

直接地理编码与星载干涉 SAR 测高不确定度的等效性分析

徐华平 康昌辉 周荫清

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要: 现有的考虑地球曲率影响的 INSAR 测高模型主要有星载干涉 SAR 测高模型和直接地理编码两种。星载干涉 SAR 测高模型首先利用 SAR 干涉获取非模糊干涉相位, 然后根据考虑地球曲率的空间几何关系直接计算地形高度。而直接地理编码模型则是在 SAR 干涉获取非模糊干涉相位的基础上, 利用两个斜距方程和一个多普勒方程给出地面点的 3 维坐标值。由于两种模型得到地形高程的途径不同, 因此很难直接比较这两种模型的地形测高不确定度。该文在采用矩阵形式推导出直接地理编码模型地形高程不确定度显示表达式的基础上, 通过引入斜距平面坐标系, 量化地证明了直接地理编码模型的高程测量不确定度公式与考虑地球曲率的 SAR 干涉测高模型的测高不确定度公式是相同的, 从而说明了这两种模型在用于地形高程测量时具有相同的精度。最后采用计算机仿真验证了理论分析的正确性。

关键词: SAR; 干涉; 测高模型; 不确定度分析

中图分类号: TN959.2+2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0048-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01470

The Equivalent Analysis of Direct Geocoding Model and Spaceborne INSAR Altitude Model in Height Uncertainty

Xu Hua-ping Kang Chang-hui Zhou Yin-qing

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The height measurement models considering earth curvature of INSAR mainly consist of two kinds—spaceborne interferometric SAR height measurement model and direct geocoding model. Spaceborne interferometric SAR height measurement model gets unambiguous interferometric phases through interferometric SAR, then calculates the terrain height by the spatial geometry considering earth curvature. Direct geocoding model obtains the three-dimensional coordinates using two slant range equations and one Doppler equation, based on the unambiguous interferometric phases. Because the methods getting the terrain height in the two models are different, it is difficult to compare the height measurement uncertainties of the models. Based on matrix theory, the explicit expressions of height uncertainty of direct geocoding model are presented. And it is proven that the height measurement uncertainty formulas of direct geocoding model are the same as that of spaceborne interferometric SAR height measurement model after introducing a new slant range plane coordinate system. Then it is proposed that these two models would lead to the same precision in height measurement. Finally, computer simulation is employed to validate the correctness of the theory analysis.

Key words: SAR; Interferometry; Height measurement model; Uncertainty analysis

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种高分辨率的微波成像雷达, 它具有全天候、全天时对地观测的优势, 并对地物有一定的穿透能力。在 SAR 基础上发展起来的干涉合成孔径雷达技术 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, INSAR) 利用两幅或者多幅 SAR 图像, 通过干涉获取地面 3 维信息, 进一步拓宽了 SAR 系统的应用领域。地形高程测量精度是非常重要的 INSAR 系统指标之

一, 也是衡量 INSAR 系统性能的关键指标之一。在 INSAR 系统设计和总体分析时, 必须进行 INSAR 高程测量精度分析, 以确认最终高程测量精度能否满足设计要求, 并进一步分析其他系统指标是否设计合理^[1]。

INSAR 高程测量精度分析是基于测高模型进行的, 不同测高模型的测高不确定度公式, 即高程测量精度的分析公式, 可能不同。早期由于星载 INSAR 系统分辨率较低、高程测量精度要求也较低, 所以在测高模型中近似认为地球表面为平面^[2-3]。随着系统分辨率和测高精度要求的提高, 出现了考虑地球曲率的星载干涉 SAR 测高模型^[4],

2008-11-07 收到, 2009-10-09 改回

通信作者: 康昌辉 k_changhui@126.com

并被广泛应用于干涉 SAR 的系统设计和性能分析中^[5-7]。文献[4,8]讨论了该干涉测高模型的测高不确定度分析公式。随后在 2000 年 Mora^[9]提出了一种直接地理编码的 3 维定位模型,它利用 INSAR 系统获取的数据,通过直接计算地面点 3 维坐标的直接地理编码方法获取地面点 3 维信息,文献[10]推导了该直接地理编码模型的定位不确定度分析公式。

