

## 结合景象匹配与惯导信息的 SAR 平台定位方法\*

陈圣义<sup>1,2</sup>, 刘晓春<sup>1,2</sup>, 雷志辉<sup>1,2</sup>, 于起峰<sup>1,2</sup>, 崔文<sup>3</sup>

- (1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;
2. 国防科技大学 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;
3. 中国人民解放军 96656 部队, 北京 102208)

**摘要:**利用高度传感器提供高度信息,结合高精度异源图像匹配技术与惯导系统漂移修正方法实现 SAR 平台定位。根据成像中间时刻 SAR 平台与 SAR 图像中心线上物点在水平面的投影共线的特性,在单帧图像中心线上均匀选取若干点与光学基准图进行高精度景象匹配;计算平台在水平面上投影位置,并利用高度信息确定其空间位置;使用序列图像定位结果估计惯导系统漂移参数,对惯导系统输出的位置数据进行修正,实现高精度的 SAR 平台定位。对各误差因素的影响进行分析,推导了精度估计公式。仿真和实际序列图像实验结果表明,方法正确可行,具有较高的平台定位精度,具备一定工程实用价值。

**关键词:**合成孔径雷达;平台定位;景象匹配;惯导漂移;误差传递

**中图分类号:** TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)04-105-05

## SAR platform location method based on scene matching and inertial navigation system information

CHEN Shengyi<sup>1,2</sup>, LIU Xiaochun<sup>1,2</sup>, LEI Zhihui<sup>1,2</sup>, YU Qifeng<sup>1,2</sup>, CUI Wen<sup>3</sup>

- (1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. The PLA Unit 96656, Beijing 102208, China)

**Abstract:** Aided by elevation information provided by height sensor, SAR (synthetic aperture radar) platform geo-location was realized by combining the high-precision image matching technology and the INS (inertial navigation system) drift correction method. According to the fact that the platform is on the centerline of SAR image at the middle imaging time, some points on the centerline of a single image were equally selected to conduct the high precision matching with the optical reference image. The projection position of SAR platform on the horizontal plane was calculated and the spatial position was positioned by making use of the elevation information. By use of the position results of sequence images, the drifting parameters of INS were estimated and then the outputting position data were corrected to achieve the high-accuracy platform geo-location. The impacts of different errors on location precision were analyzed and the precision estimation formulas were derived. Both simulation and real data test results show high precision and practical value for engineering of the proposed method.

**Key words:** synthetic aperture radar; platform geo-location; scene matching; inertial sensor drift; error propagation

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 具有全天时、全天候成像的优点,随其成像技术的发展<sup>[1]</sup>,图像分辨率越来越高,其在景象匹配等视觉导航系统中应用广泛<sup>[2-3]</sup>。利用 SAR 图像与基准图进行匹配,并与惯导系统 (Inertial Navigation System, INS)<sup>[4]</sup> 构成组合导航系统,可用于 SAR 平台长航时导航。

李亚超等<sup>[5]</sup>提出了一种比较简单的方法,利用某方位门 (距离向) 上的两个点进行高精度匹

配,进而解算 SAR 平台位置。该方法计算量较小但要求匹配精度高,否则在飞行方向 (方位向) 容易产生较大误差,对于此,文献[6]提出利用 SAR 图像中心线上若干点进行匹配定位,有了很大的改善。此外,文献[7]中将 SAR 平台运动轨迹用参数化多项式来描述,并利用若干控制点和最小二乘法解算运动参数。类似地,程华等<sup>[8]</sup>使用最小二乘支持向量机 (Least Squares Support Vector Machines, LSSVM) 来估计这些运动参数。

\* 收稿日期:2016-11-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB733100)

作者简介:陈圣义(1989—),男,江西萍乡人,博士研究生,E-mail:chensy8904@sina.com;

