

基于条纹匹配的 InSAR/INS 组合导航方法

蒋 帅^{1,2}, 向茂生^{1,2}, 汪丙南¹, 付希凯^{1,2}, 杨 玉^{1,2}, 聂 瑞^{1,2}, 李银伟³

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 上海无线电设备研究所, 上海 200090)

摘 要: 现存的组合导航系统存在诸多问题: 地形辅助导航系统分辨率较低; GPS/INS 导航系统中 GPS 信号易受干扰; SAR/INS 导航系统无法实现三维定位且无法获得平台的姿态信息. 针对以上问题本文提出了基于条纹匹配的 InSAR/INS 组合导航方法: 该方法将 InSAR 系统获得的干涉条纹与 DEM 生成的干涉条纹进行匹配, 得到的定位偏移用以反演平台的位置和姿态信息, 最后将反演结果与 IMU 信息进行组合滤波得到导航输出. 该组合导航系统有以下优势: 干涉条纹中包含地形信息和平台姿态信息; 干涉相位对横滚角敏感, 可通过干涉相位高精度反演平台的横滚角; InSAR 系统具有较高精度的三维定位能力. 本文主要介绍了基于条纹匹配的 InSAR/INS 组合导航的原理和方法, 最后通过仿真和实测数据验证了条纹匹配和观测量反演算法的可行性.

关键词: InSAR/INS 组合导航; 条纹匹配; 观测量反演; 组合滤波

中图分类号: V249; TN959.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)12-2832-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.12.002

The Method of the InSAR/INS Integrated Navigation Based on Fringe Matching

JIANG Shuai^{1,2}, XIANG Mao-sheng^{1,2}, WANG Bing-nan¹, FU Xi-kai^{1,2}, YANG Yu^{1,2}, NIE Rui^{1,2}, LI Yin-wei³

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: The existing integrated navigation systems have lots of problems: the resolution of the terrain aided navigation system is low; the GPS signals of the GPS/INS navigation system are susceptible to be interfered; the SAR system has no ability of three-dimensional localization, and it cannot inverse the attitude of the platform. Aiming at the above problems, this article presents the method of InSAR/INS integrated navigation system based on the fringe matching. In the integrated navigation, we can obtain the location shift by matching two interference fringes, one is produced by InSAR system and another is generated by the digital elevation database. With the aid of the location shift we can inverse the attitude and position information. The location shift and the IMU information are set to the combined filter to obtain the navigation output. The InSAR/INS system has the following advantages: the interference fringes include the terrain and the attitude information of the platform; the interferometric phase is susceptible to the roll angle and we can inverse the roll angle by the phase with high precision; the InSAR system has the ability of three dimension localization. In this article, we introduce the theory and method of the InSAR/INS integrated navigation based on fringe matching. At last, we verify the validity of fringe matching and the inversion of observation volume by simulation and real data.

Key words: InSAR/INS integrated navigation; fringe matching; the inversion of observation volume; combined filter.

1 引言

无人机测绘技术和武器系统的发展,对导航系统的精度要求和环境适用性的要求越来越高,研究高精度、高自主性的导航系统有着重要的意义.惯性导航系统^[1](Inertial Navigation System, INS)具有短时稳定且不需要与外界交换信息等优点,成为目前存在的导航系统中不可缺少的部分;但是 INS 误差随时间积累,因此目前的导航系统以惯性导航系统为主,其他导航系统与其组合来修正 INS 积累误差,进而实现优势互补,达到精确导航的目的.

最早的组合导航系统是地形辅助导航系统^[2-4],该导航系统用于中制导阶段,具有自主、隐蔽、全天候等优点;但是其导航精度较低,无地形分辨能力,在地形较平坦时无法使用该系统.随着卫星技术的发展,GPS/INS 组合导航系统得到了发展,目前多数导航系统中均包含了 INS/GPS 组合导航技术.该导航系统具有定位精度高、可长时间稳定工作等优点,但是由于 GPS (Global Positioning System)^[5] 主动权在美国手里,可人为操纵其精度,因而不能依赖的系统;中国自主研发了北斗系统^[6],但两者都属于外部源导航,信号易受电磁干扰,因此需要研究不易受干扰的自主导航系统. SAR/INS 组合导航系统^[7]是一种自主导航系统,使用景象匹配进行导航;但是合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像存在斑点噪声强、信噪比低等缺点,该导航系统存在需典型地标进行匹配、受基准图像时效性影响大、单通道 SAR 不能感应平台姿态变化、对于地形起伏较大的情况匹配效果较差等缺点.

针对现有组合导航存在的问题,本文提出一种基于条纹匹配的 InSAR/INS 组合导航系统:InSAR (Interferometric SAR, InSAR)对地形和姿态比较敏感,可以高精度地反演位置和姿态信息,使用干涉条纹进行匹配,匹配精度更高,而且不需要典型地标进行辅助.该组合导航方式用于中制导阶段,可解决现有组合导航存在的问题,有研究和应用价值.基于条纹匹配的 InSAR/INS 组合导航示意图如图 1 所示,其中底面灰色图为 DEM(Digital Elevation Model)生成的基准干涉条纹图,顶面彩色区域为导航区域,该彩色图为 InSAR 系统实时获得的干涉条纹图,InSAR/INS 导航系统中将两者进行匹配获得定位偏移用来反演平台的姿态和位置信息.