星载 SAR 干涉测高模型和直接地理编码模型均考虑了地球模型,他们的测高不确定度分析公式是否相同,或者哪一个模型的不确定度分析公式更精确? SAR 干涉测高模型计算的结果是地形高程值,而直接地理编码模型得到的是目标的 3 维坐标,目前关于他们的测高不确定度分析均是分开进行的,因此从现有文献^[4,8,10]推导的结果不能直接得出他们不确定度公式之间的关系。本文在定量推导直接地理编码模型测高不确定度显式表达式的基础上,通过引入斜距平面坐标系的定义,证明了直接地理编码模型和星载干涉 SAR 测高模型在高程不确定度分析上的等效性,最后利用计算机仿真结果验证了论文分析的正确性。

2 星载 INSAR 测高模型

2.1 星载干涉 SAR 测高模型

SAR 干涉测高模型是先利用干涉相位差计算出地形高度,再进行 INSAR 图像的几何校正和地理编码获取经纬度坐标系下的地形高程数字图。考虑地球曲率的 SAR 干涉测高模型的空间几何关系见图 1。图中 A_1, A_2 代表获取同一地面区域时两部天线相位中心的位置,它们之间存在着干涉基线矢量 \mathbf{B} , 长度为 B , 与水平方向夹角为 ξ , 即基线倾角。 R_e 为星下点处的地球半径。 A_1 与地面参考平面之间的高度差为 H , 距离地面点的斜距为 r , 则 $r + \Delta r$ 为 A_2 距离同一地面点的斜距, h 为地面点相对于参考平面的高度。

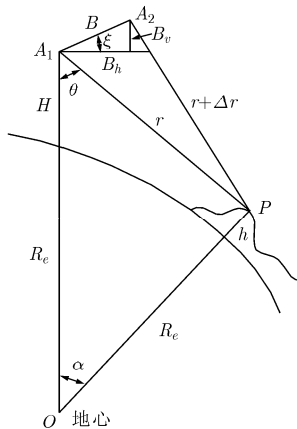


图 1 考虑地球曲率的 INSAR 空间几何关系

令两幅 SAR 图像的非模糊干涉相位为 ψ , 有 $\Delta r = (\lambda/(4\pi))\psi$ 。根据图 1 所示空间几何关系, 可得

$$h = \sqrt{(R_e + H)^2 + r^2 - 2r(R_e + H)\cos\theta} - R_e \quad (1)$$

其中

$$\cos\theta = \cos\xi\sqrt{1 - \sin^2(\theta - \xi)} - \sin\xi\sin(\theta - \xi),$$

$$\sin(\theta - \xi) = \frac{r^2 + B^2 - (r + \frac{\lambda}{4\pi}\psi)^2}{2rB}$$

2.2 直接地理编码模型

Mora^[9]提出的直接地理编码模型是通过直接计算地面点 3 维坐标获取地面数字高程图, 其空间几何关系仍如图 1 所示。

在 Mora 提出的测高模型中, 令 A_1, A_2 之间的干涉基线矢量为 $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$, 假设 A_1 的位置矢量为 $\mathbf{R}_{s_1} = (R_{s_1x}, R_{s_1y}, R_{s_1z})$, 地面目标的位置矢量为 $\mathbf{R}_p = (R_{px}, R_{py}, R_{pz})$, A_1 与地面目标之间的斜距为

$$r = |\mathbf{R}_{s_1} - \mathbf{R}_p| \quad (2)$$

式中 $|\cdot|$ 表示求矢量幅度值。同理可得到 A_2 与地面目标之间的斜距为

$$r + (\lambda/(4\pi))\psi = |\mathbf{R}_{s_1} + \mathbf{B} - \mathbf{R}_p| \quad (3)$$

假设 A_1 的速度为 $\mathbf{V}_{s_1} = (V_{s_1x}, V_{s_1y}, V_{s_1z})$, 地面目标速度为 $\mathbf{V}_p = (V_{px}, V_{py}, V_{pz})$, 则根据多普勒方程有

$$f_d = \frac{2}{\lambda r} (\mathbf{V}_{s_1} - \mathbf{V}_p) \cdot (\mathbf{R}_{s_1} - \mathbf{R}_p) \quad (4)$$