雷志辉(通信作者),男,副教授,硕士,E-mail:zhihuilei@hotmail.com

此类方法充分利用了控制点信息,但其易受各采样时刻平台定位误差影响,而且参数化运动方程往往不能用来描述长航时平台运动。INS/SAR 组合导航技术中主要利用了卡尔曼滤波方法<sup>[9]</sup>,实现 INS 与视觉导航数据的融合。这类方法需要合理配置参数初值,且需要一定观测时间实现参数收敛。景象匹配只能提供平台在水平面的位置信息,利用高度传感器可以获得较高精度的高度信息<sup>[10]</sup>。

### 1 SAR 平台定位方法

图 1 表示了 SAR 成像几何关系。在世界坐标系  $XYH$  中,  $XOY$  平面为成像区域的当地水平面,  $OH$  为高度方向, SAR 平台以速度  $v$  运动并成像,  $V$  是  $v$  在水面上的投影;  $S$  是平台在成像中心时刻的位置,  $S_0$  是  $S$  在水平面上的投影, 平台高度为  $H$ , 即  $H = \overline{SS_0}$ ;  $S_0L$  在  $XOY$  平面上, 是图像中心线在  $XOY$  平面的投影;  $X_i$  是  $S_0L$  上的点, 对应于图像中心线上的一系列点的匹配结果, 其斜距为  $D_i$ , 地距为  $L_i$ 。图中  $X_1$  对应于图像的中心点。

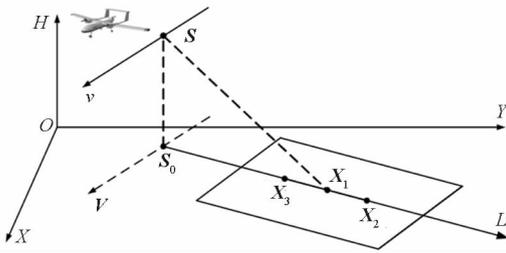


图 1 SAR 成像几何关系

Fig. 1 Geometric relation of SAR imaging

#### 1.1 利用单帧图像确定 SAR 平台位置

单帧 SAR 图像确定平台位置主要参考了文献<sup>[6]</sup>中的方法, 利用图像中心线上均匀选取的若干点进行高精度景象匹配, 再根据各点的斜距和成像中心时刻的高度数据来解算该时刻 SAR 平台的空间位置。

目前景象匹配主要使用光学基准图, 实现 SAR 图像与光学图像这两类异源图像的高精度匹配是高精度解算平台位置的重要基础。由于成像原理的差异, 这两类图像在灰度域上没有严格对应关系, 需进行适当变换, 抽取稳定信息进行匹配<sup>[11]</sup>。本文利用局部频率信息<sup>[12]</sup>进行异源图像匹配。在匹配之前, 还可以利用已知成像信息粗略地对匹配区域图像进行几何校正, 从而提高景象匹配精度。

如图 2 所示, 在 SAR 图像中心线上均匀地选取  $n$  个点进行景象匹配, 它们在当地水平面的对

应点  $X_i$  应位于中心线在  $XOY$  平面上的投影  $S_0L$  上。

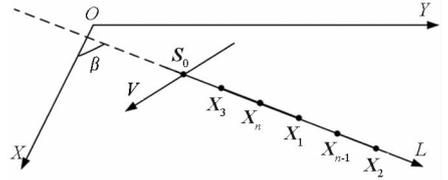


图 2 控制点拟合投影直线

Fig. 2 Fitting the projection line with control points

用齐次坐标  $X_i = [x_i \ y_i \ 1]^T$  表示  $XOY$  平面上的匹配点, 并用向量  $l = [a \ b \ 1]^T$  表示直线  $S_0L$ , 则直线上的点应满足  $ax + by + 1 = 0$ , 即  $X_i^T l = 0$ 。利用以上  $n$  个点估计  $\hat{l} = [\hat{a} \ \hat{b} \ 1]$ , 且令  $\varepsilon_i = X_i^T \hat{l}$ , 可通过如下最优化问题来估计直线:

$$[\hat{a} \ \hat{b}] = \arg \min \left( \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \right) \quad (1)$$

