

InSAR 误差建模与误差估计方法

张永俊, 黄海风, 张永胜, 梁向农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对干涉合成孔径雷达(InSAR)系统的误差问题, 对系统各种误差源按照误差特性进行分析和分类, 通过误差传递分析, 建立了 InSAR 测高误差的参数化模型. 在此基础上, 利用地面控制点, 通过最小二乘法得到整个测绘带内的系统性高程误差分布, 进而根据各类误差对测高误差的影响规律, 分别将恒定误差、缓变误差和随机误差分类提取出来. 仿真结果表明了该方法的有效性.

关键词: 干涉合成孔径雷达; 系统性误差; 误差分类; 高程误差模型; 基线估计

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1225-06

InSAR Error Modeling and Error Estimation Method

ZHANG Yong-jun, HUANG Hai-feng, ZHANG Yong-sheng, LIANG Dian-nong

(School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Parameter errors of the interferometric synthetic aperture radar (InSAR) system influence the vertical accuracy significantly. In this paper, the error sources of the InSAR system is analyzed and classified according to their properties, then the height error model is derived. Using the ground control points (GCPs) and the height error model, a systematic height error arrangement in the whole swath can be obtained with the least-squares method. Based on the error properties, the systematic height error contributions of constant systematic error and slowly changed systematic error can be abstracted from the whole systematic height error, and the baseline error can be derived. The simulation demonstrates the validity of this method.

Key words: interferometric synthetic aperture radar (InSAR); systematic height error; error classification; height error model; baseline estimation

1 引言

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是20世纪后期迅速发展起来的最有潜力的获取高精度数字高程模型(DEM)的一种技术手段. 它具有高精度、快速、全天时、全天候等突出优点^[1,2]. 在生成地面DEM产品的过程中, 涉及InSAR系统平台状态(姿态和运动状态等)的诸参数误差是限制DEM精度的主要因素. 为得到精确的系统平台参数, 通常要利用地面控制点(GCP)对系统参数进行联合校准.

现有的干涉定标方法大多基于敏感度方程^[3~5]. 文献[3]提出的算法全面地考虑了DEM重建时的各种参数误差, 但对敏感度矩阵的病态性没有进行充分分析, 因而定标过程收敛慢、计算量大, 结果可信度不高. 文献[4]考虑了敏感度矩阵的病态性, 通过保留敏感度矩阵中敏感度较大的参数, 删除敏感度较小的参数的方法, 减小了敏感度矩阵的条件数, 但该方法的定标参数较少, 且不能把被删除参数对高程误差的贡献隔离出来,

导致定标结果存在一定偏差. 文献[5]介绍了基线的定标, 根据控制点之间的相对距离、相对高程和相位值, 选取有效的迭代算法计算卫星坐标, 进而得到基线参数, 该方法的估计精度依赖于控制点的数目和分布. 上述方法定标结果精度较低主要是由于两个方面的原因造成的, 首先是敏感度矩阵条件数太大, 其次是各种参数误差对高程误差的贡献耦合在一起, 使得简化的敏感度矩阵和系统高程误差不匹配.

本文从InSAR定位方程出发, 首先分析了InSAR系统的主要误差源, 根据各个误差源特性, 对其进行分类, 并分别得到它们对高程误差的贡献, 从而得到InSAR高程误差模型. 利用地面控制点信息, 结合高程误差模型, 通过最小二乘法得到整个测绘带内的系统性高程误差分布, 根据基线误差和恒定误差两种系统性误差的特性, 把它们对高程误差的贡献从总的系统性高程误差中分离出来, 并由误差传递系数反演得到基线误差的估计值. 该方法对控制点精度要求较低, 具有一定的噪声抑制能力, 且可以得到基线误差随着方位向时间的估计.