其中 f_d 为多普勒中心频率, 在成像于零多普勒平面时有 $f_d = 0$, 本文的讨论都是针对零多普勒平面进行的。

联合两个斜距方程式(2), 式(3)和一个多普勒方程式(4)即可得到地面目标点的 3 维坐标, 从而可以直接进行地理编码获取地面数字高程图。在获得地面点在转动地心坐标系下的 3 维坐标 \mathbf{R}_p 之后, 其高度为

$$h = |\mathbf{R}_p| - R_e \quad (5)$$

3 星载 INSAR 测高不确定度分析

3.1 SAR 干涉测高模型

对式(1)求偏微分, 可以得到在考虑地球曲率的 SAR 干涉测高模型中, 各个参数不确定度对高程测量精度的贡献分别为

$$\sigma_h^H \approx \sigma_H \quad (6a)$$

$$\sigma_h^r \approx \left(\frac{R_H}{R_h} \cdot \cos\theta - \frac{r}{R_h} \right) \sigma_r \quad (6b)$$

$$\sigma_h^B \approx \frac{R_H}{R_h} \cdot \frac{r \sin\theta \sin(\theta - \xi)}{B \cos(\theta - \xi)} \sigma_B \quad (6c)$$

$$\sigma_h^\xi = \frac{R_H}{R_h} \cdot r \sin \theta \sigma_\xi \quad (6d)$$

$$\sigma_h^\psi = \frac{R_H}{R_h} \cdot \frac{r \lambda \sin \theta}{4\pi B \cos(\theta - \xi)} \sigma_\psi \quad (6e)$$

式中 $R_H = R_e + H$, $R_h = \sqrt{(R_H)^2 + r^2 - 2rR_H \cos \theta} = R_e + h$ 。由于正负号对误差传递的计算没有影响, 为了分析方便, 上述公式以及后面的分析中忽略了正负号。

考虑关系式 $B_H = B \cos \xi$, $B_V = B \sin \xi$, 由全微分公式, 可以求得基线坐标分量测量不确定度对高程测量不确定度的贡献为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_h^{B_H} &\approx \frac{R_H}{R_h} \cdot \frac{r \sin \theta \sin \theta}{B \cos(\theta - \xi)} \sigma_{B_H} \\ \sigma_h^{B_V} &\approx \frac{R_H}{R_h} \cdot \frac{r \sin \theta \cos \theta}{B \cos(\theta - \xi)} \sigma_{B_V} \end{aligned} \right\} \quad (6f)$$

根据误差综合原理, 假设各误差因素之间是不相关的, 则总的高程测量不确定度 σ_h 是式(6a)~式(6e)各误差分量的几何平均, 即

$$\sigma_h = \sqrt{(\sigma_h^H)^2 + (\sigma_h^r)^2 + (\sigma_h^{B_H})^2 + (\sigma_h^{B_V})^2 + (\sigma_h^\psi)^2} \quad (7)$$

3.2 直接地理编码模型

直接地理编码中影响地形高度测量精度的误差源主要有卫星位置测量误差、卫星速度测量误差、斜距测量误差、基线测量误差以及非模糊干涉相位估计误差等 5 类误差源。联合式(2)~式(5)分别求各误差参数的偏导, 可得到各误差参数不确定度对高度误差的贡献。

(1) 卫星位置测量误差对高程测量精度的影响。高程参量 h 分别对卫星位置 3 坐标分量求导, 令卫星位置 3 坐标分量上的测量不确定度分别为 $\sigma_{R_{sx}}$ 、 $\sigma_{R_{sy}}$ 、 $\sigma_{R_{sz}}$, 考虑到通常有 $\sigma_{R_{sx}} = \sigma_{R_{sy}} = \sigma_{R_{sz}} = \sigma_{R_s}$, 则得到

$$\sigma_h^{R_{s1}} = \left[\frac{R_{px}}{R_h} \quad \frac{R_{py}}{R_h} \quad \frac{R_{pz}}{R_h} \right]^T \sigma_{R_s} \quad (8)$$