根据高度传感器提供的平台海拔高程  $h_s$  和高程模型给出的各匹配点的高程  $h_i$ , 令  $H_i = h_s - h_i$ , 则各点斜距为  $D_i^2 = H_i^2 + L_i^2$ 。没有高程模型时, 也可用当地平均海拔代替各点高程。设  $\hat{S}_0 = (\hat{x}_s, \hat{y}_s)$  为  $S_0$  的估计位置, 则位置估计问题转化为如式(2)所示的优化问题:

$$\begin{cases} [\hat{x}_s \ \hat{y}_s] = \arg \min \left( \sum_{i=1}^n d_i^2 \right) \\ \text{s. t. } \hat{a}\hat{x}_s + \hat{b}\hat{y}_s + 1 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $d_i = D_i - \hat{D}_i$ ,  $\hat{D}_i^2 = H_i^2 + \hat{L}_i^2$ ,  $\hat{L}_i$  为  $\hat{S}_0$  到  $X_i$  的距离。

根据  $S_0$  的估计结果, 可得 SAR 平台在世界坐标系中的坐标为  $\hat{S} = (\hat{x}_s, \hat{y}_s, h_s)$ , 即利用单帧图像解算得到的成像中心成像时刻平台空间位置。

#### 1.2 利用序列图像与惯导信息实现平台定位

利用 SAR 测速技术中认为惯导系统在一段时间内速度漂移量(即惯导速度与实际速度的差)为恒定值的假设<sup>[13]</sup>, 本文在平台定位时对速度进行积分, 惯导器件的位置误差累积表示为 1 阶模型:

$$X_{\text{INS}} = X - \Delta X_0 - v_{\Delta X} t \quad (3)$$

式中,  $X_{\text{INS}}$  为 INS 输出的位置信息,  $X$  为真实位置,  $\Delta X_0$  为零时刻惯导器件的位置漂移误差,  $v_{\Delta X}$  为惯性器件的速度漂移量,  $t$  为零时刻到当前时刻的时间。

假设第一帧图像的中间时刻为零时刻, 各帧图像中心时刻之间相差时间为  $\Delta t$ , 则第  $j$  帧图像

的中间时刻为  $t_j = (j-1)\Delta t$ , 用  $\mathbf{X}_S^j$  表示利用单帧图像解算得到的该时刻 SAR 平台位置,  $\mathbf{X}_{INS}^j$  表示该时刻惯导给出的平台位置, 根据误差模型(3)得到方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_S^1 = \mathbf{X}_{INS}^1 + \Delta\mathbf{X}_0 + \mathbf{v}_{\Delta X} t_1 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_S^N = \mathbf{X}_{INS}^N + \Delta\mathbf{X}_0 + \mathbf{v}_{\Delta X} t_N \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $N$  表示图像帧数。

整理成矩阵形式为:

$$\Delta\mathbf{Y} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{X} \quad (5)$$

$$\text{式中 } \Delta\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_S^1 - \mathbf{X}_{INS}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_S^N - \mathbf{X}_{INS}^N \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & (N-1)\Delta t \end{bmatrix}, \Delta\mathbf{X} =$$

$[\Delta\mathbf{X}_0 \quad \mathbf{v}_{\Delta X}]^T$ 。利用最小二乘方法可以计算得到惯性器件漂移模型的参数为:

$$\Delta\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\Delta\mathbf{Y} \quad (6)$$

用计算得到的误差模型参数修正 INS 输出的位置信息, 并以此作为每时刻的 SAR 平台位置:

$$\mathbf{X}_{out}^j = \mathbf{X}_{INS}^j + \Delta\hat{\mathbf{X}}_0 + \hat{\mathbf{v}}_{\Delta X}(j-1)\Delta t \quad (7)$$

## 2 误差分析

### 2.1 单帧图像解算定位误差分析

#### 2.1.1 方位向误差分析

在图2中, 通过匹配得到的  $n$  个控制点拟合直线  $S_0L$ , 进而确定直线与  $OX$  轴的夹角  $\beta$ , 其精度受各点匹配误差影响<sup>[13]</sup>。