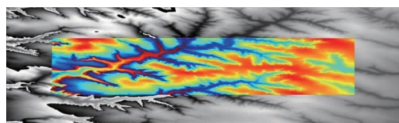


图1 InSAR/INS组合导航示意图

对于 InSAR 辅助 INS 组合导航的研究,欧洲防务局

(EDA)协调了由 10 个国家参与的 SARINA 项目,该项目对 SAR 和 InSAR 辅助导航进行了研究,意大利学者从 InSAR 参数选择、姿态位置误差对相位误差和定位误差的影响、DTM 特性等方面论证了 InSAR 辅助导航的可行性^[7-9],但未对其中涉及的技术进行详细介绍并给出可行的研究方案.

2 InSAR/INS 组合导航方法

如图 2 所示为 InSAR/INS 组合导航原理图,该方案共分为五个部分.下面对五个部分进行介绍:

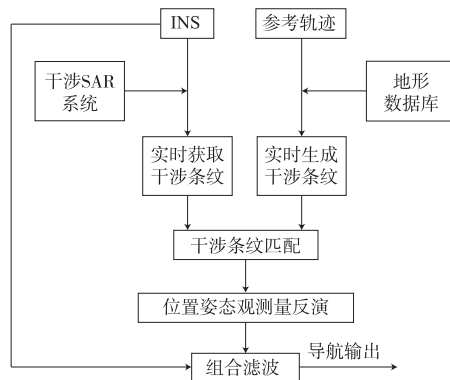


图2 InSAR/INS组合导航原理

(1) 实际干涉条纹图获取: InSAR 实时处理阶段,即通过实际干涉 SAR 系统实时获得去平地干涉条纹;

(2) 基准干涉条纹图生成: 根据平台飞行轨迹和成像参数,结合 DEM 数据实时生成去平地干涉条纹;

(3) 干涉条纹匹配: 采用容错性能好、鲁棒性高的 SIFT 算法对以上两步中的干涉条纹进行匹配并得到定位偏移;

(4) 位置姿态等观测量反演: 建立横滚角反演模型、InSAR 三维定位模型,反演出平台位置误差和姿态误差;

(5) 组合滤波: 将反演得到的位置和姿态信息与 IMU 输出的信息进行全状态组合滤波,将得到的滤波结果用于修正平台的位置和姿态信息.

重复以上步骤形成闭环系统^[10],不断进行导航修正.在以上五个步骤中,条纹匹配、观测量反演和组合滤波方法是组合导航中至关重要的三个部分,下面将分别对此三部分进行详细介绍.

2.1 条纹匹配方法

InSAR 系统可以得到地形 DEM 信息,但是计算步骤繁琐、计算量较大,不易实时计算;干涉相位中包含丰富的地形信息,同时 InSAR 对姿态角比较敏感,因此可直接使用相位信息进行匹配,既简化了计算量,又提高了导航精度.

平台的位置和姿态误差,使干涉相位图出现旋转

变形及扭曲等,所以匹配算法需要具有一定的容错能力,SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)^[11,12]特征是图像的局部特征,其对旋转、尺度缩放保持不变性,对视角变化、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定性,运算速度快,可准确匹配,所以在条纹匹配时采用质量图加权的 SIFT 匹配算法.质量图加权的 SIFT 匹配算法在传统的 SIFT 算法的基础上增加了干涉条纹增强和随机抽样一致性(Random Sample Consensus, RANSAC)^[13,14]两个步骤,可以更好地满足干涉条纹匹配,提高匹配精度.RANSAC 算法计算过程稳定可靠,而且精度高,对噪声和特征点提取不准确等情况都有强健的承受能力,并且具有较好的剔除误匹配点的能力.

在第 3 节的实验验证部分将通过仿真和实验数据验证 SIFT 算法进行条纹匹配的有效性.

2.2 观测量反演方法

通过 2.1 节中条纹匹配可以得到距离向和方位向的定位偏移,在本节中需要根据条纹匹配得到的定位偏移来反演位置和姿态信息.本节主要介绍 InSAR 定位模型、位置反演模型和姿态角反演模型.

2.2.1 InSAR 定位模型

如图 3 所示为 InSAR 三维定位几何关系图,根据图中几何关系可以计算 T' 点的坐标位置:

$$\begin{cases} X_T = x_p - R \sin \theta_{sq} \\ Y_T = y_p + \sqrt{(R \cos \theta_{sq})^2 - (H - h)^2} \end{cases} \quad (1)$$

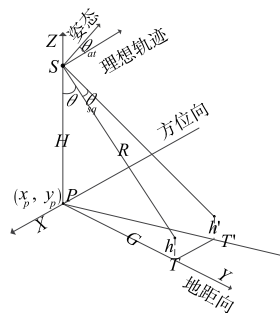


图3 InSAR三维定位几何关系图

式(1)为三维定位模型,其中 θ_{sq} 为考虑姿态角误差后的斜视角,根据式(1)知定位偏移不仅与平台位置 (x_p, y_p, H) 有关,而且还与平台的姿态角有关.因此需要根据位置、姿态角误差与定位误差的关系建立非线性方程组,利用条纹匹配结果,解非线性方程组,得到平台位置误差和姿态角误差.

2.2.2 位置反演模型

如图 4 所示为位置误差对定位偏移的影响,其中位置误差与定位偏移的关系可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = \delta x \\ \Delta y = \delta y + \delta h \tan \theta \end{cases} \quad (2)$$

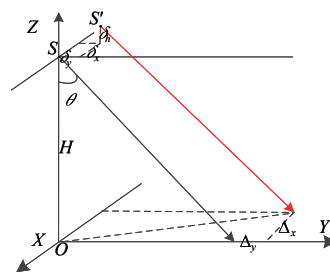


图4 位置误差对定位偏移的影响

根据式(2)可以发现平台方位向误差直接引起相同大小的方位向定位偏移,平台距离向误差和高度向误差共同引起距离向定位偏移,结合式(2)可以构建非线性方程组:

$$F = (\Delta X - \delta x)^2 + (\Delta Y - (\delta y + \delta h \tan \theta))^2 \quad (3)$$

其中 $\Delta X, \Delta Y$ 为条纹匹配得方位向和距离向的定位偏移值, $(\delta x, \delta y, \delta h)$ 为待求的位置误差.式(3)为非线性方程组,无法获得解析解,需要适当的迭代求解方法才能反演得到位置误差,结合条纹匹配获得的多组定位偏移结果,利用 LM 算法^[15]求解式(3)来反演得到平台的位置误差.

