的结论存在错误,正确的表达式应为式(13)。

在 InSAR 数据处理中,干涉相位误差主要由用于干涉处理的 SAR 图像对之间的相干性和视数决定,其 Cramer-Rao 界为

$$\Delta\varphi = \left(\frac{1}{2N_L} \frac{1 - \gamma^2}{\gamma^2} \right)^{1/2} \quad (14)$$

式中: γ 为相干系数; N_L 为视数。

影响相干系数 γ 的因素很多,总的来说,GEO-SAR 干涉处理去相干系数可以分为以下几类:信噪比去相干系数 γ_{SNR} ,模糊去相干系数 γ_{Amb} ,垂直基线去相干系数 $\gamma_{B_{\perp}}$,多普勒去相干系数 γ_{Dop} ,体散射去相干系数 γ_{vol} ,时间去相干系数 γ_{temp} 和处理去相干系数 γ_{proc} 。总的相干系数可表示为^[9]

$$\gamma_{\text{tot}} = \gamma_{\text{SNR}} \gamma_{\text{Amb}} \gamma_{B_{\perp}} \gamma_{\text{Dop}} \gamma_{\text{vol}} \gamma_{\text{temp}} \gamma_{\text{proc}} \quad (15)$$

2.4.1 信噪比去相干 信噪比去相干系数可以表示为

$$\gamma_{\text{SNR}} = \frac{1}{(1 + \sigma_{\text{SNR},1}^{-1})^{1/2} (1 + \sigma_{\text{SNR},2}^{-1})^{1/2}} \quad (16)$$

式中: $\sigma_{\text{SNR},1}$ 和 $\sigma_{\text{SNR},2}$ 分别表示进行干涉的主、辅图像的信噪比。这里的信噪比包括由热噪声和量化噪声等引起的总信噪比。量化噪声主要受 BAQ 压缩量化比特的影响,实验证明量化比特为 4 和 3 导致的量化信噪比分别为 20 dB 和 14.4 dB,对应的相干性损失分别为 1% 和 3.5%^[9]。

2.4.2 模糊去相干 距离模糊和方位模糊引起的去相干系数可由下式计算得到

$$\gamma_{\text{Amb}} = \frac{1}{1 + \sigma_{\text{RASR}}} \frac{1}{1 + \sigma_{\text{AASR}}} \quad (17)$$

式中: σ_{RASR} 和 σ_{AASR} 分别表示距离模糊信号比和方位模糊信号比。

2.4.3 垂直基线去相干 垂直基线去相干系数与垂直有效基线长度和极限基线长度有关,其表达式为

$$\gamma_{B_{\perp}} = \begin{cases} 1 - \frac{B_{\perp}}{B_{\text{cr}}}, & |B_{\perp}| \leq B_{\text{cr}} \\ 0, & |B_{\perp}| > B_{\text{cr}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $B_{\perp} = B\cos(\theta - \alpha)$ 为垂直有效基线长度; B_{cr} 为极限基线长度。极限基线定义为一个距离分辨单元内干涉相位变化超过 2π 时所对应的垂直有效基线长度^[10]。根据此定义,利用式(1)和式(3)对干涉相位 ϕ 关于斜距 r_1 求导得

$$\frac{\partial \phi}{\partial r_1} = \frac{4\pi}{\lambda} B\cos(\theta - \alpha) \left(\frac{\cos\theta}{r_1} - \frac{1}{H_s + R_e} \right) \frac{1}{\sin\theta} \quad (19)$$

若要进行干涉处理,式(2)须满足

$$\frac{\partial \phi}{\partial r_1} < \frac{2\pi}{\rho_r} \quad (20)$$

式中: ρ_r 为斜距分辨率。由此可得极限基线为

$$B_{\text{cr}} = \frac{\lambda r_1(R_e + H_s)\sin\theta}{2\rho_r[(R_e + H_s)\cos\theta - r_1]} \quad (21)$$

