

文章编号:1671-8860(2007)02-0108-04

文献标志码:A

InSAR 高程模型及其精度分析

张磊¹ 伍吉仓^{1,2} 陈艳玲³

(1 同济大学测量与国土信息工程系,上海市四平路 1239 号,200092)
(2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(3 中国科学院上海天文台,上海市南丹路 80 号,200030)

摘要:提出了一种改进的 InSAR 高程模型,建立了高程和干涉相位的直接关系,并对公式推导中一般采用的平行射线近似处理方法所引入的高程误差进行了量化分析。结果表明,对于星载雷达而言,平行射线近似误差不能忽略。给出了近似误差与基线参数的确定性关系及相应的误差传播曲线,有助于误差纠正和重建高精度 DEM。另外,基于改进的高程模型,推导出了高程测量误差传播公式,明确了基线长度和方向对测高精度的影响,对合理选择干涉像对具有指导意义。

关键词:雷达干涉测量;高程模型;基线;平行射线近似;误差传播

中图法分类号:TP751; P237.3

雷达干涉测量(InSAR)基于传感器的系统参数、姿态参数和轨道间的几何关系等,可以重建高精度的地面高程模型^[1,2]。

最早的 InSAR 高程模型是以水平分开的机载双天线系统为背景,高程信息来自于在相干叠加中因相位相互抵消而形成的暗条纹^[3]。由于没有利用所有的相干相位而只利用了相位差为 $(2k+1)\pi$ 的少量像素,故高程测量的精度较低。Currie^[4]等提出的高程模型在解释 InSAR 原理时被广泛引用。该模型中相位差和高程分属于不同的表达式,二者之间的联系不够直观^[5];同时,对高程模型推导中的平行射线假设所产生的误差缺乏定量分析。

本文在 Currie 等的高程模型基础上,提出了一种改进的高程模型公式,建立了高程与相位的直接联系;并对采用的平行射线近似处理方法所引入的高程误差进行了深入分析,给出了近似误差及由近似误差引起的高程误差随基线长度和倾角变化的曲线;最后,基于改进的高程模型,推导出高程测量误差传播公式,明确了基线长度和倾角对测高精度的影响。

1 InSAR 高程模型

图 1 表示卫星轨道与地面目标的相对几何位

置^[6]。图中假设地球表面为平面,且无形变。

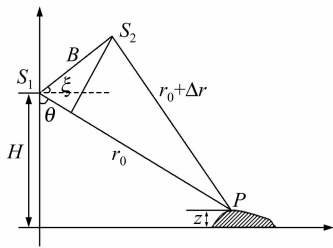


图 1 InSAR 成像几何
Fig. 1 Geometry of InSAR

图 1 中, S_1 和 S_2 为两次航过时的卫星位置,地面点 P 的高程为 z ,假设地球表面为平面和无形变并不失去一般性,只是为了表达式形式上的简洁。地面点 P 的高程可表示为:

$$z = H - r_0 \cos \theta \tag{1}$$

根据 Zebker 等提出的平行射线近似处理方法^[7],有:

$$\sin(\theta - \xi) = -\frac{\Delta r}{B} \tag{2}$$

联合式(1)、式(2),得:

$$\begin{aligned} z &= H - r_0 \cos \theta = \\ H - r_0 \left[\cos \xi \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta r}{B} \right)^2} + \frac{\Delta r}{B} \cdot \sin \xi \right] \end{aligned} \tag{3}$$

根据式(1)~式(3),利用卫星高度 H 、基线 B 、基线倾角 ξ 以及斜距差 Δr 即可确定高程 z 。

Δr 与干涉相位 ϕ 有着密切的联系。假设两次成像期间,地物散射特性没有变化,并忽略因雷达波信号延迟而产生的相位误差,则干涉相位可表示为:

$$\phi = -\frac{4\pi\Delta r}{\lambda} \tag{4}$$

代入式(3)得:

$$z = H - r_0 \left[\cos\xi \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda\phi}{4\pi B} \right)^2} - \frac{\phi}{4\pi} \cdot \frac{\lambda}{B} \cdot \sin\xi \right] \tag{5}$$