2 InSAR 系统误差建模

2.1 InSAR 系统误差源

InSAR 系统利用处于不同方位的两幅天线获取地面信息,通过干涉处理获取地面场景的 DEM.在 WGS-84 坐标系下,对于地面上某一目标点 T ,InSAR 定位方程可以写为^[6,7]:

$$\begin{cases} \rho_1^2 = |P - A_1|^2 \\ \mathbf{V} \cdot (\mathbf{T} - \mathbf{A}_1) = -\frac{\lambda f_1 \rho_1}{2} \\ (\rho_1 + \Delta\rho)^2 = |\mathbf{T} - \mathbf{A}_1 - \mathbf{B}|^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{T} = (T_x, T_y, T_z)$ 是地物的三维坐标, $\mathbf{A}_1 = (A_x, A_y, A_z)$ 为主雷达天线相位中心的轨迹, $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$ 表示平台速度矢量, λ 为雷达波长, ρ_1 、 $\Delta\rho$ 和 f_1 分别是主雷达斜距、主辅雷达斜距差和多普勒中心频率,基线矢量 $\mathbf{B} = B_{\parallel} \hat{\mathbf{s}} + B_{\perp} \hat{\mathbf{a}} + B_a \hat{\mathbf{a}}^{\perp}$ 为主雷达天线相位中心到辅雷达天线相位中心的矢量, B_{\parallel} 、 B_{\perp} 、 B_a 分别代表视线方向基线长度、垂直有效基线长度和沿航迹基线长度, $\hat{\mathbf{s}}$ 、 $\hat{\mathbf{a}}$ 、 $\hat{\mathbf{a}}^{\perp}$ 是该三个方向的单位矢量.目标点高程即为地心距 $h = |\mathbf{T}|$.

设 x 代表式(1)中任一个参数或其分量,式(1)中三个方程两边分别对 x 求偏导,可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} - \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{V} \\ \mathbf{T} - \mathbf{B} - \mathbf{A}_1 \end{bmatrix} \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial x} = \mathbf{M} \quad (2)$$

其中, \mathbf{M} 为

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{A}_1}{\partial x} \cdot (\mathbf{T} - \mathbf{A}_1) \\ -\frac{\lambda f_1}{2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{A}_1}{\partial x} \cdot \mathbf{V} - \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \cdot (\mathbf{T} - \mathbf{A}_1) \\ (\rho_1 + \Delta\rho) \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial x} + \frac{\partial \Delta\rho}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{A}_1}{\partial x} \right) \cdot (\mathbf{T} - \mathbf{A}_1 - \mathbf{B}) \end{bmatrix}$$

令 $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} - \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{V} \\ \mathbf{T} - \mathbf{B} - \mathbf{A}_1 \end{bmatrix}$, $\alpha = \left[\frac{T_x}{|\mathbf{T}|} \quad \frac{T_y}{|\mathbf{T}|} \quad \frac{T_z}{|\mathbf{T}|} \right]$, 则目标点高程对 x 的偏导可以写为:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \alpha \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial x} = \alpha \cdot \mathbf{D}^{-1} \cdot \mathbf{M} \quad (3)$$

分别令 x 等于 ρ_1 、 $\Delta\rho$ 、 B_{\parallel} 、 B_{\perp} 、 B_a 、 A_{1x} 、 A_{1y} 、 A_{1z} 、 V_x 、 V_y 、 V_z , 即可得到各个参数的传递系数.其中, ρ_1 、 $\Delta\rho$ 、 B_{\parallel} 的误差传递系数较大,是关键误差,其余参数的误差传递系数相对较小,在处理中常常被忽略^[8].

根据上面的分析,可以看出,InSAR 系统的误差主要包括主星斜距测量误差、斜距差误差、干涉基线误差、主天线相位中心位置误差以及主星速度误差.此外,还必须考虑通过干涉相位误差得到斜距差误差时

的一系列处理步骤所引入的处理误差.

2.2 InSAR 系统误差分类

主辅雷达接收到的回波数据经过成像、配准、解缠、高程反演等一系列数据处理过程最终生成地面场景的 DEM^[9],该 DEM 中仍然包含诸如斜距测量误差、干涉相位误差、干涉基线误差等多种误差的影响.根据这些误差的特性,可以把它们分为恒定系统性误差、缓变系统性误差以及随机性误差三大类,如图 1 所示.其中对 DEM 精度影响较大的恒定系统性误差主要包括斜距测量误差、主天线相位中心位置误差、主星速度误差,其主要特征是在一次数据获取过程中误差量值保持不变.缓变系统性误差指干涉基线误差,其主要特征是在一次数据获取过程中误差量值缓慢变化,且呈现明显的规律性.对 DEM 影响较大的随机性误差主要包括由系统去相干造成的干涉相位误差,其主要特征是变化快,没有明显规律,长期观测其均值为零.