文献[12]中极限基线的定义为

$$B'_{\text{cr}} = \frac{\lambda r_1(R_e + H_s)\sin\theta}{2\rho_r[r_1 - (R_e + H_s)\cos\theta]} \quad (22)$$

式中: θ 定义为入射角。很明显, 式(22)存在问题。GEOSAR 的下视角范围约为 $1^\circ \sim 8^\circ$, 对应的入射角范围可达到 $6.7^\circ \sim 69.3^\circ$, 若按照式(22)计算极限基线, 则 B'_{cr} 会出现负值。

2.4.4 多普勒去相干 多普勒去相干系数可表示为

$$\gamma_{Dop} = \begin{cases} 1 - \frac{|f_{dc1} - f_{dc2}|}{B_a}, & |f_{dc1} - f_{dc2}| \leq B_a \\ 0, & |f_{dc1} - f_{dc2}| > B_a \end{cases} \quad (23)$$

式中: f_{dc1} 和 f_{dc2} 分别为 2 次航过的多普勒中心频率; B_a 为多普勒带宽。多普勒去相干的影响可以通过预滤波来给予缓解^[9]。

2.4.5 体散射去相干 体散射去相干主要存在于植被区域, 其大小与植被类型、植被高度和模糊高度有关^[9], 如式(24)和式(25)所示

$$\gamma_{vol} = \int_0^{h_v} \sigma_0(z) \exp\left(j2\pi \frac{z}{h_{amb}}\right) dz \bigg/ \int_0^{h_v} \sigma_0(z) dz \quad (24)$$

$$\sigma_0(z) = \exp\left[-2\xi \frac{h_v - z}{\cos\beta}\right], \quad 0 \leq z \leq h_v \quad (25)$$

式中: $\sigma_0(z)$ 为垂直散射结构函数; h_v 为植被体散射高度; ξ 为单程幅度消光系数(L 波段约为 0.2 dB/m); z 表示散射体的不同高度, 分布区为 $[0, h_v]$; β 为雷达入射角; h_{amb} 为模糊高度, 其表达式如式(13)所示。

2.4.6 时间去相干 时间去相干是指重复航过期间地物散射特性变化(如土壤湿度变化、树木随风抖动)引起的相干性损失。Zebker 等人给出了时间去相干模型为^[14]

$$\gamma_{temp} = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 (\sigma_x^2 \sin^2\beta + \sigma_y^2 \cos^2\beta)\right] \quad (26)$$

式中: λ 为波长; β 为入射角; σ_x 和 σ_y 分别表示散射体在 2 次航过期间水平向和高度向的位置变化。对于大多数地形来说, 24 h 重轨引起的时间去相干可以忽略。

2.4.7 处理去相干 InSAR 处理去相干因素主要表现为图像配准去相干。考虑方位向配准误差为 Δx 个分辨单元, 距离向配准误差为 Δr 个分辨单元, 则图像配准相干系数为

$$\gamma_{proc} = \text{sinc}(\Delta x) \text{sinc}(\Delta r) \quad (27)$$

2.5 小结

通过前面的分析可知, 在各项误差源中, 基线误差对绝对测高精度的影响最大。若垂直有效基线为

20 km, 下视角为 4° , 主辅图像信噪比为 8 dB, 采用 BAQ8:4 量化, 距离和方位模糊度为 -20 dB, 植被高度为 10 m, 图像配准精度为 0.1 个分辨单元, 忽略时间去相干和多普勒去相干的影响, 干涉图像对的相干系数约为 0.76, 若进行 16 视处理, 则去相干引入的干涉相位误差约为 8.5° , 绝对测高误差约为 2.47 m。若斜距误差为 5 m, 基线误差为 10 cm, 平台高度误差为 10 m, 则总的绝对测高误差约为 79 m。

