

一种用于 InSAR/INS 组合导航的 姿态角反演方法

蒋 帅^{1,2},汪丙南¹,向茂生^{1,2},付希凯^{1,2},孙小凡^{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: 平台的姿态信息对导航十分重要,但合成孔径雷达辅助惯导系统无法获得平台的姿态信息,单天线 GPS(Global Positioning System)无法完成姿态测量的需求. 针对以上问题提出基于条纹匹配的干涉合成孔径雷达辅助惯导的组合导航方法,该导航方法中干涉合成孔径雷达系统对平台的姿态角比较敏感,可以高精度地反演平台的姿态信息. 本文通过分析平台的姿态误差对定位误差的影响,建立姿态角反演模型,根据条纹匹配得到的定位偏移结果,利用 Levenberg-Marquardt(LM)算法求解非线性方程组完成平台姿态角的反演. 最后通过仿真和干涉合成孔径雷达实际数据验证了姿态角反演模型的有效性.

关键词: InSAR/INS 组合导航; 条纹匹配; 姿态角反演模型; LM 算法

中图分类号: V249; TN959 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)03-0513-07

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.001

An Inversion Method of the Attitude for InSAR/INS Integrated Navigation

JIANG Shuai^{1,2}, WANG Bing-nan¹, XIANG Mao-sheng¹, FU Xi-kai^{1,2}, SUN Xiao-fan^{1,2}, LI Yin-wei³

(1. State Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, 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 attitude information of the platform is important for navigation, but the attitude information of the platform cannot be obtained in the synthetic aperture radar (SAR) aided inertial navigation system (SAR/INS). The single-antenna global positioning system (GPS) cannot complete the requirement of attitude measurement. Therefore, we propose a method of interferometric SAR aided INS (InSAR/INS) system based on interferogram matching. The InSAR system is susceptible to the attitude of the platform, therefore, the attitude of the platform can be inverted by the interferometric system with high precision. In this article, we analyze the effects of attitude errors on the location error and establish the inversion model of attitude. According to the location errors gained by interferogram matching, we can obtain the attitude information through solving nonlinear equation sets with Levenberg Marquardt (LM) algorithm. At last, we verify the validity of inversion model by simulation and actual data.

Key words: InSAR/INS integrated navigation; interferogram matching; inversion model of attitude; LM algorithm.

1 引言

无人机和测绘技术的发展对导航系统的精度要求越来越高,研究高精度的导航系统有着十分重要的意义. 惯性导航系统^[1] (Inertial Navigation System, INS) 输出

出长时间稳定且不受外界干扰,是目前导航系统的重要组成部分. 但 INS 误差随时间积累,所以需要其他系统与之进行组合来纠正 INS 误差,达到精确制导的目的.

平台的姿态角信息对导航是十分重要,在组合导

航中加入姿态观测信息后可以改善系统的可观测性^[2],使得导航精度大幅提升^[3],此外通过姿态测量亦可掌握飞机的飞行姿势^[4].但是现有的组合导航方式大多不能获得平台的姿态信息,单天线 GPS 接收机无法完成姿态测量的需求,如果想要得到姿态信息,就需要多个接收机同时进行数据测量,利用互补滤波将电子罗盘、加速度计与陀螺仪等传感器数据进行融合,得到了收敛的全姿态角信息^[4].但是 GPS/INS 为非自主导航,信号易受人为干扰,不可对其完全依赖.

SAR/INS 组合导航^[5,6]为自主导航,但单个合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统无法实现姿态的测量,导航精度相对较差.干涉合成孔径雷达(Interferometric SAR, InSAR)^[7]为双天线 SAR 系统,具备 SAR/INS 自主导航的能力.由 InSAR 原理可知干涉相位对姿态角信息比较敏感,较小的姿态角变化即可引起干涉条纹的较大变化,匹配时直接使用干涉条纹进行匹配,匹配结果可用于高精度地反演横滚角等姿态信息,这是其他导航方式所不具备的优势;此外相比于使用 DEM 进行匹配,条纹匹配实时性更高.

