

机载 InSAR 系统精度分析

楼良盛¹ 刘思伟¹ 周 瑜¹

(1 西安测绘研究所,西安市雁塔中段 1 号,710054)

摘 要:结合 SAR 成像原理,在提出了基于 DGPS/IMU 数据的机载 InSAR 系统 DEM 三维坐标求解的基础上,推导出了基线长度、基线倾角、相位差、雷达天线到地面目标点的距离、雷达天线位置、中心多普勒频率及飞机飞行速度等因素误差对 DEM 精度的影响公式,分析讨论了机载 InSAR 系统影响精度的主要因素及系统可实现的性能情况,提出了机载 InSAR 系统部分设计建议,并使用实际的机载 InSAR 数据进行了试验。结果表明,本方法结果与实际试验统计的精度基本一致,影响精度的分析结论正确。

关键词:干涉合成孔径雷达;精度分析;DGPS/IMU

中图法分类号:P225.1

干涉合成孔径雷达(InSAR)技术是在合成孔径雷达(SAR)技术基础上发展并逐渐成熟起来的一种主动微波三维遥感成像技术,利用该技术可以快速提取地面的三维信息。InSAR 作为对地观测系统中的信息获取与处理技术之一,与传统的光学遥感技术相比,具有全天时、全天候穿透性、精度高、数据处理自动化程度高等特点,成为当前测绘困难地区数据获取的重要手段之一,特别适合于多云雾地区的地面信息获取、突发性灾害灾情的快速获取^[1],已越来越受到各国的重视。

目前,InSAR 技术处于发展时期,数据处理大多集中在复影像配准、相位滤波、相位解缠及 DEM 的高程求解等方面^[2-7],在精度研究方面也集中在高程精度的分析^[8-10]。在 DEM 的平面坐标求解方面,主要是针对星载 InSAR 的数据处理^[9-14],基本都采用基于 Leberl 方程的求解方法^[12],而关于机载 InSAR 系统三维 DEM 生成及精度分析的文献不多。为此,本文借鉴已有的高程求解方法,结合 SAR 成像原理,在提出了利用 DGPS/IMU 数据进行机载 InSAR 系统 DEM 平面坐标求解方法的基础上,推导了误差公式,对精度进行了分析,并用实际的机载 InSAR 数据进行了试验。根据精度情况,提出了机载 InSAR 系统设计的部分建议。在精度分析过程中各文献的误差源会有所不同,从而使有的分析方法在实际中

误差公式的各因素相互间可能不独立。文献[7]把基线分成垂直基线和平行基线两个参数,这两个参数间存在较强的相干性,文献中提到应按相关协方差矩阵处理,但没有进一步讨论哪些因素是相关的、其相关程度是多少等。本文分析的误差源相干性不强,在文献[8-10,14]中都按相互独立处理,本文也按相互独立进行误差传播分析。

1 机载 InSAR 系统测量原理

根据干涉原理与三角形几何关系,地面点高程 h 为^[2-6]:

$$h = H - r_1 \cos \theta \tag{1}$$

其中,

$$\theta = \beta - \arcsin \left(\frac{\delta^2 + 2r_1\delta - B^2}{2Br_1} \right) \tag{2}$$

$$\delta = r_2 - r_1 = -\frac{\lambda}{2\pi} \Phi$$

在平面坐标求解方面,根据 SAR 成像原理,方位向成像是通过对多普勒频率匹配滤波实现^[11-13],在成像时需要多普勒频率进行估计。设飞机飞行速度矢量为 \mathbf{V} , A_1 到地面点 P 的矢量为 \mathbf{P} ,通过中心多普勒频率估计使 \mathbf{V} 和过 \mathbf{P} 成像面的夹角 Ω 可精确获取^[11,13],这是 SAR 成像所固有的特点。由此,可得:

$$\begin{aligned} X &= X_s + D\sin(\Omega - \Psi) \\ Y &= Y_s + D\cos(\Omega - \Psi) \end{aligned} \tag{3}$$