3 相对测高精度

相对测高精度是指在一幅场景中任意 2 点之间的高程差与实际地面上对应 2 点的高程差之间的均方根误差, 反映了地形的几何畸变。假设各影响因素之间是相互独立的, 则总的相对测高误差可以表示为

$$\Delta h_{rel} = ((\Delta h_{rel,r_1})^2 + (\Delta h_{rel,B})^2 + (\Delta h_{rel,H_s})^2 + (\Delta h_{rel,\varphi})^2)^{1/2} \quad (28)$$

式中: $\Delta h_{rel,r_1}$ 、 $\Delta h_{rel,B}$ 、 $\Delta h_{rel,H_s}$ 和 $\Delta h_{rel,\varphi}$ 分别表示因斜距误差、基线误差、平台高度误差和干涉相位误差引起的相对测高误差。前 3 者引起的相对测高误差受测绘带宽和场景中目标高程变化的影响, 而对于干涉相位误差引起的测高误差来说, 其主要受干涉噪声的影响, 即

$$\Delta h_{rel,\varphi} = 2^{1/2} \Delta h_\varphi \quad (29)$$

假设测绘带宽为 500 km、基线长度为 20 km、目标高程最大变化为 9 000 m、中心下视角为 4° 时, 斜距误差 5 m 引起的相对测高误差为 0.22 m, 基线误差 10 cm 引起的相对测高误差为 15.98 m, 平台高度误差 10 m 引起的相对测高误差为 0.32 m, 其他参数同上, 则总的相对测高误差约为 16 m。

4 形变测量精度

形变测量精度主要取决于干涉相位误差、DEM 误差和基线误差, 总的形变测量误差可以表示为

$$\Delta d_{total} = ((\Delta d_\varphi)^2 + (\Delta d_{DEM})^2 + (\Delta d_B)^2)^{1/2} \quad (30)$$

式中: Δd_φ 、 Δd_{DEM} 和 Δd_B 分别表示由干涉相位误差、DEM 误差和基线误差引起的形变测量误差。

4.1 干涉相位误差

由式(4)可得, 干涉相位误差引起的形变测量误差 Δd_φ 如下式所示

$$\Delta d_\varphi = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi \quad (31)$$

式中: $\Delta\varphi$ 表示干涉相位误差。若干涉相位误差为 8.5° ,则引起的形变测量误差为 2.8 mm 。

4.2 DEM 误差

利用式(1)和式(3),对干涉相位 φ 关于高程 h 求导可得

$$\frac{\partial\varphi}{\partial h} = \frac{\partial\varphi}{\partial\theta} \frac{\partial\theta}{\partial h} = -\frac{4\pi B_{\perp}(h+R_e)}{r_1\lambda(H_s+R_e)\sin\theta} \quad (32)$$

由此可知 DEM 误差引起的干涉相位误差为

$$\Delta\varphi_{\text{DEM}} = -\frac{4\pi B_{\perp}(h+R_e)}{r_1\lambda(H_s+R_e)\sin\theta}\Delta h_{\text{DEM}} \quad (33)$$

式中: Δh_{DEM} 为 DEM 误差。结合式(31)可得,DEM 误差引起的形变测量误差为

$$\Delta d_{\text{DEM}} = \frac{B_{\perp}(h+R_e)}{r_1(H_s+R_e)\sin\theta}\Delta h_{\text{DEM}} \quad (34)$$

假设垂直有效基线为 10 km ,下视角为 4° ,参考高程 $h=0$,则 DEM 误差为 10 m 引起的形变测量误差为 5.74 mm 。

4.3 基线误差

利用式(1)对干涉相位 φ 关于基线 B 求导,可得

$$\frac{\partial\varphi}{\partial B_x} = -\frac{4\pi}{\lambda}\sin\theta \quad (35)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial B_y} = \frac{4\pi}{\lambda}\cos\theta \quad (36)$$

结合式(4)可得基线误差引起的形变测量误差为

$$\Delta d_B = ((\Delta B_x \sin\theta)^2 + (\Delta B_y \cos\theta)^2)^{1/2} \quad (37)$$