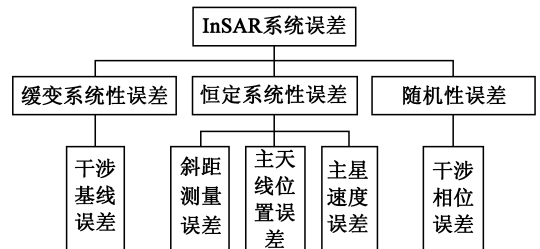


图1 InSAR系统的误差分类

2.3 各类误差对高程精度的影响分析

2.3.1 缓变系统性误差影响分析

干涉基线属于缓变系统性误差,在一次数据获取中缓慢变化,且呈现一定的规律.干涉基线通过测量两颗卫星位置后再经过配准、插值等过程得到.卫星的轨道运动呈现出较强的动力学规律,可以精确建模,采用 reduced 动力学模型作为高精度轨道表示模型,得到两颗卫星相对位置后,再经过配准、插值等过程得到的干涉基线,其确定误差表现出“系统误差”特性.在大时间尺度下(天),表现出波动特性,在小时间尺度上(几分钟),表现为线性特性^[10].

在一次数据获取的若干分钟内,假设干涉基线在方位向可以表示为:

$$B_{err}(y) = B_{err}(0) + k_1 y \quad (4)$$

其中, $B_{err}(y)$ 为干涉基线误差, y 为方位向位置,设数据获取初始时刻方位向位置为 0.

对地面上任一点 T 成像时,主天线相位中心位于 A_1 ,辅天线相位中心位于 A_2 ,如图 2 所示.此时,视线方向基线长度为 B_{\parallel} .根据空间几何关系,可以得到:

$$B_{\parallel} = B \cdot \sin\beta, B_{\perp} = B \cdot \cos\beta \quad (5)$$

当辅天线相位中心存在位置误差,位于 A'_2 时, β 变成 β' , B 变成 B' ,有:

$$B_{\parallel}' = B' \cdot \sin\beta', B_{\perp}' = B' \cdot \cos\beta' \quad (6)$$

可以看出,下视角 θ 和 β, β' 之间存在 $\theta = \beta + \alpha, \theta = \beta' + \alpha'$ 的关系,此处 α', α 分别表示有、无基线误差时的基线倾角,则可以得到基线误差为:

$$\Delta B_{\parallel}(\theta) = B_{\parallel} - B_{\parallel}' = B \cdot \sin(\theta - \alpha) - B' \cdot \sin(\theta - \alpha') \quad (7)$$

$$\Delta B_{\perp}(\theta) = B_{\perp} - B_{\perp}' = B \cdot \cos(\theta - \alpha) - B' \cdot \cos(\theta - \alpha') \quad (8)$$

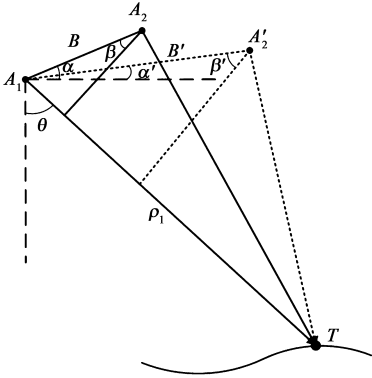


图2 基线误差空间几何

当下视角在测绘带内变化时,将式(7)在 $\theta = \theta_0$ 处 Taylor 展开,可以得到视线方向的基线误差随着 θ 的变化为:

$$\begin{aligned} \Delta B_{\parallel}(\Delta\theta) &= \Delta B_{\parallel}(\theta_0) + \Delta\theta \cdot \Delta B_{\perp}(\theta_0) - \frac{(\Delta\theta)^2}{2} \\ &\quad \cdot \Delta B_{\parallel}(\theta_0) + O((\Delta\theta)^3) \\ &\doteq a + b \cdot \Delta\theta - \frac{a}{2} \cdot (\Delta\theta)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $a = \Delta B_{\parallel}(\theta_0)$ 、 $b = \Delta B_{\perp}(\theta_0)$ 分别为下视角为 θ_0 时的视线方向基线误差和垂直有效基线误差. 式(9)表明视线方向基线误差在距离向上的变化可以写成下视角变化量 $\Delta\theta$ 的函数,省略了 $\Delta\theta$ 的三次及三次以上项.