Davide O. Nitti^[8-10]等人对 InSAR 辅助 INS 组合导航的可行性进行论证,从姿态误差和位置误差对斜距向和方位向定位偏移等的影响进行分析,证明了 InSAR 辅助 INS 导航的可行性.

2 姿态角误差对定位误差影响分析及反演模型建立

如图 1 所示为 InSAR/INS 组合导航流程图:首先通过干涉 SAR 系统实时获得干涉条纹,同时根据实际飞行轨迹结合已存储的地形数据库(Digital Elevation Model, DEM)来实时生成干涉条纹;其次将两个干涉条纹进行匹配,得到方位向和距离向定位偏移;然后根据定位偏移精确反演平台的姿态和位置信息;最后将反演得到的位置和姿态等信息与 IMU 测得的信息进行全状态组合滤波处理,得到导航输出.

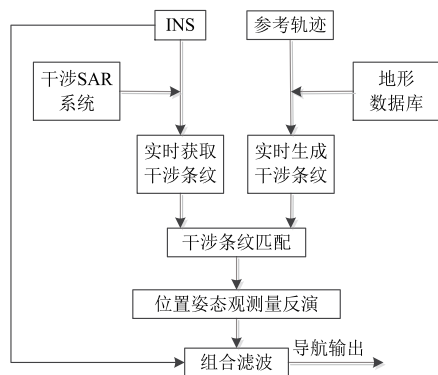


图1 InSAR/INS组合导航流程图

2.1 俯仰角误差影响分析及反演模型

2.1.1 俯仰角误差引起定位偏移

如图 2 所示为考虑俯仰角后的雷达波束照射图(假设初始俯仰角为 0),其中 H 为平台高度, θ 为初始下视角.方位和距离向定位偏移为:

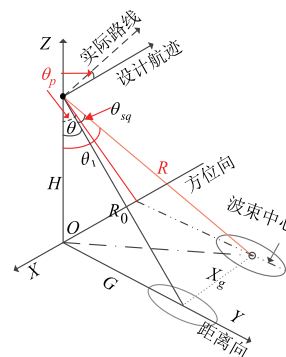


图2 考虑俯仰角的几何关系图

$$\begin{cases} \Delta x = X_g = H \tan \theta_p \\ \Delta y = \frac{H}{\cos \theta_p} \tan \theta - H \tan \theta \end{cases} \quad (1)$$

由于俯仰角 θ_p 较小,从式(1)可以看出 θ_p 对方位向定位偏移 Δx 的影响比对距离向定位偏移 Δy 的影响更大,且与平台高度 H 成正比.

取 $\theta = 45^\circ$ 、 $\theta_p = 1^\circ$ 、 $H = 3350.6\text{m}$,根据式(1)可以得到 1° 的 θ_p 将导致 58.48m 方位向定位偏移和 0.5104m 距离向定位偏移.

2.1.2 俯仰角反演模型

结合式(1)构建非线性方程组:

$$F = (\Delta X - H \tan \theta_p)^2 + \left(\Delta Y - \left(\frac{H}{\cos \theta_p} \tan \theta - H \tan \theta \right) \right)^2 \quad (2)$$

式(2)中 ΔX 、 ΔY 为条纹匹配得到的方位向到和距离向的定位偏移值.由于条纹匹配会得到多组同名点,即可得到多组距离向和方位向定位偏移结果,式(2)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俯仰角 θ_p 的值.在本文中,使用 LM^[11]算法求解式(2).LM 算法是一种非线性最小二乘方法,它是利用梯度求极值的算法,具有梯度法和牛顿法的优点.

通过以上分析可知,较小的俯仰角误差将会引起距离向定位偏移和较大的方位向定位偏移,所以利用条纹匹配得到的定位偏移结果反演俯仰角误差是可行的.