列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)算法利用梯度求方程的极值,同时具有梯度法和牛顿法的优点,是一种利用最小二乘法求解非线性方程组的算法,本文对此不进行详细介绍.

2.2.3 姿态反演模型

(1) 横滚角误差对干涉相位的影响

考虑横滚角误差存在时,干涉相位表达式为

$$\Delta \varphi = -\frac{4\pi B \sin(\theta' - \theta_r - \alpha)}{\lambda} \quad (4)$$

其中 θ_r 为横滚角, λ 为波长,此处选择 X 波段($\lambda = 0.03125\text{m}$),基线长度 $B = 1$,下视角 $\theta' = 45^\circ$,基线倾角 $\alpha = 0$.

根据式(4)可以得到干涉相位随平台横滚角误差的变化曲线如图 5 所示.从图中可以发现 0.35° 的横滚角误差将导致超过 100° 的相位变化.干涉相位对横滚角很敏感,通过干涉相位变化来反演平台的横滚角误差是可行的.

下面介绍利用干涉相位反演横滚角的方法,如图 6 所示, P_1 和 P_2 为同一条带上的两点,高度分别为 h_1 和 h_2 ,在地面上的投影为 y_1 和 y_2 , P_1 和 P_2 间距为 d_{12} , y_1 和 y_2 间距为 d . s 为天线相位中心,平台高度为 H , s 到 P_1, P_2 的距离分别为 R_1 和 R_2 .

根据图 6 中的几何关系可以得到 P_2 点的入射角 ϑ 为

$$\vartheta = \vartheta_1 + \vartheta_2 = \arccos \frac{R_2^2 + d_{12}^2 - R_1^2}{2R_2 d_{12}} + \arcsin \frac{h_1 - h_2}{d_{12}} \quad (5)$$

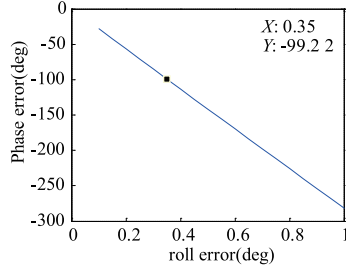


图5 横滚角误差引起相位变化图

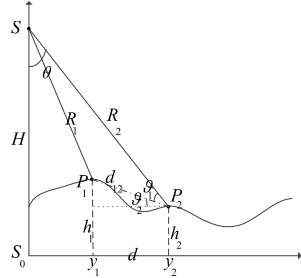


图6 横滚角反演几何关系图

根据双天线干涉原理可得

$$B \sin(\theta - \alpha) = \frac{B^2}{2r_1} - \frac{\Delta r^2}{2r_1} - \Delta r \approx -\Delta r \quad (6)$$

式(6)中 B 为基线长度, θ 为下视角 ($\theta = \frac{\pi}{2} - \vartheta$), α 为基线倾角, Δr 为双天线的斜距差. 根据干涉的工作原理可知, 双天线获取的干涉相位为 $\Delta\varphi = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda}$.

结合式(6)及干涉相位表达式, 可得到反演得到横滚角误差为

$$\theta_r = \theta - \arcsin\left(-\frac{\lambda\Delta\varphi}{4\pi B}\right) - \alpha \quad (7)$$

根据式(7), 在已知干涉相位和其他干涉参数的情况下可以反演得到横滚角的值.

结合式(4)构建非线性方程组:

$$F = -\frac{4\pi B \sin(\theta - \theta_r)}{\lambda} - \Delta\varphi \quad (8)$$

其中 $\Delta\varphi$ 为条纹匹配得到相位, 同样需使用 LM 算法求解非线性方程组式(8)来反演得到横滚角的值 θ_r .

(2) 姿态角反演模型

本节中同时考虑存在三个姿态角误差, 分析姿态角误差耦合对定位误差的影响.

二维天线波束指向误差与横滚角、俯仰角和偏航角的几何关系^[16]如图7所示.

其中 θ 为初始雷达视角, \hat{n} 为天线波束指向单位矢量 $\hat{n} = [0, \sin\theta, -\cos\theta]^T$, \hat{n}_e 为考虑姿态误差的天线波束指向. \hat{n} 经姿态旋转 $M_R M_p M_Y$ 变为 \hat{n}_e , 其中姿态旋转为:

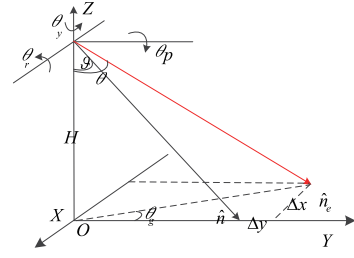


图7 波束指向误差几何示意图

$$\begin{aligned} M_Y &= \begin{bmatrix} \cos\theta_Y & -\sin\theta_Y & 0 \\ \sin\theta_Y & \cos\theta_Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ M_p &= \begin{bmatrix} \cos\theta_p & 0 & \sin\theta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_p & 0 & \cos\theta_p \end{bmatrix} \quad (9) \\ M_R &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ 0 & \sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