实际匹配过程中,  $n$  个点是在中心线上均匀选取的, 假设这些点相邻间距为  $\Delta L$ , 根据文献[6]中的推导,  $\beta$  的误差与各点匹配精度  $\sigma_X$  的关系可表示为:

$$\sigma_\beta = \sqrt{\frac{12}{n(n+1)(n-1)}} \frac{\sigma_X}{\Delta L} \quad (8)$$

从而得到 SAR 平台在方位向上的定位误差为:

$$\sigma_{XV} = \sigma_\beta L_1 = \sqrt{\frac{12}{n(n+1)(n-1)}} \frac{\sigma_X L_1}{\Delta L} \quad (9)$$

#### 2.1.2 距离向误差分析

假设各匹配点对应的斜距为  $D_i^2 = L_i^2 + H_i^2$ , 而  $L_i = L_{s0} - L_{s0}$ ,  $L_{s0}$  和  $L_{i0}$  分别为  $S_0$  和第  $i$  个点在  $L$  轴上的位置, 则有  $L_{s0} = L_{i0} - \sqrt{D_i^2 - H_i^2}$ 。如文献[6]中所分析, 利用式(2)进行优化求解的实质是对各点算得的  $L_{s0}$  进行平均, 故在距离向上的定位精度可表示为:

$$\sigma_{XL} = \sqrt{\frac{\sigma_X^2}{n} + \frac{\sigma_D^2}{n} + \frac{\sigma_D^2 + \sigma_h^2}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2}{D_i^2 - H_i^2}} \quad (10)$$

式中,  $\sigma_X$  为各点匹配精度,  $\sigma_h$  为各点高程精度,  $\sigma_D$  为 SAR 成像时斜距精度。

### 2.2 修正惯导漂移后平台定位误差分析

先就方位向进行误差分析。用  $\sigma_{INS}$  表示惯性器件输出的随机误差, 则式(5)中  $\Delta\mathbf{Y}$  的协方差矩阵为  $\Sigma_{\Delta Y} = \sigma_{\Delta Y}^2 \mathbf{I}_N$ , 其中  $\sigma_{\Delta Y}^2 = \sigma_{XV}^2 + \sigma_{INS}^2$ ,  $\mathbf{I}_N$  是  $N$  维单位矩阵。令  $\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T$ , 则  $\Delta\hat{\mathbf{X}}$  的协方差矩阵为  $\Sigma_{\Delta\hat{X}} = \mathbf{B}\Sigma_{\Delta Y}\mathbf{B}^T$ , 展开得:

$$\Sigma_{\Delta\hat{X}} = \sigma_{\Delta Y}^2 \begin{bmatrix} \frac{2(2N-1)}{N(N+1)} & -\frac{6}{N(N+1)\Delta t} \\ -\frac{6}{N(N+1)\Delta t} & \frac{12}{N(N+1)(N-1)\Delta t^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

从而有  $\sigma_{\Delta\hat{X}_0}^2 = 2(2N-1)\sigma_{\Delta Y}^2/[N(N+1)]$ ,  $\sigma_{\hat{\mathbf{v}}_{\Delta X}}^2 = 12\sigma_{\Delta Y}^2/[N(N+1)(N-1)\Delta t^2]$ ,  $Cov(\Delta\hat{\mathbf{X}}_0, \hat{\mathbf{v}}_{\Delta X}) = -6\sigma_{\Delta Y}^2/[N(N+1)\Delta t]$ 。根据误差传递原理, 第  $j$  帧图像中心时刻, 修正惯导漂移后输出平台位置的误差方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_{X_{out}^j}^2 &= \sigma_{X_{INS}^j}^2 + \sigma_{\Delta\hat{X}_0}^2 + \sigma_{\hat{\mathbf{v}}_{\Delta X}}^2 (j-1)^2 \Delta t^2 + \\ &2Cov(\Delta\hat{\mathbf{X}}_0, \hat{\mathbf{v}}_{\Delta X})(j-1)\Delta t \end{aligned} \quad (12)$$