2.2 偏航角误差影响分析及反演模型

2.2.1 偏航角误差引起定位偏移

如图 3 所示为考虑偏航角后的雷达波束照射图,方位和距离向定位偏移为:

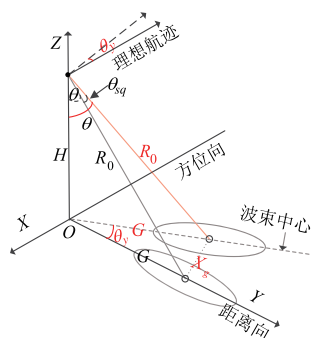


图3 考虑偏航角的几何关系图

$$\begin{cases} \Delta x = G \sin \theta_y = H \tan \theta \sin \theta_y \\ \Delta y = H \tan \theta \cos \theta_y - H \tan \theta \end{cases} \quad (3)$$

由于偏航角 θ_y 较小,从式(3)可以看出偏航角误差对方位向定位偏移 Δx 的影响比对距离向定位偏移 Δy 的影响更大。

取 $\theta_y = 1^\circ$,根据式(3)可以得到 $1^\circ \theta_y$ 误差将导致 58.48m 方位向定位偏移和 -0.5103m 方位向定位偏移, θ_y 对方位向定位的影响比对距离向的影响更显著。

2.2.2 偏航角反演模型

结合式(3)构建非线性方程组:

$$F = (\Delta X - H \tan \theta \sin \theta_y)^2 + (\Delta Y - (H \tan \theta \cos \theta_y - H \tan \theta))^2 \quad (4)$$

利用 LM 算法求解式(4),可以得到 θ_y 的反演结果。通过以上分析可知,较小 θ_y 误差将会引起距离向定位偏移和较大的方位向定位偏移,所以通过条纹匹配得到的定位偏移结果反演偏航角误差是可行的。

2.3 横滚角误差影响分析及反演模型

由 InSAR 的性质可知干涉相位对横滚角十分敏感,同时横滚角 θ_r 又会引起距离向的定位偏移,本文分别从横滚角误差对定位偏移的影响和对干涉相位的影响进行分析。

2.3.1 横滚角误差对定位偏移的影响

如图 4 所示为 θ_r 后的雷达波束照射图,方位和距离向定位偏移为:

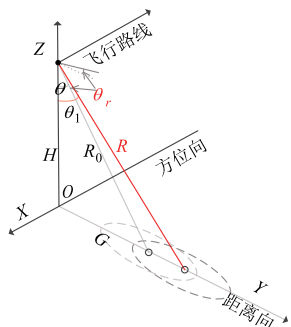


图4 考虑横滚角的几何关系图

$$\begin{cases} \Delta x = 0 \\ \Delta y = H \tan(\theta + \theta_r) - H \tan \theta \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)中可以看出 θ_r 误差不会引起方位向定位偏移 Δx ,只会引起距离向定位偏移 Δy 。

结合式(5)构建非线性方程组:

$$F = \Delta Y - (H \tan(\theta + \theta_r) - H \tan \theta) \quad (6)$$

利用 LM 算法求解式(6),可以得到 θ_r 。通过以上分析可知, θ_r 误差将会引起距离向定位偏移,所以通过条纹匹配得到的定位偏移结果反演横滚角误差是可行的。

2.3.2 横滚角误差对干涉相位的影响

考虑 θ_r 误差存在时,干涉相位表达式为

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

其中, B 为基线长度, α 为基线倾角。取 $\lambda = 0.03125\text{m}$, $B = 1$, $\theta = 45^\circ$, $\alpha = 0^\circ$ 。根据式(7)进行计算可知 0.35° 的横滚角误差将导致超过 100° 的相位变化。因此通过干涉相位变化来反演平台的横滚角误差是可行的。

结合式(7)构建非线性方程组:

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

其中 $\Delta \varphi$ 为通过条纹匹配得到的同名点的相位。结合仿真得到的多组相位数据,通过 LM 算法求解式(8),可以得到 θ_r 的反演结果。

2.4 姿态角误差耦合影响分析及解耦模型

2.4.1 姿态角误差引起的定位偏移

前面分别考虑单独存在俯仰角、横滚角和偏航角误差情况下对方位向和距离向定位误差的影响。在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在一起对定位误差的影响。