经姿态旋转后的天线波束指向矢量变为

$$\hat{n}_e = [x \ y \ z]^T = M_R M_p M_Y \hat{n} \quad (10)$$

已知初始雷达视角为 θ , 加入姿态角误差 ($\theta_r, \theta_p, \theta_y$) 后雷达视角记为 ϑ , 由经姿态旋转后的天线波束指向矢量 \hat{n}_e 可以求得考虑姿态角误差后的雷达视角为:

$$\vartheta = \arctan\left(-\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right) \quad (11)$$

由图7的几何关系可以求得:

$$\theta_g = \arctan\left(-\frac{x}{y}\right) \quad (12)$$

所以由姿态角引起的定位偏移为

$$\begin{cases} \Delta x = H \tan\vartheta \sin\theta_g \\ \Delta y = H \tan\vartheta \cos\theta_g - H \tan\theta \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)构建非线性方程组:

$$F = (\Delta X - H \tan\vartheta \sin\theta_g)^2 + (\Delta Y - (H \tan\vartheta \cos\theta_g - H \tan\theta))^2 \quad (14)$$

其中 $\Delta X, \Delta Y$ 为条纹匹配得到距离向和方位向的定位偏移值, 同样需要使用 LM 算法求解非线性方程组式(14)来反演得到姿态角的值 ($\theta_r, \theta_p, \theta_y$).

2.3 组合滤波方法

组合导航系统大多采用 Kalman 滤波技术^[17]进行信息融合, 目前对 GPS/INS 组合导航中 Kalman 滤波方法的研究非常多, 在 InSAR/INS 组合导航中参考 GPS/INS 组合导航状态方程与量测方程的建立过程. 由于 InSAR/INS 观测量中增加了姿态信息, 因此需要推导动态矩阵和量测矩阵, 最后将 InSAR 与 IMU 获得的信息进行融合, 建立状态方程和量测方程, 通过卡尔曼滤波

进行导航方程解算,输出更加精确的导航信息,如图 8 为组合滤波流程图。

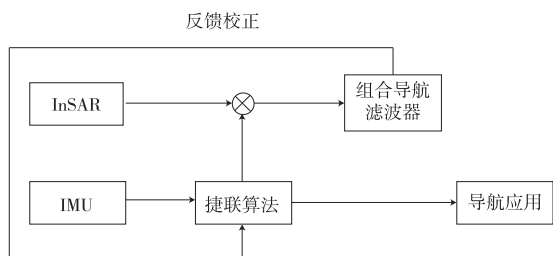


图8 组合滤波流程图

在 InSAR/INS 组合导航中将 InSAR 与 IMU 获得的信息进行融合,建立状态方程和量测方程。其中状态方程选为 15 维: $\mathbf{X} = [\delta\theta_x, \delta\theta_y, \delta\theta_z, \delta V_e, \delta V_n, \delta V_u, \delta\varphi, \delta\lambda, \delta h, \varepsilon_{gx}, \varepsilon_{gy}, \varepsilon_{gz}, \varepsilon_{ax}, \varepsilon_{ay}, \varepsilon_{az}]$, $\delta\theta_x, \delta\theta_y, \delta\theta_z$ 为 3 轴姿态角误差、 $\delta V_e, \delta V_n, \delta V_u$ 为 3 轴速度误差、 $\delta\varphi, \delta\lambda, \delta h$ 为 3 轴位置误差、 $\varepsilon_{gx}, \varepsilon_{gy}, \varepsilon_{gz}$ 为陀螺仪常值漂移误差和 $\varepsilon_{ax}, \varepsilon_{ay}, \varepsilon_{az}$ 为加速度计常值漂移误差。由于 InSAR 观测量反演模型可以得到平台的位置和姿态信息,所以观测量选为 INS 与 InSAR 位置和姿态观测量的差值,即

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} \theta_{x\text{INS}} - \theta_{x\text{InSAR}}, \theta_{y\text{INS}} - \theta_{y\text{InSAR}}, \theta_{z\text{INS}} - \theta_{z\text{InSAR}}, \\ \varphi_{\text{INS}} - \varphi_{\text{InSAR}}, \lambda_{\text{INS}} - \lambda_{\text{InSAR}}, h_{\text{INS}} - h_{\text{InSAR}} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

则有状态方程和观测方程如下:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{F}_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{G}_{k,k-1} \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{n}_k \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中 $\mathbf{F}_{k,k-1}$ 为动态矩阵, $\mathbf{G}_{k,k-1}$ 为系统噪声转移矩阵, \mathbf{W}_k 为白噪声, \mathbf{Z}_k 为观测量, \mathbf{H}_k 为量测矩阵, \mathbf{n}_k 为量测噪声矩阵。

目前对组合滤波的研究已经较多,由于本文提出的组合导航方式可获得平台的姿态信息,所以与传统的组合滤波方式不同,该组合滤波为全状态组合滤波,需要确定全新的动态矩阵和量测矩阵。

2.4 InSAR/INS 组合导航优势

InSAR 相对于 SAR 增加了高程维信息,同时 InSAR 对平台姿态比较敏感,可将 SAR 组合导航中不利的地形起伏变成了有利的信息,使得导航精度大幅提高。InSAR/INS 组合导航在中制导阶段使用,具有现有组合导航系统所不具备的优势。

(1) InSAR 实现三维定位

在无其他约束条件的情况下,无法利用单幅 SAR 图像中的像点坐标获得地面点的三维坐标最终实现精确三维定位^[18],而 InSAR 图像定位与三维信息获取是由不同位置获取的同一测区两幅或多幅 SAR 复数图像,利用其两两干涉相位信息反演相应地面点的高程信息 h ,再依据 SAR 图像构像模型求解地面点的平面坐