化简得到该时刻在方位向上的定位精度为:

$$\begin{aligned} \sigma_{X_{out}^j} &= \\ &\sqrt{\sigma_{INS}^2 + \frac{2(2N-1) - 12(j-1)}{N(N+1)} \sigma_{\Delta Y}^2 + \frac{12(j-1)^2}{N(N+1)(N-1)} \sigma_{\Delta Y}^2} \end{aligned} \quad (13)$$

类似地, 可以推导距离向定位精度公式。

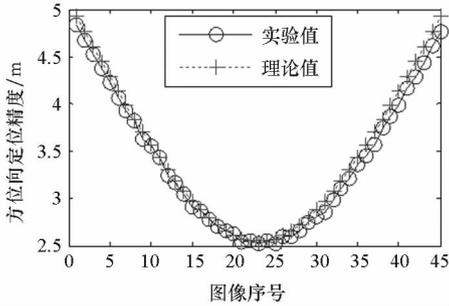
## 3 实验结果

### 3.1 仿真数据实验

仿真实验中, 假定 SAR 平台飞行高度  $h_s = 7000$  m, 其误差满足均值为 0、标准差为  $\sigma_h$  的高斯分布; 图像中心的观测距离  $L_1 = 20\,000$  m; 图像中心线上均匀取  $n = 12$  个匹配点, 相邻点距离  $\Delta L = 500$  m, 假设景象匹配获得各点位置时的匹配精度为  $\sigma_X$ ; 各斜距  $D_i$  通过平台与各匹配点位置的真值计算获得, 并添加均值为 0、标准差为  $\sigma_D$  的高斯噪声。

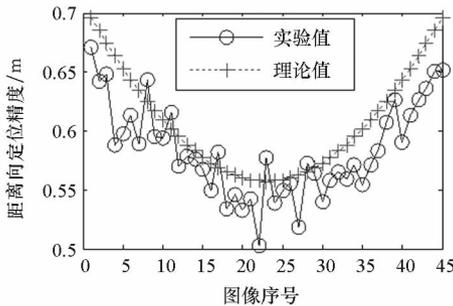
首先在典型误差条件下, 考察本文方法的定位精度。其中, 图像帧数  $N = 45$ , 景象匹配精度  $\sigma_X = 5$  m, 平台高度误差  $\sigma_h = 5$  m, 斜距误差  $\sigma_D = 1$  m, 惯导系统方位向初始位置漂移  $\Delta X_{0V} =$

1000 m、速度漂移量  $v_{\Delta V} = 1.0 \text{ m/s}$ ，距离向初始位置漂移  $\Delta X_{OL} = 1000 \text{ m}$ 、速度漂移量  $v_{\Delta VL} = 1.2 \text{ m/s}$ ，惯导定位随机误差  $\sigma_{INS} = 0.5 \text{ m}$ 。经过 500 次仿真实验，取各帧定位误差的均方根值作为实验值，并根据精度估计公式计算理论值进行对比，结果如图 3 所示。



(a) 方位向定位精度

(a) Location accuracy in azimuth direction



(b) 距离向定位精度

(b) Location accuracy in range direction

图 3 典型误差条件下定位误差

Fig. 3 Location error under typical error conditions

从图 3 的实验结果可以看出，各帧图像时刻平台定位精度的理论与实验值基本一致，表明本文方法给出的定位精度公式正确。同时还可以看到，利用序列图像的定位结果对惯导漂移进行修正后，中间帧时刻的位置输出精度最高。

在文献[8]的误差条件下，根据精度估计公式计算了本文方法所能达到的精度，与其提出的 LSSVM 方法的精度进行了对比，结果如表 1 所示，可以看到，本文方法的定位精度较其有一定提升。

表 1 本文方法与 LSSVM 方法理论定位精度对比

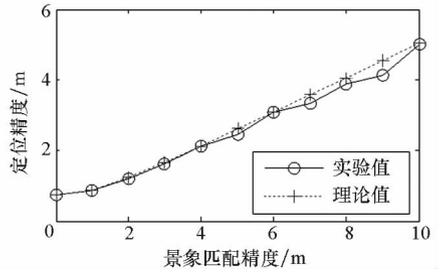
Tab. 1 Results of LSSVM and the proposed method