二维天线波束指向误差与横滚、俯仰和偏航的关系^[12]如图 5 所示。

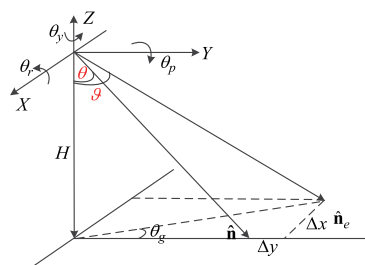


图5 波束指向误差几何示意图

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:

$$M_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ 0 & \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix}, M_p = \begin{bmatrix} \cos \theta_p & 0 & \sin \theta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_p & 0 & \cos \theta_p \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_Y = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & -\sin\theta_y & 0 \\ \sin\theta_y & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

经姿态旋转后的天线波束指向矢量变为

$$\hat{\mathbf{n}}_e = \mathbf{M}_R \mathbf{M}_p \mathbf{M}_y \hat{\mathbf{n}} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\theta_p \sin\theta_y \sin\theta - \sin\theta_p \cos\theta \\ \cos\theta_r \cos\theta_y \sin\theta + \sin\theta_r \cos\theta_p \cos\theta - \sin\theta_r \sin\theta_p \sin\theta_y \sin\theta \\ \sin\theta_r \cos\theta_y \sin\theta - \cos\theta_r \cos\theta_p \cos\theta + \cos\theta_r \sin\theta_p \sin\theta_y \sin\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

则距离向波束指向误差为

$$\Delta\delta_r = \arctan\left(-\frac{y}{z}\right) - \theta \approx \theta_r \quad (11)$$

则方位向波束指向误差为

$$\Delta\delta_{az} = \arctan\left(\frac{-x}{\sqrt{y^2 + z^2}}\right) \approx \theta_y \sin\theta + \theta_p \cos\theta \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可以发现天线波束指向的距离误差主要由横滚引起,而方位向误差主要由偏航和俯仰造成,与前文的结论相同。

加入姿态角误差($\theta_r, \theta_p, \theta_y$)后雷达视角记为 ϑ ,则由姿态角引起的定位偏移为

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

式(13)中的距离向和方位向定位偏移值与三个姿态角误差均有关,即三个姿态角互相耦合,因此在反演姿态角时需要将三个姿态角进行解耦得到三个姿态角误差。

2.4.2 姿态角解耦反演模型

根据式(13)构建非线性方程组:

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

利用 LM 算法结合匹配得到的多组 $\Delta X, \Delta Y$ 求解式

(14),可以计算得到姿态角反演结果。

通过以上分析可知,所以通过条纹匹配得到的定位偏移结果反演姿态角误差是可行的。

3 实验验证

干涉相位含有丰富的地形信息,匹配时直接使用相位进行匹配,匹配精度高且省去计算 DEM 的繁琐过程。由于姿态误差的存在,干涉相位图出现一定程度的旋转或变形,所以匹配算法需要具有一定的容错能力。尺度不变特征转换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)^[13]特征是图像的局部特征,其对旋转、尺度缩放等保持不变性,运算速度快,可准确匹配,所以本文采用 SIFT^[14,15]算法实现条纹匹配。

根据第2节建立的反演模型,本文将从仿真和实测数据进行实验验证。

3.1 仿真验证

根据已有 DEM 仿真 InSAR 回波并进行干涉处理得到实际干涉条纹,同时根据 DEM 和轨迹参数生成基准干涉条纹进行仿真验证。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数列表

B	λ	H	F_r	α	R_0	\bar{h}
1m	3.125cm	4500m	0.25GHz	0°	3944.78m	1149.4m

3.1.1 俯仰角反演结果

2.1 中分析了 θ_p 对定位误差的影响,本节通过仿真验证俯仰角反演模型的有效性。图 6(a)为考虑 θ_p 的条纹图匹配结果,其中左图为加入 1°俯仰角误差后根据 DEM 生成的干涉条纹图。将匹配点在两幅图像中的位置相减得到距离向和方位向定位偏移如图 6(b)和(c)所示。

从图 6(b)和(c)可以得到仿真结果:距离向定位偏移均值为 0.4200m,方位向定位偏移均值为 57.6000m;式(1)计算得到 0.5103m 距离向定位偏移、58.48m 方位向定位偏移。仿真结果与理论结果比较接近,验证了算法的有效性。