标 (x, y) ,从而完成 InSAR 图像的定位与三维信息提取。因此 InSAR 可实现三维定位。

(2) 条纹匹配

使用干涉条纹图匹配,无需计算 DEM,计算效率高;干涉相位对地形和姿态比较敏感,较小的姿态角变化即可反映在条纹上,匹配时直接使用干涉条纹进行匹配,条纹匹配实时性更高、精度也更高。

(3) 姿态角反演

干涉相位对横滚角误差十分敏感,使用条纹匹配结果可以精确反演平台的姿态信息,相对于其他导航方法,InSAR 辅助导航可以精确反演姿态角信息,从而提高导航精度。

3 实验验证

在第 2 节中对组合导航原理和方法进行了详细介绍,在本节中将通过仿真和实测数据来验证条纹匹配算法和观测量反演算法的有效性。

3.1 仿真验证

如表 1 所示为仿真处理的主要参数,图 9 所示为 InSAR 仿真系统获得的去平地相位图像,图 10 所示为根据真实 DEM 生成的无位置和姿态误差的去平地相位图像。

表 1 仿真参数列表

B	λ	H	F_r	α	R_0
1m	3.125cm	4500m	0.25GHz	0°	3944.78m

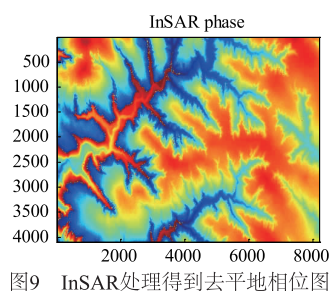


图9 InSAR处理得到去平地相位图

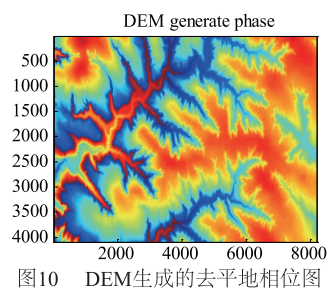


图10 DEM生成的去平地相位图

3.1.1 条纹匹配仿真结果

为验证改进的 SIFT 算法的有效性,首先对无误差的两幅干涉条纹图进行匹配,得到的结果如图 11 所示,其中图中左侧部分为 DEM 生成的基准干涉条纹,右侧

为 InSAR 仿真系统获取的干涉条纹.

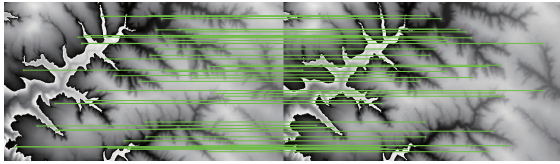


图11 SIFT条纹图匹配结果

将匹配点在图像中的位置相减得到距离向和方位向定位偏移,结果如图 12 和图 13 所示,可以发现两个干涉条纹图匹配基本完全正确,验证了 SIFT 匹配算法在条纹匹配中的有效性.

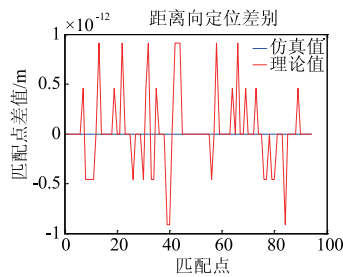


图12 匹配点距离向定位偏移

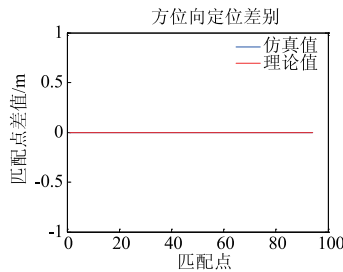


图13 匹配点方位向定位偏移

3.1.2 观测量反演仿真结果

(1) 位置反演仿真结果

在 InSAR 仿真系统中加入位置误差来获得包含位置误差的干涉条纹,并与基准干涉条纹图进行匹配得到定位偏移,并结合 2.2.2 节中介绍的位置反演模型反演得到位置误差.

仿真中加入 100m 距离向误差、150m 方位向误差和 30m 高程向误差,得到加入位置误差的条纹图匹配结果如图 14 所示,图 15 和图 16 为匹配点距离向和方位向的定位偏移值,结合多组定位偏移结果利用 LM 算法求解式(3)可反演得到平台的位置误差结果为:98.8562m 距离向误差、150.3357m 方位向误差和 29.6335m 高度误差.反演误差:距离向 1.1438m、方位向 0.3357m 和高度 0.3665m.

通过以上结果可以发现:根据条纹匹配获得的定位偏移反演得到的位置误差精度较高.

为了进一步说明位置反演算法的鲁棒性,下面再

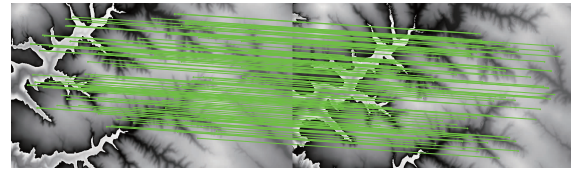


图14 加入位置误差的条纹图匹配结果

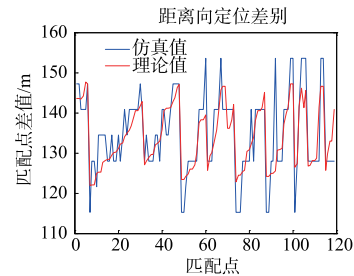


图15 匹配点距离向定位偏移

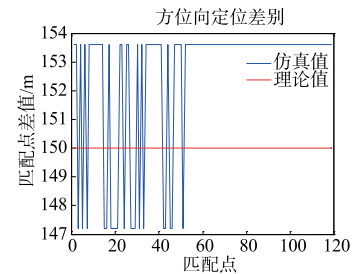


图16 匹配点方位向定位偏移

取几组数据进行仿真,仿真结果如表 2 所示.