(2) 卫星速度测量误差对高程测量精度的影响。同样, 高程参量 h 分别对卫星速度 3 坐标分量求导, 令卫星速度 3 坐标分量上的测量不确定度分别为 $\sigma_{V_{sx}}$ 、 $\sigma_{V_{sy}}$ 、 $\sigma_{V_{sz}}$, 考虑到通常有卫星速度 3 坐标测量不确定度相同, 即 $\sigma_{V_{sx}} = \sigma_{V_{sy}} = \sigma_{V_{sz}} = \sigma_{V_s}$, 则得到

$$\sigma_h^V = \begin{bmatrix} (R_{s1x} - R_{px}) & 0 & 0 \\ (R_{s1y} - R_{py}) & 0 & 0 \\ (R_{s1z} - R_{pz}) & 0 & 0 \end{bmatrix} (\mathbf{D}^{-1})^T \begin{bmatrix} R_{px} \\ R_{py} \\ R_{pz} \end{bmatrix} \sigma_{V_s} \quad (9)$$

(3) 斜距测量误差对高程测量精度的影响。高程参量 h 对斜距 r 求导, 取 $f_d = 0$, 得到

$$\sigma_h^r = - \left[0 \quad r \quad \left(r + \frac{\lambda}{4\pi} \psi \right) \right] (\mathbf{D}^{-1})^T \begin{bmatrix} R_{px} & R_{py} & R_{pz} \\ R_h & R_h & R_h \end{bmatrix}^T \sigma_r \quad (10)$$

(4) 基线测量误差对高程测量精度的影响。高程参量 h 分别对基线 3 坐标分量求导, 令基线 3 坐标分量上的测量不确定度分别为 σ_{B_x} , σ_{B_y} , σ_{B_z} , 则得到

$$\sigma_h^B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & (R_{s1x} - R_{px} + B_x) \sigma_{B_x} \\ 0 & 0 & (R_{s1y} - R_{py} + B_y) \sigma_{B_y} \\ 0 & 0 & (R_{s1z} - R_{pz} + B_z) \sigma_{B_z} \end{bmatrix} (\mathbf{D}^{-1})^T \begin{bmatrix} R_{px} & R_{py} & R_{pz} \\ R_h & R_h & R_h \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

(5) 相位估计误差对高程测量精度的影响。高程参量 h 对非模糊干涉相位 ψ 求导, 取 $f_d = 0$, 得到

$$\sigma_h^\psi = \left[0 \quad 0 \quad \frac{\lambda}{4\pi} \left(r + \frac{\lambda}{4\pi} \psi \right) \right] (\mathbf{D}^{-1})^T \begin{bmatrix} R_{px} & R_{py} & R_{pz} \\ R_h & R_h & R_h \end{bmatrix}^T \sigma_\psi \quad (12)$$

在式(9)~式(12)中

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} V_{sx} & V_{sy} & V_{sz} \\ R_{sx} - R_{px} & R_{sy} - R_{py} & R_{sz} - R_{pz} \\ R_{sx} - R_{px} + B_x & R_{sy} - R_{py} + B_y & R_{sz} - R_{pz} + B_z \end{bmatrix}$$

4 两种星载 INSAR 测高模型测高不确定度的等效性证明

为了数学公式上化简的方便, 定义斜距平面坐标系, 其坐标原点在地心, z 方向为地心与卫星位置的连线, 指向卫星位置方向为正; y 方向为卫星飞行方向; x 方向与 y , z 构成右手坐标系。以下的讨论均在该坐标系下进行。

(1) 卫星位置测量不确定度引起高程测量不确定度的等效性。考虑式(8)给出的卫星位置测量不确定度引起的高程测量不确定度, 一般假设 3 轴坐标测量误差之间不相关, 则有卫星位置测量误差引起的总的高程测量不确定度为

$$\sigma_h^{R_{s1}} = \sqrt{\left(\frac{R_{px}}{R_h} \right)^2 + \left(\frac{R_{py}}{R_h} \right)^2 + \left(\frac{R_{pz}}{R_h} \right)^2} \cdot \sigma_{R_s} = \sigma_{R_s} \quad (13)$$