式(5)即为在地表平坦且无形变假设下,高程与干涉相位的关系式,该式将高程与干涉相位联系在一起,直接表达了地面高程与干涉相位之间的关系。在高程精度评定上,该式能够全面反映出基线参数 (B, ξ) 对地面高程的影响,而不只是仅考虑有效基线 B_{\perp} 的贡献^[7],这样得到的结论更明确,对更好地设计干涉测量系统有帮助。

2 平行近似处理的误差

以上分析采用了 Zebker 提出的平行射线近似处理方法,即将斜距差 Δr 近似为基线沿视线方向的分量(如图 2 所示):

$$\Delta r = -B \sin(\theta - \xi) \tag{6}$$

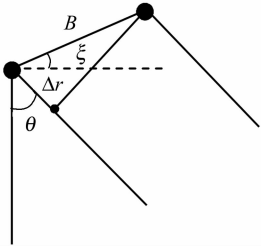


图 2 平行射线近似
Fig. 2 Parallel Ray Approximation

根据图 1,在非近似情况下,有:

$$\Delta r = \sqrt{B^2 + r_0^2 - 2Br_0 \sin(\theta - \xi)} - r_0 \tag{7}$$

所以,产生的近似误差 ϵ 为:

$$\epsilon = \sqrt{B^2 + r_0^2 - 2Br_0 \sin(\theta - \xi)} - r_0 + B \sin(\theta - \xi) \tag{8}$$

由式(8)可知,当给定参数 r_0 和 θ 时,近似误差 ϵ 是基线参数 (B, ξ) 的函数。在文献[9]的基础上,给出了 $r_0 = 850 \text{ km}$ 、 $\theta = 21^\circ$ 时,误差 ϵ 随 B 、 ξ 变化的曲线,见图 3。

可以看到,随基线 B 的增大,近似误差 ϵ 也随之增大,在极限基线处($B = 1\,050 \text{ m}$)的最大误差约 700 mm ,而 ERS-1/2 卫星的雷达波波长为

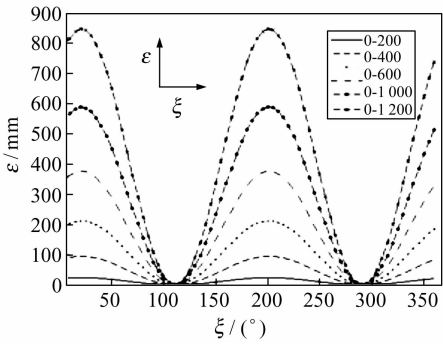


图 3 近似误差 ϵ 随 B 、 ξ 变化的曲线
Fig. 3 Curves of Approximation Errors

5.66 cm ,显然近似误差不能忽略。但由于轨道精度及相位模糊度问题, Δr 的精确求解尚有难度。

3 平行近似误差对测高精度的影响

3.1 斜距误差传播系数

平行近似误差属于斜距差误差,要确定其对测高精度的影响,需首先确定斜距误差传播系数。由式(3)得:

$$\partial z = -r_0 \left[\cos\xi \frac{-2\left(\frac{\Delta r}{B}\right) \cdot \frac{1}{B} \cdot \partial \Delta r}{2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta r}{B}\right)^2}} + \frac{\sin\xi}{B} \cdot \partial \Delta r \right] \tag{9}$$

将式(2)代入,并整理:

$$\begin{aligned} \partial z &= -\frac{r_0}{B} \cdot \frac{\cos\xi \sin(\theta - \xi) + \sin\xi \cos(\theta - \xi)}{\cos(\theta - \xi)} \cdot \partial \Delta r \\ \partial \Delta r &= -\frac{r_0}{B} \cdot \frac{\sin\theta}{\cos(\theta - \xi)} \cdot \partial \Delta r \end{aligned} \tag{10}$$

所以,

$$\sigma_z^{\Delta r} = \frac{r_0}{B} \cdot \frac{\sin\theta}{\cos(\theta - \xi)} \cdot \sigma_{\Delta r} \tag{11}$$