通过观察仿真结果可以发现该位置反演模型反演得到的位置误差在 3m 以内,有较高的位置反演精度,验证了位置反演算法的有效性和鲁棒性.

表 2 多组位置误差仿真结果

仿真组次	误差设定值 (m)			反演结果 (m)		
	距离向	方位向	高程向	距离向	方位向	高程向
1	-100	-100	-30	-101.92	-98.87	-29.08
2	-100	100	30	-102.98	100.28	32.63
3	100	100	-30	102.30	99.26	-31.37

(2) 姿态反演仿真结果

在 InSAR 仿真系统中加入姿态角误差来获得包含姿态角误差的干涉条纹,并与基准干涉条纹图进行匹配得到定位偏移,并结合 2.2.3 节中介绍的姿态反演模型反演得到姿态角误差.

仿真中加入 2 度偏航角误差、2 度俯仰角误差和 2 度横滚角误差,得到条纹图匹配结果如图 17 所示,图 18 和图 19 为匹配点距离向和方位向的定位偏移值,结合多组定位偏移结果利用 LM 算法求解式(14)可反演得到平台的位置误差结果为:2.0436 度的偏航角误差、1.9543 度俯仰角误差和 1.9969 度横滚角误差.反演误

差:偏航角 0.0436 度、俯仰角度 0.0457 和横滚角 0.0031 度。

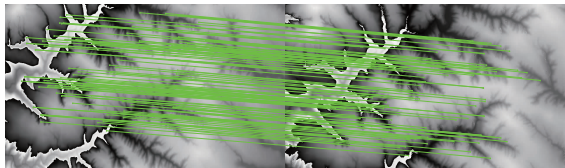


图17 加入姿态误差的条纹图匹配结果

通过以上结果可以发现:根据条纹匹配获得的定位偏移反演得到的姿态误差精度较高。

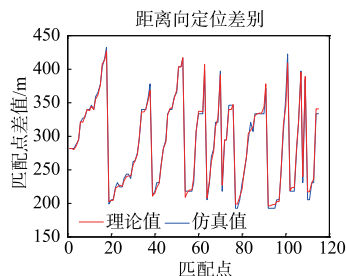


图18 匹配点距离向定位偏移

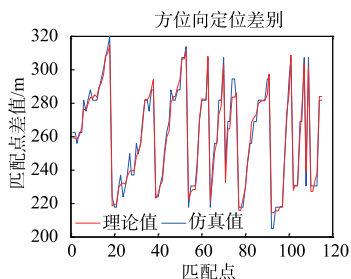


图19 匹配点方位向定位偏移

为了进一步说明姿态角反演算法的鲁棒性,下面再取几组数据进行仿真,仿真结果如表3所示。

表3 多组姿态误差仿真结果

仿真组次	误差设定值(度)			反演结果(度)		
	偏航角	俯仰角	横滚角	偏航角	俯仰角	横滚角
1	-1	-1	-1.5	-0.99	-0.99	-1.49
2	1	1	-2	0.96	1.03	-2.01
3	2	-2	2	2.09	-2.09	2.00

通过观察以上仿真结果可以看出该姿态反演模型反演得到的姿态角误差在 0.04 度以内,结果表明姿态反演算法有较高的姿态角反演精度,验证了姿态角反演算法的有效性和鲁棒性。

3.2 实测数据验证

在上一小节中通过仿真数据验证了条纹匹配和观测反演算法的可行性,在本节中,将结合实际雷达系统获得的干涉条纹和根据 DEM 计算得到的干涉条纹进行处理,验证条纹匹配和观测反演算法的可行性。

本文实测数据采用电子所微波成像重点实验室自主研制的 Ku 波段机载双天线 FMCW InSAR 系统,该系统采用单通道标准模式,系统参数列表如表 4 所示,图 20 所示为 FMCW InSAR 系统获得的去平地相位图,图 21 所示为根据 DEM 生成的无位置误差和姿态误差的去平地相位图像。

表4 InSAR 系统参数列表

B	λ	H	α	R_0
0.4337m	2.07cm	1898.86m	41.9627°	1672.661m

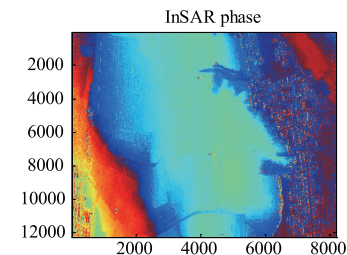


图20 InSAR系统获得的去平地相位图

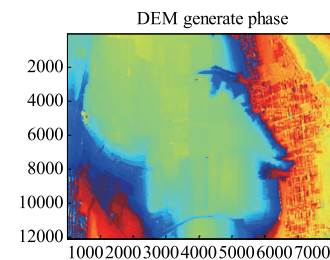


图21 根据DEM生成的去平地相位图

3.2.1 条纹匹配结果

为了进一步通过真实数据验证 SIFT 算法的有效性,首先对无误差的两幅干涉条纹图进行匹配,得到的匹配结果如图 22 所示,其中左侧为根据 DEM 生成的干涉条纹,右侧为 InSAR 系统获得的干涉条纹图。