同理有 $\sigma_H = \sigma_{R_{sz}}$, 所以有

$$\sigma_h^{R_{s1}} = \sigma_H \quad (14)$$

比较式(6a)和式(14)可见, 直接地理编码模型与星载干涉 SAR 测高模型中卫星位置测量不确定度对地形高程测量不确定度的影响是相同的。

(2) 卫星速度测量不确定度引起高程测量不确定

度的等效性。对于式(9)给出的卫星速度测量不确定度对高程测量不确定度的影响,由于 INSAR 系统中常采用 SAR 成像于零多普勒平面,可以认为卫星飞行方向垂直于基线矢量。则有

$$\sigma_h^V = \frac{\sigma_{V_{sx}}}{R_h \det(\mathbf{D})} (\mathbf{R}_{s_1} - \mathbf{R}_p) [(\mathbf{R}_{s_1} - \mathbf{R}_p) \times \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}_p] \quad (15)$$

其中, \times 表示矢量叉乘, $\det(\cdot)$ 表示矩阵的行列式。观察式(15), 由于 $(\mathbf{R}_{s_1} - \mathbf{R}_p) \times \mathbf{B}$ 一定垂直于矢量 \mathbf{R}_p , 所以 $(\mathbf{R}_{s_1} - \mathbf{R}_p) \times \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}_p = 0$, 因此有

$$\sigma_h^V = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (16)$$

由式(16)知道速度测量误差不会影响高程测量误差, 这与星载干涉 SAR 测高模型的结论是相同的。

(3)斜距测量不确定度引起高程测量不确定度的等效性。对于式(10)给出的斜距测量不确定度对高程测量不确定度的影响, 在斜距平面坐标系下计算该式, 得

$$\sigma_h^r = \frac{\sigma_r V_{s_1y}}{\det(\mathbf{D})} \left\{ \frac{R_{px}}{R_h} \left[r B_z - \frac{\lambda}{4\pi} \psi (R_{s_1z} - R_{pz}) \right] + \frac{R_{pz}}{R_h} \left[\frac{\lambda}{4\pi} \psi (R_{s_1x} - R_{px}) - r B_x \right] \right\} \quad (17)$$

其中 $\det(\mathbf{D}) = V_{s_1y} [B_x (R_{s_1z} - R_{pz}) - B_z (R_{s_1x} - R_{px})]$ 。

根据图 1 所示的 INSAR 空间几何关系, 在斜距平面坐标系下有

$$\begin{aligned} B_x &= B \cos \xi, \quad B_z = B \sin \xi, \quad R_{px} = R_h \sin \alpha, \\ R_{pz} &= R_h \cos \alpha, \quad R_{s_1x} - R_{px} = -r \sin \theta, \\ R_{s_1z} - R_{pz} &= r \cos \theta, \quad \frac{\lambda}{4\pi} \psi \approx -B \sin(\theta - \xi) \end{aligned} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17), 进行化简, 并考虑图 1 所示的几何关系, 得

$$\sigma_h^r = \frac{R_H \cos \theta - r}{R_h} \sigma_r \quad (19)$$

比较式(19)和式(6b)知道, 直接地理编码模型与星载干涉 SAR 测高模型中斜距测量不确定度对地形高程测量不确定度的影响是相同的。

(4)基线测量不确定度引起高程测量不确定度的等效性。在斜距平面坐标系下计算式(11), 有

$$\sigma_h^{B_x} = \frac{\sigma_{B_x} V_{s_1y}}{\det(\mathbf{D})} \left[\frac{R_{px}}{R_h} (R_{s_1z} - R_{pz}) - \frac{R_{pz}}{R_h} (R_{s_1x} - R_{px}) \right] \cdot (R_{s_1x} - R_{px} + B_x) \quad (20)$$

$$\sigma_h^{B_z} = \frac{\sigma_{B_z} V_{s_1y}}{\det(\mathbf{D})} \left[\frac{R_{px}}{R_h} (R_{s_1z} - R_{pz}) - \frac{R_{pz}}{R_h} (R_{s_1x} - R_{px}) \right] \cdot (R_{s_1z} - R_{pz} + B_z) \quad (21)$$