下视角变化量 $\Delta\theta$ 和地距变化量 x 之间的关系为:

$$\Delta\theta = \frac{x \cos\eta}{\rho_1} \quad (10)$$

其中, η 为 T 处的入射角. 将式(10)代入式(9),得到视线方向基线误差随着距离向位置的变化为:

$$\Delta B_{\parallel}(x) = a + \frac{b \cdot \cos\eta}{\rho_1} x - \frac{a \cdot \cos^2\eta}{2\rho_1^2} x^2 \quad (11)$$

结合式(4)和式(11),则视线方向基线误差在整个测绘带内的变化可以写为:

$$\Delta B_{\parallel}(x, y) = a + \frac{b \cos\eta}{\rho_1} x - \frac{a \cos^2\eta}{2\rho_1^2} x^2 + k_1 y \quad (12)$$

视线方向基线误差对高程误差的贡献为:

$$h_{err_B} = \Delta B_{\parallel} \cdot \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}} \quad (13)$$

$\frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}$ 是视线方向基线误差到高程误差的传递函数,根

据式(3),可以写为:

$$\frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}} = \alpha \cdot \mathbf{D}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho_1 - B_{\parallel} \end{bmatrix} \doteq \frac{\rho_1 \sin\theta}{2B_{\perp}} \quad (14)$$

所以,在整个测绘带内, $\frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}$ 在方位向保持不变,在距离向会随着下视角线性变化. 可以写为:

$$\frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(x) = \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0) + k_2 x \quad (15)$$

其中, $k_2 = \frac{\cos\theta \cos\eta}{2B_{\perp}}$. 联合式(12)和式(15),得到在整个测绘带内,基线误差导致的高程误差为:

$$\begin{aligned} h_{err}(x, y) &= \Delta B_{\parallel}(x, y) \cdot \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}} \\ &= \left[a \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0) + \left(ak_2 + \frac{b \cos\eta}{\rho_1} \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0) \right) x \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{bk_2 \cos\eta}{\rho_1} - \frac{a \cos^2\eta}{2\rho_1^2} \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0) \right) x^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{ak_2 \cos^2\eta}{2\rho_1^2} x^3 + k_1 k_2 xy + k_1 \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0) y \right] \end{aligned} \quad (16)$$

2.3.2 恒定系统性误差影响分析

斜距测量误差 ρ_{1err} 、主天线位置误差 \mathbf{A}_{1err} 以及主星速度误差 \mathbf{V}_{err} 属于恒定系统性误差^[11],在一次数据获取中,其误差量值保持恒定,它们对高程误差的贡献分别为:

$$h_{err_rho} = \frac{\partial h}{\partial \rho_1} \cdot \rho_{1err} \quad (17)$$

$$h_{err_A} = \left[\frac{\partial h}{\partial A_{1x}} \quad \frac{\partial h}{\partial A_{1y}} \quad \frac{\partial h}{\partial A_{1z}} \right] \cdot \mathbf{A}_{1err}^T \quad (18)$$

$$h_{err_v} = \left[\frac{\partial h}{\partial V_x} \quad \frac{\partial h}{\partial V_y} \quad \frac{\partial h}{\partial V_z} \right] \cdot \mathbf{V}_{err}^T \quad (19)$$

需要说明的是,在上面各式中,虽然误差是恒定值,但是误差传递系数沿着距离向缓慢变化,只是它们的误差传递系数跟基线误差的传递系数相比非常小,几乎可以认为在测绘带内是恒定值.

2.3.3 随机性误差影响分析

干涉相位误差属于随机性误差,表现出高斯白噪声特性. 主要由系统相干性的损失引入,例如体散射去相干、基线去相干、多普勒去相干、处理去相干以及信噪比去相干等.

一般地,假定在均匀场景条件下,通过多视处理来描述干涉相位处理过程,当独立视数 N 比较大时,可以用克拉美罗界来近似计算相位均方差^[12]:

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{\frac{1 - \gamma_{tot}^2}{2N\gamma_{tot}^2}} \quad (20)$$

其中, γ_{tot} 是系统的相干系数, σ_{ϕ} 是干涉相位误差的均

方差.