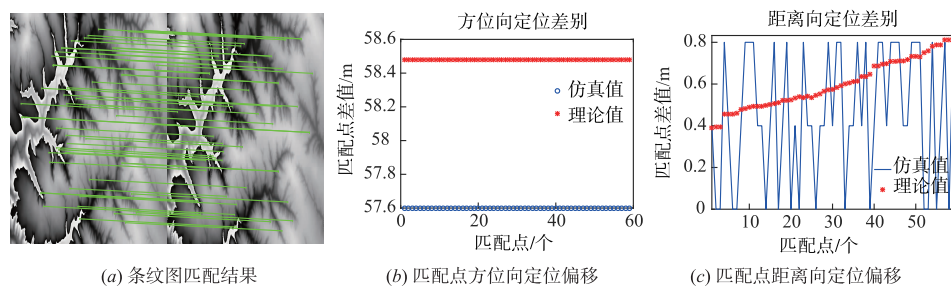


图6 考虑俯仰角误差的条纹图匹配及定位结果

结合定位偏移结果,利用 LM 算法求解式(2)得 $\theta_p = 0.9915^\circ$,反演误差为 0.0085° ,精度较高,验证了俯仰角反演模型的有效性。

3.1.2 偏航角反演结果

图 7(a)为考虑 θ_y 的条纹图匹配结果,定位偏移的理论值和仿真值如图 7(b)和(c)所示。

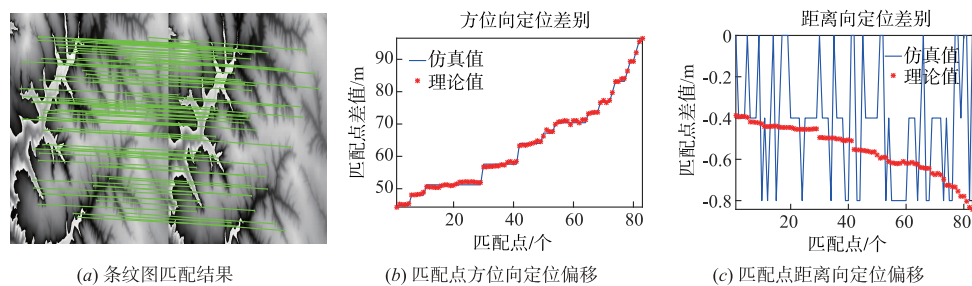


图7 考虑偏航角误差的条纹图匹配及定位结果

结合仿真得到的距离向和方位向定位偏移结果,利用 LM 算法求解式(4)得 $\theta_y = 1.0235^\circ$, 误差为 0.0235° , 验证了偏航角反演模型的有效性.

3.1.3 横滚角反演结果

图8(a)为考虑 θ_r 的条纹匹配结果,图8(b)对比了距离向定位误差的仿真结果与理论值.

由 2.3 节的分析可知干涉相位对横滚角比较敏感,因此比较了匹配点处的干涉相位值的差值,如图8(c)中蓝色曲线所示,根据式(7)计算理论干涉相位并求匹配点处的干涉相位值的差值,如图8(c)中红色曲线所示.

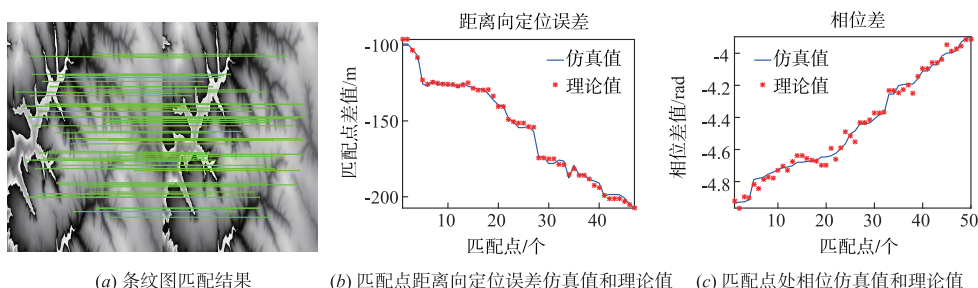


图8 考虑横滚角误差的条纹图匹配、定位及相位差结果

(1) 结合仿真得到的距离向和方位向定位偏移结果,利用 LM 算法求解式(6)得 $\theta_r = 0.9899^\circ$, 反演误差为 0.0101° . 仿真结果表明可以利用定位误差较精确地反演横滚角.