将式(18)代入式(20)和式(21), 考虑图 1 所示的几何关系, 并根据 $B \ll r$ 进行近似, 得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_h^{B_x} &\approx \frac{R_H}{R_h} \cdot \frac{r \sin \theta \sin \theta}{B \cos(\theta - \xi)} \sigma_{B_x} \\ \sigma_h^{B_z} &\approx \frac{R_H}{R_h} \cdot r \frac{\sin \theta \cos \theta}{B \cos(\theta - \xi)} \sigma_{B_z} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

由图 1 以及斜距平面坐标系的定义知道, $B_x = B_H$ 、 $B_z = B_V$, 比较式(22)和式(6f)知道, 直接地理编码模型与星载干涉 SAR 测高模型中基线测量不确定度对地形高程测量不确定度的影响是相同的。

(5)干涉相位估计不确定度引起高程测量不确定度的等效性。在斜距平面坐标系下计算式(12), 有

$$\sigma_h^\psi = \frac{\sigma_\psi V_{sy}}{\det(\mathbf{D})} \frac{\lambda}{4\pi} \left(r + \frac{\lambda}{4\pi} \psi \right) \cdot \left[\frac{R_{px}}{R_h} (R_{s_1z} - R_{pz}) - \frac{R_{pz}}{R_h} (R_{s_1x} - R_{px}) \right] \quad (23)$$

将式(18)代入式(23), 考虑 $B \ll r$ 进行近似, 化简得

$$\sigma_h^\psi \approx \frac{R_H}{R_h} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \frac{r \sin \theta}{B \cos(\theta - \xi)} \sigma_\psi \quad (24)$$

比较式(24)和式(6e)知道, 直接地理编码模型与星载干涉 SAR 测高模型中干涉相位估计不确定度对地形高程测量不确定度的影响是相同的。

5 计算机仿真及结果分析

为了验证本文分析的正确性, 对具有表 1 所示参数的 INSAR 系统进行测高不确定度分析, 其中, 卫星高度为 350 km, 各参数的测量不确定度见表 2, 非模糊干涉相位的估计不确定度通过最大似然估计的克拉美-罗界给出, 即^[11]

$$\sigma_\psi = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{look}}} \cdot \frac{1 - \rho^2}{\rho^2}} \quad (25)$$

其中 N_{look} 为干涉复图像的多视平均视数, ρ 为 INSAR 中干涉复图像对的相关系数。

表 1 INSAR 主要系统参数

系统参数	数值
波长	0.03 m
视角	35°
信号带宽	100 MHz
信噪比	1.56 dB
模糊度(距离, 方位)	-25 dB, -18 dB
基线长度	100-200 m
基线倾角	35°
多视平均视数	1

表2 各主要参数测量不确定度

卫星位置测量不确定度	(1 m, 1 m, 1 m)
卫星速度测量不确定度	(0.05 m/s, 0.05 m/s, 0.05 m/s)
斜距测量不确定度	2 m
基线3轴测量不确定度	0.005 m

在仿真计算中,考虑地球曲率模型的不确定度分析采用式(6),直接地理编码模型的不确定度分析公式采用式(8)-式(12),其在斜距平面坐标系下的各位置和速度矢量均根据INSAR空地几何关系和坐标转换来计算得到。为了与平地模型比较,同时仿真中还给出了平地测高模型的测高不确定度。

图2给出了直接地理编码模型中卫星速度3轴测量不确定度综合起来引起的测高不确定度随基线长度的变化曲线。可以看出与式(16)给出的理论分析结果是吻合的,即卫星速度测量误差对测高没有影响。图3给出的是3种模型中卫星位置测量不确定度引起的测高不确定度随基线长度的变化曲线。为了书写方便,模型1表示平地SAR干涉测高模型,模型2为考虑星载干涉SAR测高模型,模型3为直接地理编码模型。可以看出3种模型中的曲线是重合的,与理论分析相吻合。