其中,

$$\Psi = \arctag(\frac{V_x}{V_y}) \tag{4}$$

根据式(1)、式(3)即可完成地面目标点三维坐标求解。

2 机载 InSAR 系统误差公式推导

2.1 高程误差公式

由式(1)、式(2)可知,影响高程精度的因素有基线倾角 β 、雷达天线 A_1 的高度 H 、相位差 Φ 、基线长度 B 及雷达天线 A_1 到地面点的距离 r_1 。对式(2)微分,并近似 $\delta \approx B\sin(\beta - \theta)$,可得:

$$\begin{aligned} d\theta &= d\beta + \frac{\lambda(r_1 + B\sin(\beta - \theta))}{2\pi Br_1 \cos(\beta - \theta)} d\varphi + \\ &\quad \frac{B + r_1 \sin(\beta - \theta)}{Br_1 \cos(\beta - \theta)} dB \end{aligned} \tag{5}$$

对式(1)微分可得高程误差公式。根据协方差传播定律,如果这些要素的误差之间互相独立,则有:

$$\begin{aligned} \sigma_h^2 &= \sigma_H^2 + (r_1 \sin(\theta))^2 \sigma_\beta^2 + \\ &\quad \left(\frac{\lambda(r_1 + B\sin(\beta - \theta)) \sin(\theta)}{2\pi B \cos(\beta - \theta)}\right)^2 \sigma_\varphi^2 + \\ &\quad \left(\frac{[B + r_1 \sin(\beta - \theta)] \sin(\theta)}{B \cos(\beta - \theta)}\right)^2 \sigma_B^2 + \\ &\quad (-\cos(\theta))^2 \sigma_{r_1}^2 \end{aligned} \tag{6}$$

2.2 平面误差公式

由式(3)、式(4)可知,影响高程精度的因素有

$$\begin{aligned} \delta_X^2 &= \delta_{X_s}^2 + (\sin(\theta) \sin(\Omega - \Psi))^2 \delta_{r_1}^2 + (r_1 \cos(\theta) \sin(\Omega - \Psi))^2 \delta_\beta^2 + \left(\frac{\lambda(r_1 + B\sin(\beta - \theta)) \cos\theta \sin(\Omega - \Psi)}{2\pi B \cos(\beta - \theta)}\right)^2 \cdot \\ &\quad \delta_\varphi^2 + \left(\frac{(B + r_1 \sin(\beta - \theta) \cos(\theta)) \sin(\Omega - \Psi)}{B \cos(\beta - \theta)}\right)^2 \delta_B^2 + \left(\frac{\lambda D \cos(\Omega - \Psi)}{2V \sin(\Omega)}\right)^2 \delta_{f_d}^2 + \\ &\quad \left(\frac{D \cos(\Omega - \Psi) (V_x / \tan(\Omega) + V_Y)}{V^2}\right)^2 \delta_{V_x}^2 + \left(\frac{D \cos(\Omega - \Psi) (V_Y / \tan(\Omega) - V_x)}{V^2}\right)^2 \delta_{V_Y}^2 + \\ &\quad \left(\frac{D \cos(\Omega - \Psi) (V_Z / \tan(\Omega))}{V^2}\right)^2 \delta_{V_Z}^2 \\ \delta_Y^2 &= \delta_{Y_s}^2 + (\sin(\theta) \cos(\Omega - \Psi))^2 \delta_{r_1}^2 + (r_1 \cos(\theta) \cos(\Omega - \Psi))^2 \delta_\beta^2 + \left(\frac{\lambda(r_1 + B\sin(\beta - \theta)) \cos\theta \cos(\Omega - \Psi)}{2\pi B \cos(\beta - \theta)}\right)^2 \cdot \\ &\quad \delta_\varphi^2 + \left(\frac{(B + r_1 \sin(\beta - \theta) \cos(\theta)) \cos(\Omega - \Psi)}{B \cos(\beta - \theta)}\right)^2 \delta_B^2 + \left(\frac{\lambda D \sin(\Omega - \Psi)}{2V \sin(\Omega)}\right)^2 \delta_{f_d}^2 + \\ &\quad \left(\frac{D \sin(\Omega - \Psi) (V_x / \tan(\Omega) + V_Y)}{V^2}\right)^2 \delta_{V_x}^2 + \left(\frac{D \sin(\Omega - \Psi) (V_Y / \tan(\Omega) - V_x)}{V^2}\right)^2 \delta_{V_Y}^2 + \\ &\quad \left(\frac{D \sin(\Omega - \Psi) (V_Z / \tan(\Omega))}{V^2}\right)^2 \delta_{V_Z}^2 \end{aligned} \tag{13}$$