定义 $\sigma_z^{\Delta r} / \sigma_{\Delta r}$ 为斜距误差传播系数,图 4 表示在 $r_0 = 850 \text{ km}$ 、 $\theta = 21^\circ$ 时,传播系数随基线参数 (B, ξ) 的变化曲线。由图 4 并结合公式(11)可知,斜距误差传播系数对 ξ 的变化并不敏感,但量级较大,均在 $10^2 \sim 10^3$ 的水平上,即当斜距差有 1 mm 的误差,传播到高程上则达到了几十 cm 至数 m 。在给定基线倾角时,斜距误差传播系数随基线长度的增大而减少。地球曲率、地形、大气延迟、相位测量以及其他数据处理误差如多视处理误差、插值误差、失配误差、滤波误差以及数值计算的舍入误差等,最终都会对斜距差的精度产生影响,所以在利用 InSAR 技术生成 DEM 时,

应在不造成严重去相干的情况下尽量选取具有较长基线的影像对。

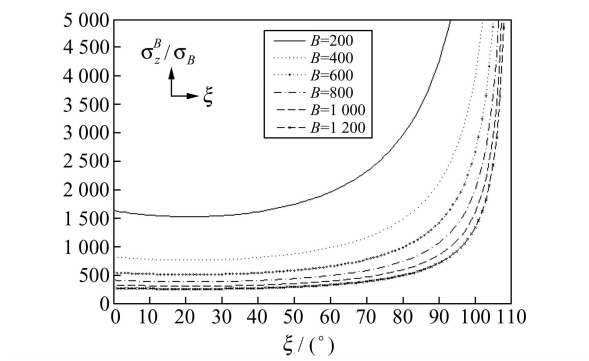


图 4 ξ 在 $[0^\circ 110^\circ]$ 变化时的误差传播曲线
Fig. 4 Curves of Range Difference Error for $\xi \in [0^\circ 110^\circ]$

3.2 平行近似误差对测高精度的影响

结合式(8)和式(11),可以得到平行射线近似误差对测高精度的影响表达式:

$$\epsilon_z = \frac{r_0}{B} \cdot \frac{\sin\theta}{\cos(\theta - \xi)} \cdot (\sqrt{B^2 + r_0^2 - 2Br_0\sin(\theta - \xi)} - r_0 + B\sin(\theta - \xi)) \quad (12)$$

图 5 表示因平行射线近似处理而带来的高程误差随基线参数(B, ξ)的变化曲线。图 5 中, $r_0 = 850 \text{ km}, \theta = 21^\circ$ 。

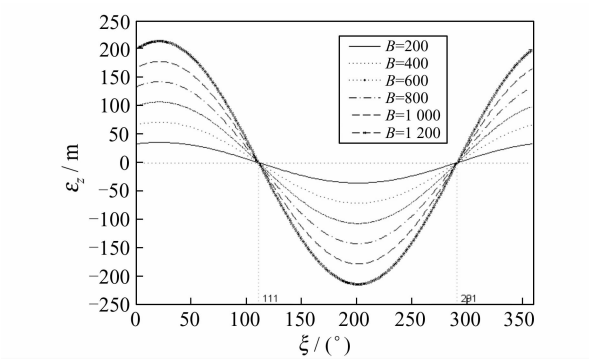


图 5 误差传播曲线
Fig. 5 Approximation Errors of Elevation Using Parallel Ray Approximation

可以看到,随基线 B 的增大,高程误差 ϵ_z 也随之增大,对 ξ 的敏感性也越高。经计算,在极限基线处的最大误差约达 188.12 m。所以,采用近似处理方法,只能得到概略性的景观模型,要重建高精度的 DEM,必须考虑近似处理所引入的高程误差。

4 高程精度分析

对于高程精度分析,一些学者将基线长度和

基线倾角转换为水平基线分量和铅垂基线分量,降低了问题的复杂性,但是基线长度和方向分别对测高精度的影响程度到底怎样,哪一个主要因素还不够明确^[10]。为了确定基线长度和方向分别对测高精度的影响程度,直观上根据式(5),对 B 和 ξ 分别求偏导数,即可得出结论。文献[10]即采用了此方法,过程较繁琐,现采用如下较为简便的方法推导相应的误差传播公式。