图4给出了3种模型中斜距测量不确定度引起的测高不确定度随基线长度的变化曲线。可以看出:

与理论分析相符合,模型2和模型3的曲线基本重合,它们两个很小差异是由于模型2不确定公式推导中采用了一定的近似;而模型1比模型2和模型3的值偏大。

图5-图7分别给出了水平向基线、垂直向基线以及非模糊干涉相位的不确定度引起的测高不确定度随基线长度的变化。可以看出:与理论分析相符合,模型2和模型3的曲线基本重合,它们两个很小差异是由于模型2不确定公式推导中采用了一定的近似;而模型1比模型2和模型3的值偏小。3种模型分析的总的测高不确定度如图8所示。由图知道,模型2和模型3得到的分析结果一致,而模型1给出的分析值比其他两个偏小。

6 结论

本文主要讨论和比较了直接地理编码模型和星载干涉SAR测高模型的测高不确定度。推导了直接地理编码模型的测高不确定度公式,证明了他与星载干涉SAR测高模型测高不确定度之间的等效性,得到以下结论:(1)直接地理编码模型与星载干涉SAR测高模型的不确定分析公式相同,这说明直接地理模型并非真正的新的测高模型,他仅仅在数据处理上与考虑地球曲率模型不同,而从总体分析的角度来讲,直接地理编码模型的测高数学模型实际上与星载干涉SAR测高模型相同。(2)与平地测高