基线倾角 β 、雷达天线 A_1 的高度 H 、相位差 Φ 、基线长度 B 、雷达天线 A_1 的 X 与 Y 坐标 X_s 与 Y_s 、中心多普勒频率 f_d 及飞机在 X 、 Y 、 Z 轴飞行速度 V_x 、 V_Y 、 V_Z 。对式(3)微分可得:

$$\begin{aligned} dX &= dX_s + \sin(\Omega - \Psi) dD + D \cos(\Omega - \Psi) \cdot \\ &\quad d\Omega - D \cos(\Omega - \Psi) d\Psi \\ dY &= dY_s + \cos(\Omega - \Psi) dD - D \sin(\Omega - \Psi) \cdot \\ &\quad d\Omega + D \sin(\Omega - \Psi) d\Psi \end{aligned} \tag{7}$$

而 $D=r_1 \sin(\theta)$, 则有:

$$dD = \sin(\theta) dr_1 + r_1 \cos(\theta) d\theta \tag{8}$$

把式(5)代入式(8)得:

$$\begin{aligned} dD &= \sin(\theta) dr_1 + r_1 \cos(\theta) d\beta + \\ &\quad \frac{\lambda(r_1 + B\sin(\beta - \theta)) \cos(\theta)}{2\pi B \cos(\beta - \theta)} d\varphi + \\ &\quad \frac{B + r_1 \sin(\beta - \theta) \cos(\theta)}{B \cos(\beta - \theta)} dB \end{aligned} \tag{9}$$

根据多普勒效应,中心多普勒频率 f_d 与飞机飞行速度及其夹角间有如下关系:

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos(\Omega) \tag{10}$$

对式(9)和 $V^2=V_x^2+V_Y^2+V_Z^2$ 微分可得:

$$\begin{aligned} d\Omega &= -\frac{\lambda}{2V \sin(\Omega)} df_d + \frac{V_x}{\tan(\Omega) V^2} dV_x + \\ &\quad \frac{V_Y}{\tan(\Omega) V^2} dV_Y + \frac{V_Z}{\tan(\Omega) V^2} dV_Z \end{aligned} \tag{11}$$

对式(4)微分可得:

$$d\Psi = \frac{V_Y}{V^2} dV_x - \frac{V_x}{V^2} dV_Y \tag{12}$$

把式(9)、式(11)、式(12)代入(7)可得平面误差公式。根据协方差传播定律,如果这些要素的误差之间互相独立,则有:

3 理论分析与试验

3.1 理论分析

从式(6)可知,由于斜距 r_1 要远大于基线长度 B ,影响高程精度的主要是基线倾角误差、相位误差和基线长度误差。由于机载 InSAR 系统双天线一般安装在同一个稳定平台上,是一个刚体,其基线长度可以精确量测,基线倾角也可以用高精度 DGPS/IMU 精确测量,从而减少了对系统精度的影响;而相位误差与雷达设计的热噪声、SAR 成像及数据处理过程有关,不容易消除,但其影响与基线倾角和雷达侧视角的差有关,当基线倾角和雷达中心侧视角相等时,它对系统精度的影响降到最少,故在系统设计时,尽量使基线倾角和雷达中心侧视角相等;雷达天线高度测量误差直接传递,且高精度 DGPS/IMU 测量精度高,影响不大;对于一个实用雷达系统,距离测量需进行标定,其测量精度也较高,故影响较小。