由式(2)和式(4),有:

$$\sin(\theta - \xi) = -\frac{\lambda}{B} \cdot \frac{\phi}{4\pi} \quad (13)$$

将式(13)中的 θ 看作 (B, ξ) 的函数,则对 B 求偏导数,有:

$$\cos(\theta - \xi) \partial\theta = \frac{\lambda}{B^2} \cdot \frac{\phi}{4\pi} \cdot \partial B = -\frac{\sin(\theta - \xi)}{B} \cdot \partial B \quad (14)$$

即

$$\partial\theta = -\frac{\tan(\theta - \xi)}{B} \cdot \partial B \quad (15)$$

对 ξ 求偏导数,有:

$$\partial\theta = \partial\xi \quad (16)$$

结合式(1),有:

$$\partial z = r_0 \sin\theta \cdot \partial\theta = -\frac{r_0}{B} \cdot \sin\theta \cdot \tan(\theta - \xi) \cdot \partial B \quad (17)$$

所以,

$$\sigma_z^B = \frac{r_0}{B} \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\theta - \xi) \cdot \sigma_B \quad (18)$$

$$\partial z = r_0 \sin\theta \cdot \partial\theta = r_0 \cdot \sin\theta \cdot \partial\xi \quad (19)$$

因此,有:

$$\sigma_z^\xi = r_0 \sin(\theta) \cdot \sigma_\xi \quad (20)$$

式(18)和式(20)即为基线长度和倾角估算误差对高程精度影响的误差评定公式。

定义 σ_z^B / σ_B 为基线长度误差传播系数,图 6 给出了基线长度误差传播系数随基线参数(B, ξ)的变化曲线。由图 6 及式(18)可知,在 ξ 相同的情况下,基线长度越大,产生的误差越小,当 B, r_0 和 θ 确定后,基线长度的估算误差对高程测量精度的影响程度与基线的倾角 ξ 有很大关系。当基线倾角 ξ 很接近雷达波入射角 θ 时,基线长度估算误差对高程测量精度的影响会快速减少,当 $\xi = \theta + 180^\circ \cdot k (k=0, 1)$ 时,基线长度对测量精度的影响为 0。这个特点对合理选择干涉像对具有指导意义。

对于星载系统而言,由于卫星定轨的精度有限,一般需要通过设定地面标志点来提高基线估算的精度。由标志点的位置和高度,通过高程计

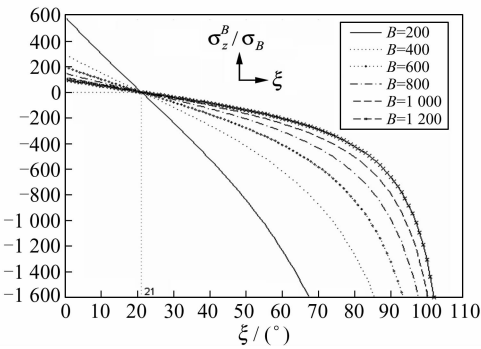


图 6 ξ 在 $[0^\circ 110^\circ]$ 变化时的误差传播曲线
Fig. 6 Propagation Curves of Baseline Length Errors for $\xi \in [0^\circ 110^\circ]$

算公式反解出基线参数,把解出的基线参数用于整幅影像的高程测量,这样可以使基线估算的误差减小到可以接受的程度。

对于 ERS-1/2,以 $r_0 = 850 \text{ km}$, $\theta = 21^\circ$ 代入式(18)、式(20),有:

$$\sigma_z^B = \frac{850\,000}{B} \cdot \sin(21^\circ) \cdot \tan(21^\circ - \xi) \cdot \sigma_B$$

$$\sigma_\xi^B = 850\,000 \times \sin(21^\circ) \sigma_\xi = 304\,612.76 \sigma_\xi$$

若取 $B = 1\,050 \text{ m}$, $\xi = 18^\circ$,则基线长度的估算误差被放大 27.67 倍传播到高程测量结果中;基线倾角的估算误差被放大 304 612.76 倍传播到高程测量结果中。即要获得 1 m 的测高精度,基线长度的估算精度要达到 3.6 cm,而倾角的估算精度要达到 0.677"。比较可见,基线倾角的估算误差对高程测量精度的影响要超过长度估算误差的影响。所以,要得到符合精度要求的地面点高程,必须严格控制基线倾角的估算精度。