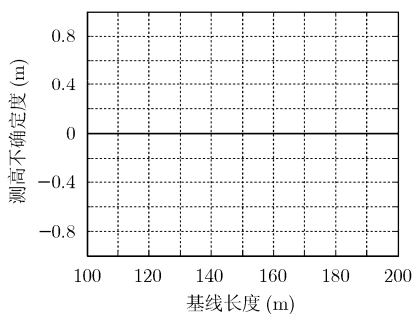


图2 直接地理编码模型中卫星速度测量不确定度引起的测高不确定度

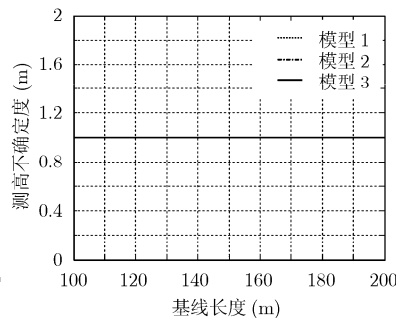


图3 3种模型卫星位置测量不确定度引起的测高不确定度比较

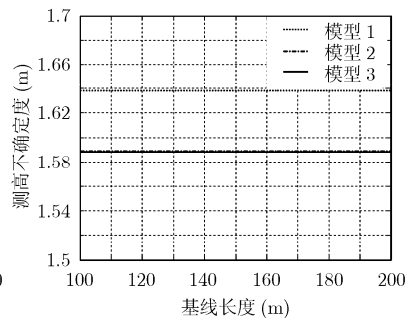


图4 斜距测量不确定度引起的测高不确定度

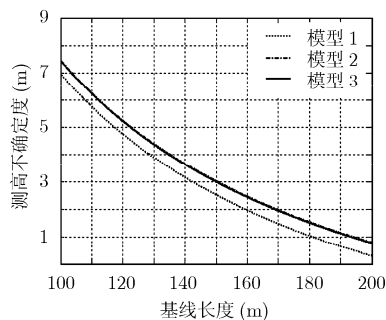


图5 水平基线分量测量不确定度引起的测高不确定度

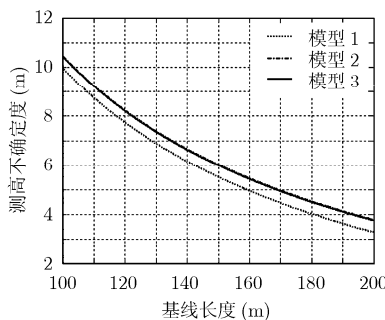


图6 垂直基线分量测量不确定度引起的测高不确定度

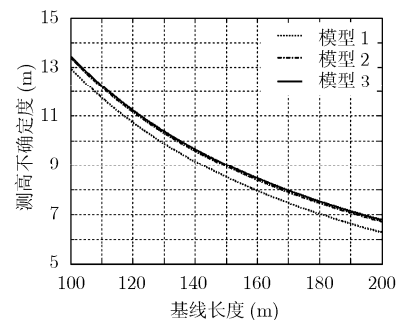


图7 非模糊干涉相位估计不确定度引起的测高不确定度

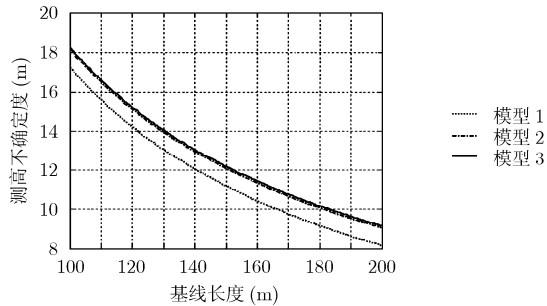


图 8 总的测高不确定度

模型相比，直接地理编码模型和星载干涉 SAR 测高模型更为精确。平地的假设使得平地模型中斜距测量不确定度引起的高程不确定度偏大，而其他 4 个因素引起的高程不确定度偏小。

参考文献

- [1] Ferraiuolo G, Meglio F, and Pascazio V, *et al.* DEM reconstruction accuracy in multichannel SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47 (1): 191-201.
- [2] Zebker H A, Werner C L, and Rosen R A, *et al.* Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 823-836.
- [3] Seymour M S and Scheuer T E. Aspects of terrain height estimation using interferometric SAR [C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '92*, 1992, (2): 1573-1575.
- [4] Rosen P A, Hensley S, and Joughin I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry [C]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
- [5] Knedlik S, Loffeld O, and Nies H. Sensitivity of DEMs generated from interferometric cartwheel configurations[C]. 2003 IGARSS: Learning From Earth's Shapes and Colours, Toulouse France, July 21-25 2003, (6): 3805-3807.
- [6] Eineder M and Adam N. A maximum-likelihood estimator to simultaneously unwrap, geocode, and fuse SAR interferograms from different viewing geometries into one digital elevation model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(1): 24-36.
- [7] 孙造宇, 梁甸农, 张永胜. 星载 InSAR 系统 DEM 重建及其误差分析[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(6): 1336-1340.
Sun Z Y, Liang D N, and Zhang Y S. Method and error analysis of DEM reconstruction for spaceborne InSAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1336-1340.
- [8] Abdelfattah R and Nicolas J M. Topographic SAR interferometry formulation for high-precision DEM generation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 40(11): 2415-2426.
- [9] Mora O, Agustí O, and Bara M, *et al.* Direct geocoding for generation of precise wide-area elevation models with ERS SAR data [C]. *Fringe'99 Advancing ERS SAR Interferometry from Applications Towards Operations*, Liege Belgium, November 10-12, 1999, (478): 449-455.
- [10] 谷德峰, 易东云, 朱炬波, 等. 分布式 InSAR 三维定位的闭合形式解及其精度分析[J]. *电子学报*, 2007, 35(6): 1026-1031.
Gu D F, Yi D Y, and Zhu J B, *et al.* Closed-form solution of distributed InSAR geolocation and its precision analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1026-1031.
- [11] 徐华平, 周荫清, 李春升, 等. 分布式小卫星 SAR 回波信号的相关性[J]. *电子学报*, 2005, 33(6): 965-969.
Xu H P, Zhou Y Q, and Li C S. Correlation of distributed small satellites SAR echoes[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 965-969.

徐华平：女，1977 年生，博士，副教授，从事信息获取与处理、高分辨率雷达成像、干涉 SAR、SCANSAR、分布式小卫星 SAR 等方面的研究工作。

康昌辉：男，1984 年生，硕士生，从事信息获取与处理、高分辨率雷达成像、干涉 SAR 等方面的研究工作。

周荫清：男，1936 年生，教授，博士生导师，主要从事信号与信息处理、雷达系统仿真、高分辨率雷达成像、电子对抗、时空二维自适应信号处理、分布式小卫星等方面的研究工作。