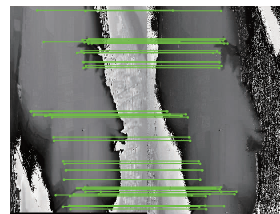


图22 干涉条纹匹配结果

根据图 22 所示的结果可以发现改进的 SIFT 算法对实测干涉相位匹配中亦有较好的效果,为了进一步定量评估匹配结果,与 3.1 节中的分析相似,将匹配点在各自原图像中的位置进行相减得到距离向和方位向定位偏移,结果如图 23 和图 24 所示.从定量分析结果可以发现两个干涉条纹图匹配之后距离向匹配完全正确,方位向匹配误差在 0.5m 以内。

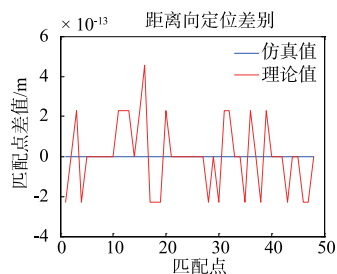


图23 匹配点距离向定位偏移

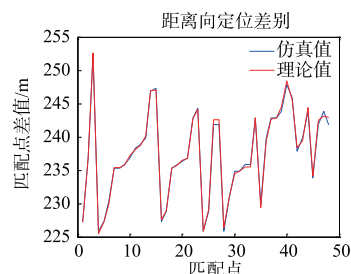


图26 匹配点距离向定位偏移

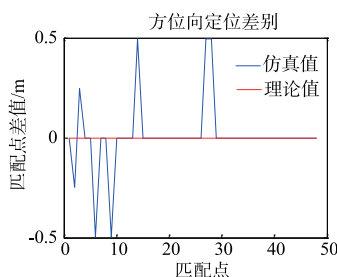


图24 匹配点方位向定位偏移

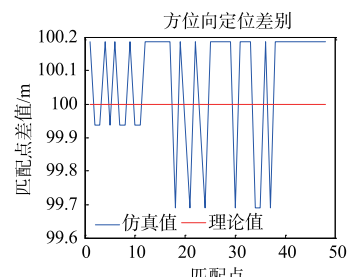


图27 匹配点方位向定位偏移

根据以上实测数据和结果分析可得:改进的 SIFT 算法在实测干涉条纹匹配中有较高的精度,通过实测数据进一步验证了 SIFT 匹配算法在条纹匹配中的有效性。

3.2.2 观测量反演结果

(1) 位置反演结果

在 DEM 生成干涉条纹中加入位置误差来获得包含位置误差的干涉条纹,并与 InSAR 系统获得的条纹图进行匹配得到定位偏移,并结合 2.2.2 节中介绍的位置反演模型反演得到位置误差。

在 DEM 生成干涉条纹时加入 200m 距离向误差、100m 方位向误差和 50m 高程向误差,得到条纹图匹配结果如图 25 所示,图 26 和图 27 为匹配点距离向和方位向的定位偏移值,结合多组定位偏移结果利用 LM 算法求解式(3)可反演得到平台的位置误差结果为:200.1054m 距离向误差、100.0253m 方位向误差和 49.7098m 高度误差。反演误差:距离向 0.1054m、方位向 0.0253m 和高度 0.2902m。

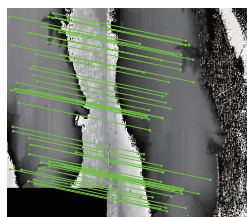


图25 加入位置误差的条纹图匹配结果

通过以上结果可以发现:根据条纹匹配获得的定位偏移反演得到的位置误差精度较高。

下面再设置 3 组位置误差,进行干涉条纹匹配和位

置反演操作,实验结果如表 5 所示。

表 5 多组位置误差实际数据处理结果

仿真组次	误差设定值(m)			反演结果(m)		
	距离向	方位向	高程向	距离向	方位向	高程向
1	50	50	30	49.40	50.21	30.35
2	100	100	-30	99.83	99.71	-29.94
3	150	150	-50	150.46	150.08	-50.61

通过观察以上几组实验结果可以看出该位置反演模型反演得到的位置误差在 1m 以内,有较高的位置反演精度,通过实测数据验证了位置反演算法的有效性和鲁棒性。

(2) 姿态反演结果

在 DEM 生成干涉条纹中加入姿态误差来获得包含姿态误差的干涉条纹,并与 InSAR 系统获得的干涉条纹图进行匹配得到定位偏移,并结合 2.2.3 节中介绍的姿态反演模型反演得到姿态角误差。

加入 1 度偏航角误差、1 度俯仰角误差和 1 度横滚角误差,得到条纹匹配结果如图 28 所示,图 29 和图 30 为匹配点距离向和方位向的定位偏移值,通过求解式(14)反演得到平台的位置误差结果为:0.9864 度的偏航角误差、1.0138 度俯仰角误差和 0.9975 度横滚角误差。反演误差:偏航角 0.0136 度、俯仰角 0.0138 和横滚角 0.0025 度。

通过以上结果可以发现:根据条纹匹配获得的定位偏移反演得到的姿态误差精度较高。

下面再设置 3 组姿态误差,进行干涉条纹匹配和位置反演操作,实验结果如表 6 所示。

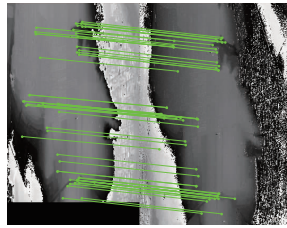


图28 加入姿态误差的条纹图匹配结果

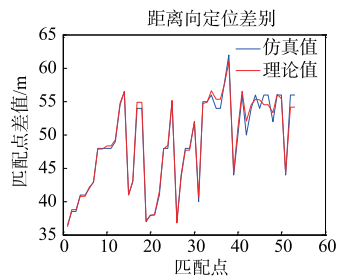


图29 匹配点距离向定位偏移

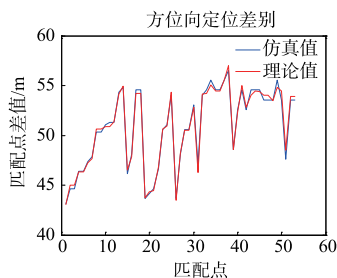


图30 匹配点方位向定位偏移

表 6 多组姿态误差实际数据处理结果

仿真组次	误差设定值(度)			反演结果(度)		
	偏航角	俯仰角	偏航角	偏航角	偏航角	横滚角
1	0.5	0.5	0.5	0.54	0.46	0.49
2	1.5	1.5	1.5	1.50	1.50	1.50
3	2	2	2	2.01	1.99	2.00