方法	方位向 定位精度/m	距离向 定位精度/m
LSSVM 方法	0.377	0.214
本文方法	0.199	0.101

取中间帧作为参考，图 4 给出了定位精度随景象匹配精度、SAR 平台高度误差、惯导定位随

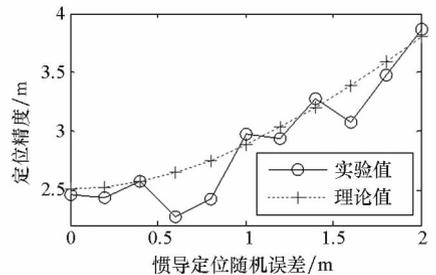
机误差以及图像帧数变化的情况。

从实验结果可以看出，图像匹配精度对定位精度影响较大；增加图像帧数有利于提高定位精度。在上述典型仿真条件下，中间帧定位精度都能优于 5 m，完全可以满足工程实际要求。



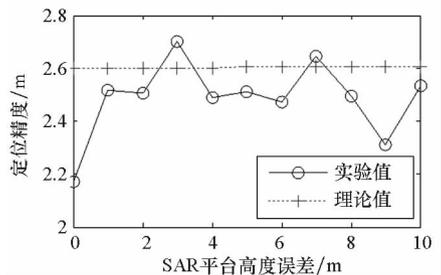
(a) 匹配精度影响

(a) Influence of matching error



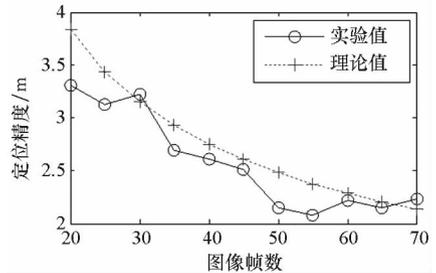
(b) 惯导定位误差影响

(b) Influence of INS position error



(c) 平台高度误差影响

(c) Influence of height error



(d) 序列图像帧数影响

(d) Influence of image quantity

图 4 不同误差对定位精度影响

Fig. 4 Influence of different errors on location accuracy

### 3.2 实际图像实验

使用实际挂飞的 SAR 序列图像进行验证实

验,该序列图像共有 26 帧。进行单帧图像匹配时,在 SAR 图像中心线上均匀地选取 13 个点进行景象匹配。基准图像从 Google Map 下载得到,经过经纬度校正<sup>[14]</sup>后精度可以达到 10 m,可以认为图像匹配精度为 10 m。

图 5 给出了其中 4 帧图像中心时刻 INS 和全球定位系统(Global Positioning System, GPS)输出的 SAR 平台位置,以及由单帧定位和序列解算得到的位置。图中各项数据的经度和纬度数值进行了脱密处理,均减去了一个常数,另外,INS 数据偏差较大也是人为进行平移造成的。可以看到,单帧匹配定位结果在方位向上波动较大,利用惯导信息进行序列解算后,结果得到了很大的改善。以 GPS 输出作为真值,单帧解算的位置误差均值为 88.85 m,序列解算位置误差均值为 19.81 m。

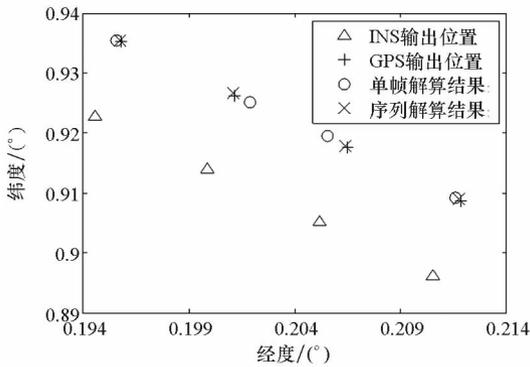


图 5 部分实际挂飞图像定位结果

Fig. 5 Location result of real SAR image

## 4 结论

利用序列图像匹配实现了 SAR 平台定位,并以此结果对惯导漂移进行修正,获得高精度的 SAR 平台位置信息。主要结论如下:

1) 对定位误差进行了分析,并给出了精度估计公式,通过典型误差条件及不同误差对定位精度影响的仿真实验结果可以看出,定位精度与分析结果基本一致,表明本文方法正确可行;

2) 在已有文献的误差条件下进行了实验对比,结果表明本文方法可以提高定位精度,实际图像实验结果也表明利用序列图像修正惯导漂移可以改善平台定位精度;

3) 本文方法解算得到的结果既可以作为传统滤波组合导航系统的初始值,也可以直接作为定位结果使用,具备一定的工程实用价值。

## 参考文献 (References)

[1] Wang W, Liao G S, Li D, et al. Focus improvement of squint bistatic SAR data using azimuth nonlinear chirp scaling[J].

IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 229 - 233.

[2] Tang Y, Zhang B, Xing M D, et al. The space-variant phase-error matching map-drift algorithm for highly squinted SAR[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(4): 845 - 849.

[3] Fan B, Huo C L, Pan C H, et al. Registration of optical and SAR satellite images by exploring the spatial relationship of the improved SIFT[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(4): 657 - 661.

[4] Ding Z J, Cai H, Yang H B. An improved multi-position calibration method for low cost micro-electro mechanical systems inertial measurement units[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2015, 229(10): 1919 - 1930.

[5] 李亚超, 吕孝雷, 王虹现, 等. 高精度景象匹配下的高速 SAR 平台定位和测速[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(11): 1851 - 1855.

LI Yachao, LYU Xiaolei, WANG Hongxian, et al. Research on positioning and measuring speed in the high speed SAR system based on high precision map matching[J]. Systems Engineering and Electronic, 2007, 29(11): 1851 - 1855. (in Chinese)

[6] 陈圣义, 刘晓春, 滕锡超, 等. 基于高精度景象匹配的 SAR 平台定位方法[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(5): 121 - 126.

CHEN Shengyi, LIU Xiaochun, TENG Xichao, et al. SAR positioning method based on high-precision scene matching[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(5): 121 - 126. (in Chinese)

[7] 李天池, 周荫清, 马海英, 等. 基于参数估计的 SAR 定位方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 372 - 374.

LI Tianchi, ZHOU Yinqing, MA Haiying, et al. SAR position method based on parameter estimation[J]. Systems Engineering and Electronic, 2007, 29(3): 372 - 374. (in Chinese)

[8] 程华, 陆微微, 田金文. 基于最小二乘支持向量机的 SAR 平台定位[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 489 - 494.

CHENG Hua, LU Weiwei, TIAN Jinwen. SAR platform geolocation based on least squares support vector machines[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 489 - 494. (in Chinese)

[9] Chen F, Xu Y X. High-speed and robust scene matching algorithm based on ORB for SAR/INS integrated navigation system[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 241/242/243/244: 439 - 443.

[10] 茹滨超, 鲜斌, 宋英麟, 等. 基于气压传感器的无人机高度测量系统[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(s2): 94 - 97.

RU Binchao, XIAN Bin, SONG Yinglin, et al. An altitude measurement unit for micro unmanned aerial vehicles based on barometer[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(s2): 94 - 97. (in Chinese)

[11] 李想, 朱遵尚, 尚洋, 等. 方向矩异源图像匹配算法[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(1): 153 - 158.

LI Xiang, ZHU Zunshang, SHANG Yang, et al. Multimodal image registration based on orientation-moment[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(1): 153 - 158. (in Chinese)

[12] Liu X C, Lei Z H, Yu Q F, et al. Multi-modal image matching based on local frequency information[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013, 3: 1 - 11.

[13] 李鑫. SAR 图像导航定位测速技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.

LI Xin. Research on SAR image navigation position and speed measuring technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)

[14] 陈圣义. 空地导弹景象匹配制导关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012.

CHEN Shengyi. Study on key technology of scene matching guidance for air-to-ground-missile[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)