从式(13)可知,基线倾角误差、相位误差和基线长度误差对平面精度的影响和对高程精度的影响特性基本一致,影响程度略小一些;成像时引起的中心多普勒频率精度对平面精度影响较大,由于 Ω 基本是 90° ,系统工作一般按东西或南北方向设

计航线,其影响主要是飞行方向的值;飞机飞行速度和雷达天线 A_1 的坐标测量精度取决于 DGPS/IMU 测量精度,其精度都很高,但影响不大。

设飞机航高 H 为 7 000 m;雷达工作波段选 X (波长为 0.032 m);雷达中心侧视角 θ 为 50° ;基线倾角 β 为 45° ;飞机飞行方向与 Y 轴的夹角 Ψ 为 20° ;飞机飞行速度为 140 m/s;一般雷达工作时要求飞机平飞,故取 V_z 为 0;其影像分辨率为 1 m,则依据采样定理脉冲重复频率(PRF)应为 280 Hz,中心多普勒频率精度可以达到 PRF 的 1%,即为 2.8 Hz;基线倾角测量误差为 $\pm 10''$;基线长度测量误差为 ± 1 mm;雷达距离测量误差为 ± 1 m;相位误差为 ± 0.035 rad;DGPS/IMU 采用 POS/AV 510,则事后处理定位精度为 ± 0.3 m,速度各分量精度为 ± 0.005 m/s。

根据式(6)、式(13),图 1(a)、1(b)、1(c)分别为相位误差对高程和平面精度随基线变化等值线图,单位为 m;图 1(d)为基线长度为 1 m 时中心多普勒频率精度对平面精度影响情况;图 1(e)、1(f)分别为各种误差为以上假设值时,不同基线长度时基线倾角和侧视角差对高程和平面 X 坐标精度(Y 坐标与 X 坐标基本相同)影响等值线图,单位为 m;图 1(g)、1(h)分别为各种误差为以上假设值时,系统平面和高程精度随基线变化情况。