通过观察以上几组实验结果可以看出该姿态反演模型反演得到的姿态角误差在 0.04 度以内,结果表明姿态反演算法有较高的姿态角反演精度,通过实测数据验证了姿态角反演算法的有效性和鲁棒性。

4 结论

本文首先介绍了现有的组合导航系统的优缺点,针对现有组合导航系统存在的问题,提出了基于条纹匹配的 InSAR/INS 组合导航方法;然后对 InSAR/INS 组合导航系统的原理和方法进行了详细介绍,包括条纹匹配、观测量反演和组合滤波等的三部分的研究方法;最后通过仿真和实测数据验证了条纹匹配和观测量反演算法的可行性.在以后的工作中,需要进行位置

与姿态解耦算法以及组合滤波方法的研究。

参考文献

- [1] Savage P. Strapdown inertial navigation integration algorithm design part 2: velocity and position algorithms[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 1998, 21(2): 208 - 221.
- [2] Kullander L. Development of a terrain navigation system for AUV's[A]. Proceedings of the 6Th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology [C]. New York: IEEE, 1989. 494 - 501.
- [3] Wang K, Yong Y. Influence of application conditions on terrain-aided navigation[A]. 8th World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Jinan: WCICA 2010 Organizing Committee, 2010. 391 - 396.
- [4] 程传奇,郝向阳,张振杰,等.鲁棒性地形匹配/惯性组合导航算法[J].中国惯性技术学报,2016,24(2): 202 - 207.
Cheng Chuanqi, Hao Xiangyang, Zhang Zhenjie, et al. Robust integrated navigation algorithm of terrain aided navigation/INS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(2): 202 - 207. (in Chinese)
- [5] Hong S, Man H, Chun H, et al. Observability of error states in GPS/INS integration[J]. IEEE Transactions On Vehicular Technology, 2005, 54(2): 731 - 743.
- [6] 袁上策.北斗导航抗干扰算法研究及实现[D].成都:电子科技大学,2015.
- [7] Greco M, Pinelli G, Kulpa K, et al. The study on SAR images exploitation for air platform navigation purposes[A]. 2011 Proceedings International Radar Symposium [C]. Germany: IEEE, 2011. 347 - 352.
- [8] Nitti D, Bovenga F, Chiaradia M, et al. Feasibility of using synthetic aperture radar to aid UAV navigation[J]. Sensors, 2015, 15(8): 18334 - 18359.
- [9] Greco M, Kulpa K, Pinelli G, et al. SAR and InSAR georeferencing algorithms for inertial navigation systems[J]. Proc Spie, 2011, 8008(36): 80081O - 1 - 80081O - 7.
- [10] 邹世开,庄琼琼,丁子明.用误差估值累加实现组合导航系统的闭环校正[J].电子学报,2001,29(9): 1221 - 1224.
Zou Shikai, Zhuang Qiongqiong, Ding Ziming. Using Accumulated errors to realize close-loop rectification of integrated navigation system [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(9): 1221 - 1224. (in Chinese)
- [11] Lowe D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91 - 110.
- [12] 王峰,尤红建,傅兴玉,等.应用于多源 SAR 图像匹配的级联 SIFT 算法[J].电子学报,2016,44(3): 548 - 554.

- Wang Feng, You Hongjian, Fu Xingyu, et al. Cascade SIFT matching method for multi-source SAR images[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(3): 548 - 554. (in Chinese)
- [13] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Graphics Image Process, 1981, 24(6): 381 - 395.
- [14] Torr P H S, Zisserman A. MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 78(1): 138 - 156.
- [15] Madsen K, Nielsen H B, Tingleff O. Methods for non-linear least squares problems [EB/OL]. Http://www.imm.dtu.dk/courses/02611/nllsq.pdf. 2004.
- [16] 唐晓青. 机载干涉 SAR 运动误差建模与补偿方法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [17] 胡振涛, 胡玉梅, 刘先省. 量测提升卡尔曼滤波 [J]. 电子学报, 2016, 44(5): 1149 - 1155.
Hu Zhentao, Hu Yumei, Liu Xianxing. Kalman filter based on measurement lifting strategy [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(5): 1149 - 1155. (in Chinese)
- [18] 张红敏. SAR 图像高精度定位技术研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.

作者简介



蒋 帅 男, 1990 年生, 中国科学院电子学研究所博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达信号处理、组合导航。

E-mail: jiangshuai13@mails.ucas.ac.cn



向茂生 男, 1964 年生, 研究员, 研究领域为干涉合成孔径雷达原理、方法与应用。



汪丙南(通信作者) 男, 1984 年出生, 博士, 助理研究员, 从事 InSAR 数据处理方法研究。重点研究机载 InSAR 制图技术、多通道 InSAR 处理、极化 InSAR 处理。

E-mail: wbn@mail.ie.ac.cn