干涉相位误差对高程误差的贡献可以表示为:

$$\sigma_h = \frac{\partial h}{\partial \Delta \rho} \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \sigma_\phi \quad (21)$$

其中, σ_h 为随机性高程误差的均方差.

2.4 DEM 误差建模

综上, InSAR 系统的高程误差可以分成系统性高程误差和随机性高程误差两个部分, 其中, 系统性高程误差为:

$$h_{err}(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + b_1 y + kxy \quad (22)$$

随机性高程误差的均方差为:

$$\sigma_h = \frac{\partial h}{\partial \Delta \rho} \cdot \sigma_\phi \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \quad (23)$$

式(22)中各系数分别为:

$$\begin{cases} a_0 = a \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0) + h_{err_ \rho} + h_{err_ A} + h_{err_ V} \\ a_1 = ak_2 + \frac{b \cos \eta}{\rho_1} \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0) \\ a_2 = \frac{bk_2 \cos \eta}{\rho_1} - \frac{a \cos^2 \eta}{2\rho_1^2} \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0) \\ a_3 = -\frac{ak_2 \cos^2 \eta}{2\rho_1^2} \\ k = k_1 k_2 \\ b_1 = k_1 \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0) \end{cases} \quad (24)$$

为了分析式(21)中各个系数大小, 根据式(24)进行多次计算并统计, 可以得到各系数标准差大小如表 1 所示.

表 1 各系数标准差统计结果^[13]

系数	a_0	a_1	a_2	a_3	b_1	k
标准差	2	$3e-4$	$5e-8$	$8e-12$	$4e-3$	$1e-6$

3 系统性误差反演原理

确定了系统性高程误差的表达式(22)后, 利用地面控制点, 通过最小二乘法得到各系数的估计. 控制点的来源主要有以下几种途径: ICESAT 数据、GPS 数据、局部高精度 DEM、布设角反射器以及其他高精度 DEM 数据.

得到各系数的准确估计后, 视线方向的基线误差、垂直有效基线误差以及其他系统性误差对高程误差的贡献都可以通过对方程组(24)的求解得到. 该方程组的直接求解非常困难, 用迭代法求解是一种可行的途径, 但由于系数矩阵的条件数非常大, 得到的结果也往往存在较大误差, 或不可信.

考虑到斜距 ρ_1 非常大, 当它作为分母存在时, 远远大于分子, 所以式(22)可以近似写为:

$$h_{err}(x, y) = a_0 + ak_2 x + b_1 y + kxy \quad (25)$$

在任一条距离线上, 对 x 求偏导, 可以得到:

$$\frac{\partial h_{err}(x, y)}{\partial x} = ak_2 + ky \quad (26)$$

代入 $k = k_1 k_2$, 上式可以写为:

$$a + k_1 y = \frac{1}{k_2} \cdot \frac{\partial h_{err}(x, y)}{\partial x} \quad (27)$$

考虑到式(15)中 k_2 的物理意义, 即有:

$$a + k_1 y = \frac{h_{err}(x, y) - h_{err}(0, y)}{\frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(x) - \frac{\partial h}{\partial B_{\parallel}}(0)} \quad (28)$$

根据式(28), 即可对方位任意位置测绘带中心处的视线方向基线误差进行估计.

4 仿真实验

为了验证上述系统性误差估计方法的有效性, 进行了下面的仿真试验.

仿真选取的地面场景为方位向和距离向分别为 3km 的平地, 用到的系统参数如表 2 所示, 各个参数上添加的误差见表 3. 地面控制点均匀布设在场景中, 在方位向和距离向的间距分别为 750m, 如图 3 所示.