(2) 结合仿真得到的相位数据,通过 LM 算法求解式(8)得 $\theta_r = 0.9957^\circ$, 反演误差为 0.0043° . 仿真结果表明可以利用匹配点的相位值精确地反演横滚角.

结合(1)、(2)对比发现使用干涉相位值反演横滚角的精度更高.

3.1.4 姿态角解耦反演结果

本节根据姿态角误差耦合影响的分析,完成三个

姿态角的解耦反演. 本节中设置误差为 $\theta_r = 1^\circ$ 、 $\theta_p = 1^\circ$ 和 $\theta_y = 1^\circ$ 进行仿真.

如图9(a)所示为多个姿态角误差同时存在情况下的条纹匹配结果,从图9(b)和图(c)的定位差别可以看出仿真结果值与理论值存在较小差异,其中距离向定位偏移均值为 145.9717m , 方位向定位偏移均值为 130.0040m ; 根据式(13)计算得到理论的距离向定位偏移均值为 145.9583 , 方位向定位偏移均值为 129.2608m . 仿真结果与理论结果比较接近,验证了式(13)推导的正确性.

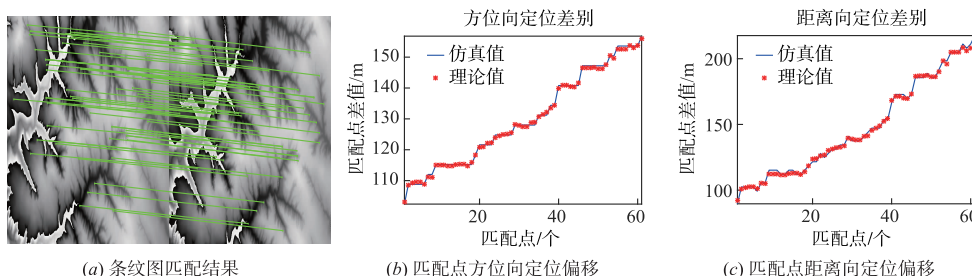


图9 多姿态角耦合情况下条纹图匹配及定位结果

利用 LM 算法结合匹配得到的 $(\Delta X, \Delta Y)$ 求解式 (14), 得反演结果为: $\theta_r = 0.9997^\circ$ 、 $\theta_p = 0.9846^\circ$ 、 $\theta_y =$

1.0250°;反演误差为:0.0003° θ_r 误差、0.0154° θ_p 误差、0.0250° θ_y 误差。

从以上结果可以看出:通过波束指向建立的姿态角反演模型可以较高精度地解耦反演姿态角信息,验证了模型的有效性。

3.2 实测数据验证

在上一节中通过仿真数据验证了条纹匹配和观测量反演算法的可行性,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量反演算法的可行性。

3.2.1 实测数据参数

本文实测数据采用实验室自主研制的 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 2 所示。

表 2 InSAR 系统参数列表

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

3.2.2 姿态角解耦反演结果

已知 POS 中存在姿态误差为 $\theta_r = 0.5^\circ$ 、 $\theta_p = 0.5^\circ$ 和 $\theta_y = 0.5^\circ$ 。条纹匹配结果图如图 10(a) 所示,从图 10(b) 和 (c) 的定位差别可以看出仿真结果值与理论值存在很小的差异。