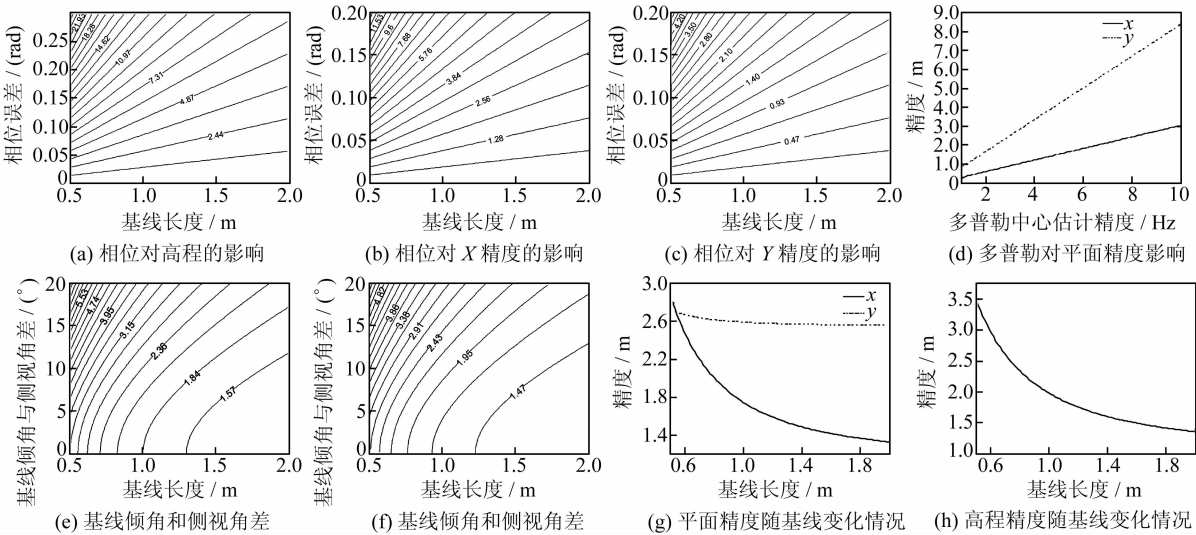


图 1 试验分析结果
Fig. 1 Result of Experimental

从图 1(g)、1(h)可知,当基线长度小于 1 m 时,系统精度较差,并且随基线长度变化较大;从图 1(g)、1(d)可知,中心多普勒频率误差对平面精度影响较大,主要反映在沿飞机飞行方向,且随基线长度变化不大;从图 1(e)、1(f)可知,基线倾

角和侧视角差对系统精度影响较大;从图 1(a)~1(c)可知,相位误差对系统精度影响也较大。

3.2 试验

利用本文提出的 DEM 三维坐标求解方法,使用 2005-09 西安测绘研究和中国科学院电子所

联合进行的机载 InSAR 试验数据,进行了 DEM 生成和正射影像制作试验。试验选用 POS/AV 510 进行定姿、定位,表 1 为 InSAR 系统技术参数,表 2 为 POS/AV 510 技术参数。

表 1 InSAR 系统技术参数

Tab. 1 InSAR System Technology Parameters

名称	参数值
频率	Ku 波段(15.5 GHz)
信噪比	-25 dB
带宽	100 MHz
极化	HH
飞行速度	140 m/s
飞行高度	6 300 m
侧视角	45°
基线长度	0.537 m
测绘带宽	2 km
空间分辨率	0.25 m×0.3 m

为检测试验系统可能达到的实际精度,在试验区中央 3 km×3 km 范围内布设了 40 个角反射器,用 GPS 接收机对角反射器布设位置进行了精确测量。采用东西向、南北不同侧视方向对试验场进行了成像,采用全站仪测量了基线长度以及雷达天线与 GPS 天线之间的偏移量。

表 2 POS/AV 510 技术参数

Tab. 2 POS/AV 510 Technology Parameters

名称	精度值
实时精度	
定位精度	±0.5 m~±2.0 m
速度精度	±0.5 m/s
侧滚与俯仰角精度	±0.008°
航偏角精度	±0.05°
事后处理精度	
定位精度	±0.05 m~±0.3 m
速度精度	±0.005 m/s
侧滚与俯仰角精度	±0.005°
航偏角精度	±0.008°

地面试验场布设的地面检查点与生成的 DEM 数据比较,其精度情况如表 3 所示。

表 3 地面检查点精度表

Tab. 3 Ground Control Points Accuracy Table

航带	检查点数量	X 中误差/m	Y 中误差/m	Z 中误差/m
第一条	10	±11.84	±5.33	±3.06
第二条	10	±11.51	±5.76	±3.10
第三条	11	±11.19	±6.35	±2.54
第四条	11	±9.04	±5.00	±5.46
总体	42	±10.95	±5.63	±3.71

根据试验参数,按式(6)、式(13)计算精度结果为:平面±10.11 m(X)、±4.56 m(Y),高程±3.49 m,比表 3 中的实际试验检查点精度略好一些。这与没有考虑各误差源相干性有关,但理论

计算与实际试验精度相差不大,说明本文的分析方法对工程具有一定的指导意义。

4 结 语

1) 在进行机载 InSAR 系统设计时,基线长度应大于 1 m,系统精度可以满足 1:10 000 地形图成图精度要求。若要测制更大比例尺的地形图,则需要在测区布置较多的角反射器为控制点;或加长基线,并提高基线测量精度和中心多普勒频率精度。