表 2 雷达载荷参数

载波频率 (GHz)	9.65
中心下视角 (°)	37.74
发射信号带宽 (MHz)	110
天线方位向尺寸 (m)	4.8
天线距离向尺寸 (m)	0.8
垂直有效基线长度 (m)	1000
沿航迹基线长度 (m)	500

表 3 仿真中的误差输入

误差类型	误差源	误差大小
恒定系统性误差	斜距测量误差 (m)	5
	主天线相位中心位置误差 (m)	1
	主星速度误差 (m/s)	0.1
缓变系统性误差	视线方向基线误差 (m/s)	0.1527
随机性误差	噪声系数 (dB)	4.5
	噪声温度 (K)	293
	基线去相干等	0.97

在上述条件下, 进行 InSAR 全流程处理^[11], 得到的 DEM 产品如图 4 所示. 可以看出, 在方位向高程误差随着基线误差的增加显著增加, 而在距离向 DEM 只有微小的倾斜. 利用地面控制点信息, 对系统性高程误差进行了估计, 并把恒定系统性误差对高程误差的贡献和缓变系统性误差对高程误差的贡献分离开来, 其结果分别如图 5 和图 6 所示, 可以看出, 恒定系统性误差的贡献在整个测绘带内保持不变, 而缓变系统性误差的贡献在方位向变化很大, 在距离向存在微小的倾斜. 图 7 是从总的高程误差中补偿了系统性高程误差的贡献后得到的随机性误差对高程误差的贡献, 可以看出, 随

机性高程误差表现出高斯白噪声特性。

利用系统性高程误差估计结果,通过前文的估计方法对视线方向基线误差进行了反演估计,图 8 是误差估计值和误差真值的对比.其中估计值 1 是控制点无误

差时的估计结果,估计值 2 是控制点上添加了标准差为 0.3m 的误差时的估计结果.可以看出,估计值 1、估计值 2 和真值在每个时刻都非常接近,误差不超过 5mm,随着时间的变化规律一致。

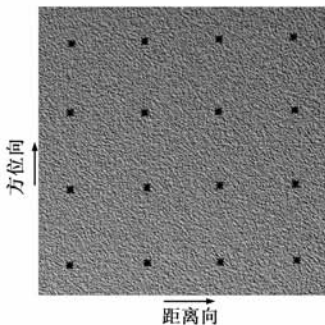


图3 场景及标志点布设

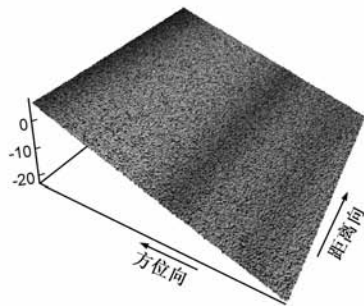


图4 DEM产品

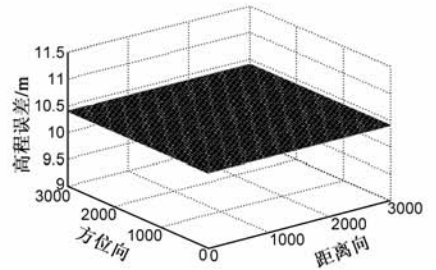


图5 恒定系统性误差导致的高程误差

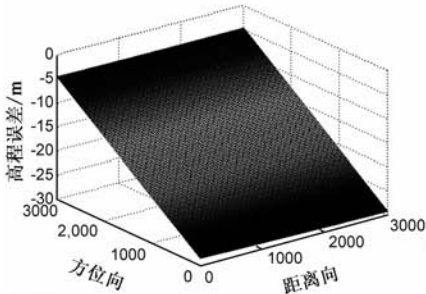


图6 缓变系统性误差导致的高程误差

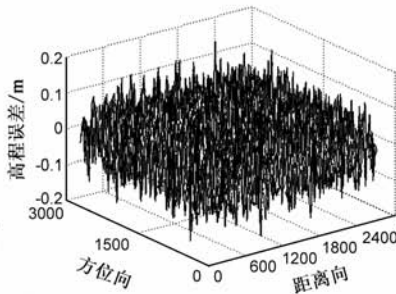


图7 随机性误差导致的高程误差

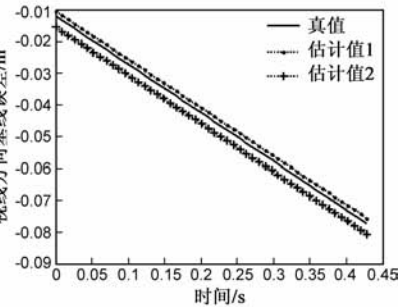


图8 视线方向基线误差估计结果

分别在控制点有无误差两种情况下,统计三种误差对高程的贡献,并和理论值对比,结果见表 4,可以看出,控制点有无误差时的仿真结果差别很小,均和理论值非常接近.这是由于引入了系统性高程误差模型以及最小二乘法,两种方法对控制点高程信息的随机性误差都存在一定的抑制效果。