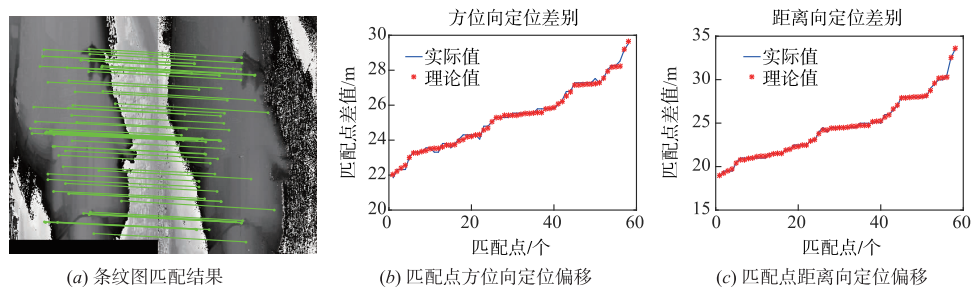


图10 多姿态角耦合情况下条纹图匹配及定位结果

利用 LM 算法结合匹配得到的 60 组 $(\Delta X, \Delta Y)$ 求解式(14),得反演结果为: $\theta_r = 0.4911^\circ$ 、 $\theta_p = 0.4787^\circ$ 、 $\theta_y = 0.5192^\circ$;反演误差为:0.0089° θ_r 误差、0.0223° θ_p 误差、0.0192° θ_y 误差。

通过实测数据验证了本文姿态角反演模型的有效性。

4 总结

针对目前大多数组合导航方式不能修正 IMU 姿态积累误差的问题,本文提出了基于 InSAR/INS 组合导航的姿态角反演模型.首先分析了平台不同姿态误差对定位误差的影响,证明了使用定位偏移反演姿态误差的可行性;其次建立了姿态角反演模型,并仿真存在单个姿态角误差和多个姿态角误差耦合的情况,通过 LM 算法实现了姿态角信息的反演,验证了反演算法的正确性;最后通过实际 InSAR 系统获得的数据验证了姿态角反演算法的有效性.下一步需要将位置信息与姿态信息同时考虑,分析位置与姿态信息的耦合关系,并使用解耦算法来解算平台的位置和姿态信息,最终将反演得到的观测量与 IMU 组合进行组合滤波得到导航输出。

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] 邓胜利, 邵雷, 吴平. SINS/GPS 全姿态组合导航系统的 UKF 算法研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(12): 24 - 28.
DENG Sheng-li, SHAO Lei, WU Ping. The UKF algorithm used in all-attitude integrated navigation system of SINS/GPS[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(12): 24 - 28. (in Chinese)
- [3] 胡东亮, 罗斌凤. INS/GPS 姿态组合导航系统卡尔曼滤波器设计[J]. 舰船电子工程, 2007(04): 64 - 66.
HU Dong-liang, LUO Bin-feng. Design on kalman filter of INS/GPS attitude determination integrated navigation system[J]. Ship Electronic Engineering, 2007(04): 64 - 66. (in Chinese)
- [4] 朱托. GPS/SINS 组合导航与姿态测量的设计[D]. 四川: 西华大学, 2014.
- [5] 刘俭飞. INS/SAR 组合导航技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] 任三孩. 弹载 SAR 景象匹配制导关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [7] 葛仕奇, 刘光炎. 星载多基线 InSAR 理想相位图的快速仿真方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 571 - 576.
GE Shi-qi, LIU Guang-yan. Fast simulation method of ideal phase map for spaceborne multi-baseline InSAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(3): 571 - 576. (in Chinese)

- [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] DAVIDE O N, BOVENGA F, MOREA A, et al. On the use of SAR interferometry to aid navigation of UAV [A]. Charles R B. *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2012* [C]. United Kingdom: Spie Remote Sensing, 2012. 853203.
- [11] MADSEN K, NIELSEN H B, TINGLEFF O. Methods for Non-linear Least Squares Problems [EB/OL]. Lecture Notes, <http://www.imm.dtu.dk/courses/02611/nllsq.pdf>, 2004.
- [12] 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.
- [13] 高放, 陆频频, 王旭. 基于相似特征点集的 SIFT 匹配改进算法 [J]. *测绘工程*, 2016, 25(6):19 – 23.
GAO Fang, LU Pin-pin, WANG Xu. Improved sift matching algorithm based on similar feature point set [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2016, 25(6):19 – 23. (in Chinese)
- [14] LOWE D. Object recognition from local scale-invariant features [A]. Kerkyra, *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. [C]. Greece: IEEE, 1999. 1150 – 1157.
- [15] LOWE D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91 – 110.

作者简介



蒋 帅 男, 1990 年出生, 中国科学院电子学研究所读博士生, 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



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



向茂生 男, 1964 年出生, 博士生导师, 研究员, 研究领域为干涉合成孔径雷达原理、方法与应用。

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