假设下视角为 4° ,则基线误差为 10 cm 引起的形变测量误差为 10 cm 。

通过上面的分析可知,基线误差对形变测量误差的影响远大于其他2个因素,是形变测量精度的瓶颈^[11]。

5 实验验证

下面利用精确的几何模型,并按照实际情况中的目标高程和形变量获取方式对以上分析的 GEOSAR 干涉性能进行验证,这里不考虑方位向的影响,仅考虑二维坐标,即距离向 x 和高度向 y 。在进行测高精度验证时,采用如下所示的定位方程

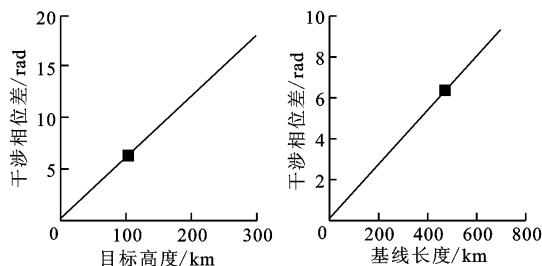
$$\|\mathbf{S}_1 - \mathbf{P}_t\| = r_1 \quad (38)$$

$$\|\mathbf{S}_2 - \mathbf{P}_t\| = r_2 \quad (39)$$

式中: r_2 由干涉相位 φ 得到,即 $r_2 = -\frac{\lambda\varphi}{4\pi}$; $\mathbf{S}_1$ 和 $\mathbf{S}_2$ 分别表示2次航过卫星的坐标; $\mathbf{P}_t$ 表示目标点坐标。通过对式(38)和式(39)进行迭代计算,最终得到目标点的坐标 $\mathbf{P}_t$,从而得到目标点高程 h 。卫星高度为 $36\,500\text{ km}$,波长为 0.24 m ,下视角为 4° ,基

线倾角为 5° ,目标高程为 0 m ,进行测高验证时基线 $B=20\text{ km}$,进行形变量验证时基线 $B=10\text{ km}$ 。实验结果表明,斜距误差 5 m 、基线误差 10 cm 、平台高度误差 10 m 、干涉相位误差 8.5° 引入的测高误差分别为 4.42 m 、 87.10 m 、 9.14 m 、 2.47 m ,干涉相位误差 8.5° 、DEM 误差 10 m 、基线误差 10 cm 引入的形变测量误差分别为 2.83 mm 、 5.74 mm 、 100 mm ,与本文推导公式计算结果一致,从而证明了本文模型的正确性。

下面对本文推导的式(13)和式(21)分别进行验证,即验证模糊高度和极限基线。在假设斜距分辨率为 5 m 时,给出了干涉相位差随目标高程和垂直基线长度的变化如图2所示。可以看出,当目标高程变化为 104.5 m 、干涉相位差变化为 2π ,垂直基线长度为 471.9 km 时,一个分辨单元内的干涉相位差变化为 2π ,与本文理论推导结果相一致,而按文献[12]推导的模糊高度应为 703 m ,极限基线为 $-24\,530\text{ km}$,很明显文献[12]存在错误。



(a)随目标高程的变化 (b)随垂直基线长度的变化

图2 干涉相位差随目标高程和垂直基线长度的变化

6 结论

本文提出了一种新的适用于 GEOSAR 的干涉测量模型。通过考虑地球曲面、斜距、基线、平台高度、干涉相位和数字高程模型(DEM)等因素的影响,推导了干涉 GEOSAR 的绝对测高精度、相对测高精度与形变测量精度的数学模型。该模型既适用于高轨干涉 SAR 系统,也适用于低轨干涉 SAR 系统的干涉测量模型。实验结果表明,本文所提 GEOSAR 干涉测量模型具有更广的适用范围,且精度更高。

参考文献:

- [1] NASA J P L. Global earthquake satellite system: a 20 year plan to enable earthquake prediction [EB/OL]. [2013-04-11]. <http://solidearth.jpl.nasa.gov/gess.html>.

(下转第101页)