超过 5mm.由于引入了高程误差模型,所以控制点高程的随机性误差被有效抑制.利用该方法进行基线误差估计,可以避免大条件数系数矩阵的除法,简化了求解过程,得到的估计结果更精确可信.仿真结果证明了该方法的有效性。

表 4 分类高程误差理论结果与仿真结果对比

		理论值	仿真值 1	仿真值 2
恒定系统性误差 (m)		10.35	10.4	10.4
缓变系统性误差 (m)		-4.5 ~ -29.2 线性变化	-4.4 ~ -29.0 线性变化	-4.2 ~ -28.8 线性变化
随机性 误差 (m)	均值	0	-0.0202	-0.0191
	标准差	0.0673	0.0482	0.0574

5 结论

本文从 InSAR 定位基本原理出发,分析了 InSAR 系统的各项误差,并依据其特性进行了分类.以此为基础,利用地面控制点拟合得到整个测绘带内系统性高程误差的分布,系统性高程误差可以分解成固定系统性误差和缓变系统性误差两部分的贡献.用缓变系统性误差对高程的贡献反演获得了视线方向基线误差的估计,得到的估计结果和真值吻合较好,在每个时刻不

参考文献

- [1] G Krieger, et al. Interferometric synthetic aperture radar mission employing formation flying[J]. Proceeding of the IEEE, 2010, 98(5): 816 - 843.
- [2] 周荫清,等.分布式小卫星合成孔径雷达研究进展[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1939 - 1944.
Zhou Yin-qing, et al. Research progress of distributed small satellites synthetic aperture radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 1939 - 1944. (in Chinese)
- [3] Mallorqui J J, et al. Calibration requirements for airborne SAR interferometry[J]. Proceedings of the SPIE, International Society for Optical Engineering, 2000, 4173: 267 - 278.
- [4] 李品,等.基于定标器高程差的 InSAR 参数定标[J]. 中国科学院研究生院学报, 2009, 26(1): 91 - 96.
Li Pin, et al. Parameter calibration based on calibrators' height difference for InSAR system[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2009, 26(1): 91 - 96. (in Chinese)

- [5] H D fan, et al. Study on the methods of InSAR baseline estimation[A]. 2008 International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing[C]. Shanghai: IEEE, 2008. 453 – 455.
- [6] E Sansosti. A simple and exact solution for the interferometric and stereo SAR geolocation problem[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1625 – 1634.
- [7] 黄海风, 等. 主星带辅星编队单基线 InSAR 定位、测高两种方法[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1084 – 1087.
Huang Hai-feng, et al. Two methods of spaceborne multistatic InSAR geolocation and DEM generation[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1084 – 1087. (in Chinese)
- [8] 李洁. 星载 InSAR 多基线干涉测高及编队优化设计方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院. 2007. 12 – 19.
- [9] 王超, 等. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 67 – 98.
- [10] Remco, et al. Precise GRACE baseline determination using GPS[J]. GPS Solutions, 2005, 9(1): 21 – 31.
- [11] 张永胜, 等. 星载分布式 InSAR 测高性能的理论及系统仿真评价方法[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1273 – 1278.

Zhang Yong-sheng, et al. Theoretic and simulation experimental performance evaluation methods of spaceborne distributed InSAR system[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1273 – 1278. (in Chinese)

- [12] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 214 – 247.
- [13] J H Gonzalez, et al. Development of the TanDEM-X calibration concept: Analysis of systematic errors[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 716 – 726.

作者简介



张永俊 男, 1976 年生于陕西咸阳, 现为国防科技大学信息与通信工程专业博士生, 主要研究方向为干涉 SAR、星载分布式 SAR 系统理论等。

E-mail: yj_zhang@nudt.edu.cn

黄海风 男, 1976 年生, 副教授, 主要研究方向为干涉 SAR、星载分布式 SAR 系统理论等。