5 结 语

本文基于 Currie 等提出的高程模型建立了待求高程和干涉相位的直接联系,可用于推导测高精度与斜距差、基线等成像参数之间的关系。分析表明,斜距差测量误差对高程精度的影响随基线长度的增加而减小。另外,本文分析了国内外学者广泛引用的 Zebker 等提出的平行射线近似处理方法所引起的误差。结果表明,随基线 B 的增大,近似带来的斜距差误差也随之增大,在极限基线处 ($B = 1\,050 \text{ m}$) 的最大误差达到了近 700 mm,

必须加以改正。本文推导的近似误差计算公式可以用来纠正平行射线的近似误差,故在重建高精度 DEM 时主要考虑其他斜距误差因素,这时应当选取基线较长的影像对。最后通过分析基线长度和方向分别对测高精度的影响程度,证明了要获得高精度的地面高程,基线参数的估算精度至关重要。

参 考 文 献

[1] Klees R , Massonnnet D. Deformation Measurement Using SAR Interferometry : Potential and Limitations[J]. Geologieen, Mijnbouw, 1999, 77: 161-176

[2] 廖明生,林琨. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础[M]. 北京:测绘出版社,2003

[3] Graham L C. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping [J]. IEEE, 1972, 62: 763-768

[4] Currie A, Baker C J. High Resolution 3-D Radar Imaging [C]. IEEE International Radar Conference'95, Alexandria, 1995

[5] 杨杰. 星载 SAR 影像定位和从星载 InSAR 影像自动提取高程信息的研究[D]. 武汉:武汉大学,2003

[6] Joughin I. Estimation of Ice-Sheet Topography and Motion Using Interferometric Synthetic Aperture Radar [D]. Washington: University of Washington, 1995

[7] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations [J]. J Geophys Res, 1986, 91: 4 993-4 999

[8] Lyons S N. Investigations of Fault Creep in Southern California Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS [D]. San Diego: University of California, 2002

[9] Hanssen R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001

[10] 于晶涛. 星载 SAR 干涉技术的理论与方法研究 [D]. 上海:同济大学,2004

第一作者简介:张磊,硕士生,研究方向为 InSAR 技术及其在变形监测中的应用。

E-mail:zhanglen@gmail.com

calibrated by using the basic GWR. Third ordinary linear regression (OLR) is used to estimated coefficients of a_g . Material formulations of two types of coefficients and computational progress are also produced, and further tested by using average prices of house blocks in Shanghai. The experiment proves that all formulations of coefficients are available, and comparison of the two models by Akaike information criteria value shows MGWR is more appropriate and stable for the local coefficients estimates than BGWR although it requires a greater computational effort.

Key words: geographically weighted regression; mixed geographically weighted regression; spatial nonstationarity; iterative algorithm; spatial analysis

About the first author: QIN Wenzhong, associate professor, Ph.D candidate. His research interests include spatial modeling and spatial analysis in GIS.
E-mail: wenzhongq@mail.tongji.edu.cn

.....
(上接第 111 页)

An Elevation Model of InSAR and Its Accuracy Analysis

ZHANG Lei¹ WU Jicang^{1,2} CHEN Yanling³

- (1 Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)
(2 Key Laboratory of Geospace Environment & Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(3 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China)

Abstract: An improved elevation model of InSAR which expresses the direct relationship between height and phase has been developed based on the InSAR elevation model of Currie and Baker. The errors introduced by the parallel ray approximation applied in the improved model are analyzed, and the results verify that it can not be ignored for satellite radar system. The error propagation curves and the relation between elevation errors and baseline parameters are also given which can be used to rectify the approximation errors and reconstruct the high accurate digital elevation model (DEM). In addition, based on the improved model and error propagation law, an elevation error estimation formula is derived. It gives the definite effect of the baseline length and angle on the elevation accuracy.

Key words: InSAR; elevation model; baseline; parallel ray approximation; error propagation

About the first author: ZHANG Lei, postgraduate, interested in the theory of InSAR and its applications in surface displacement detection.
E-mail: zhanglen@gmail.com