2) 基线倾角和侧视角差对系统精度影响较大,在进行机载 InSAR 系统设计时,尽量使基线倾角和侧视角相等,尤其是可以减少相位误差对系统精度的影响。

3) 从实际数据试验结果分析,本文提出的基于 DGPS/IMU 的机载 InSAR 系统 DEM 生成方法可行,推导的系统误差传播公式正确。

参 考 文 献

[1] 黄国满,张继贤,赵铮,等. 机载干涉 SAR 测绘制图应用系统研究[J]. 测绘学报,2008,37(3): 277-279

[2] 王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:科学出版社,2002

[3] Rodriguez Z, Martin J M. Theory and Design of Interometric Synthetic Aperture Radars [J]. IEEE, Proceedings-F, 1992,19(2): 174-159

[4] 蔡国林,刘国祥,李永树. 一种基于小波分析的 InSAR 干涉图滤波算法[J]. 测绘学报,2008,37(3): 293-300

[5] 于晶涛,陈鹰. 一种新的 InSAR 干涉条纹图滤波方法[J]. 测绘学报,2004,33(2): 121-126

[6] Zebker H A, Werner C L, Rosen P A, et al. Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interometric Radar [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens,1994,32(4):823-836

[7] 刘国林,郝晓光,薛怀平. 影响 InSAR 测高精度因素的相关性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(1):55-58

[8] 张磊,伍吉仓,陈艳玲,等. InSAR 高程模型及其精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(1):108-111

[9] 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(6):1 026-1 031

[10] 高宏良,范攀峰,徐朝树. InSAR 处理中相位转换高程技术的研究[J]. 大坝与安全,2006(增刊):42-45

[11] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电

子工业出版社,2005

[12] Bara M, Mora O, Romero M, et al. Generation of Precise Wide-Area Geocoded Elevation Models with ERS SAR Data[C]. IGARSS'99, Hamburg, 1999

[13] Cumming I G, Wong F. 合成孔径雷达算法与实现 [M]. 洪文,胡东辉译. 北京:电子工业出版社,2007

[14] 刘国祥,丁晓利,李志林,等. 使用 InSAR 建立

DEM 的试验研究[J]. 测绘学报,2001,30(1): 336-342

第一作者简介:楼良盛,博士,副研究员,主要从事 InSAR 系统及数据处理技术研究。
E-mail:louls227@public. xa. sn. cn

Accuracy Analysis of Airborne InSAR System

LOU Liangsheng¹ LIU Siwei¹ ZHOU Yu¹

(1 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping,1 Middle Yanta Road, Xi'an 710054,China)

Abstract: Accuracy analysis is the precondition of a system's production accuracy ensure, through which it is helpful to determine the systemic performance indexes and some technical parameters in order to make the system design easily. In the article, combined with the SAR imaging principles, especially on the basis of presenting the solution of DEM's three dimension coordinates in airborne InSAR system with DGPS/IMU data, deduced the DEM precision influence formulas caused by several errors factors such as base line length, base line inclination, phase difference, distance from the SAR antenna to the ground target points, SAR antenna's position, center Doppler and the plane's velocity, in order to improve the systemic precision then analyzed the main influencing accuracy factors in airborne InSAR system and the systemic realizable performance condition, meanwhile proposed some design suggestions of the airborne InSAR system and made experiments on the real airborne InSAR data. In the article, the results indicated from the methods of accuracy analysis is accordant with the statistical precision using real experimental data, and the conclusions influencing accuracy analysis are correct.

Key words: interferometric synthetic aperture radar; accuracy analysis; DGPS/IMU

About the first author: LOU Liangsheng, Ph.D, associate researcher, mainly pursuing in InSAR system and data processing technique.
E-mail: louls227@public. xa. sn. cn

+++++

(上接第 57 页)

the highest sampling rate or the finest scale, then this state equation is decomposed into different scale to establish several state equations based on different scale and the corresponding measurement equation, at last the global and optimal information fusion algorithm based different scale is finished. The simulation results show that this algorithm has not only better real-time, but also better fused precision.

Key words: multi-scale; multi-sampling rate; multi-sensor integrated navigation system; Kalman filter; fusion algorithm.

About the author: LIN Xueyuan, Ph.D, associate professor, majors in data fusion, satellite positioning and integrated navigation system.
E-mail: linxy_ytcn@126. com