

# GNSS/INS 高精度反向平滑滤波算法 在移动测图中的应用

王立兵<sup>1,2,3</sup>, 马国驹<sup>1,2</sup>, 贾瑞才<sup>1,2</sup>, 刘鹏飞<sup>1,2</sup>, 智奇楠<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081;

2. 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室, 石家庄 050081;

3. 中国人民解放军63961部队, 北京 100012)

**摘要:**针对目前城市复杂遮挡环境下高精度移动测图需要人工干预操作的问题, 满足在实际移动测绘中尤其是树木遮挡、高楼、立交桥等复杂环境下自动化高精度定位、测姿以及测速的需求, 建立了一套基于反向平滑技术的 GNSS/INS 组合导航模型。试验采用国外商用组合导航系统作为参考基准, 测试结果表明, 在典型城市市场景下通过反向平滑滤波后的位置精度达到 5 cm, 速度精度达到 0.02 m/s, 水平姿态精度达到 0.005°, 航向精度达到 0.05°。

**关键词:**移动测图; GNSS/INS 组合导航; 高精度定位测姿; 反向平滑

**本文引用格式:**王立兵, 马国驹, 贾瑞才, 等. GNSS/INS 高精度反向平滑滤波算法在移动测图中的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 112-115.

**Citation format:** WANG Libing, MA Guojun, JIA Ruicai, et al. Application of High Precision GNSS/INS Smooth Algorithm in the Mobile Mapping Area[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(3): 112-115.

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)03-0112-04

## Application of High Precision GNSS/INS Smooth Algorithm in the Mobile Mapping Area

WANG Libing<sup>1,2,3</sup>, MA Guojun<sup>1,2</sup>, JIA Ruicai<sup>1,2</sup>, LIU Pengfei<sup>1,2</sup>, ZHI Qinan<sup>1,2</sup>

(1. The 54<sup>th</sup> Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology,

Shijiazhuang 050081, China; 3. The No. 63961<sup>st</sup> Troop of PLA, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In view of that the present urban complex high-precision mobile mapping under shade environment needs human intervention operation problem, especially in meeting in the actual movement of surveying and mapping, shade trees, tall buildings, overpass under complex environment such as automated high-precision positioning, posture and speed requirements, this paper set up a technology based on reverse smooth GNSS/INS integrated navigation model. The test used the overseas commercial integrated navigation system as a reference benchmark. The test results show that in a typical urban scenarios the position accuracy is 5 cm through a reverse smoothing filter, the precision of the speed is 0.02 m/s, the horizontal posture accuracy is 0.005°, and the heading precision is 0.05°.

**Key words:** mobile mapping system; GNSS/INS integrated navigation system; high precision positioning and orientation; backwards smooth

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2018-10-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863计划)(2015AA124001); 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0502100); 国防科技预研基金资助项目(41418040102, 31512020205-2)

作者简介: 王立兵(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事组合导航研究, E-mail: chunqiwang@126.com。

通讯作者: 马国驹(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事组合导航研究, E-mail: 1245569705@qq.com。

测绘工作在国民经济发展中起着重要的基础性作用。随着科技发展和社会进步,目前测绘工作正朝着以地理信息系统(GIS)、遥感技术(RS)、全球定位系统(GNSS)和卫星通信技术为支撑的战略新型产业化方向快速发展。随着“数字城市”理念以及“数字地球”理念的不断发展。传统测绘方式已经不能满足人们空间信息快速获取与更新需要。在这种需求下,MMS(移动测量系统)应运而生,成为制图新技术的典型代表。现今随着激光测量技术、GPS技术、惯性导航技术以及 CCD 技术的发展,基于多传感器集成的车载三维移动测量系统已成为对地观测技术的必要补充。

高精度定位测姿系统作为高精度位置、姿态和速度测量设备,是移动测量系统中的核心部件之一,可与航测相机、红外相机、高光谱设备、激光雷达、SAR 等载荷结合起来,装载在汽车、火车、飞行器等不同的载体上,在高速移动状态下完成测量与地理信息采集工作,可对目标区域进行高效率的摄影测量,显著提升了地理信息生产能力。通过迅速、及时地获取多频段、多时相、高精度、高分辨率的位置与图像信息,可以快速建立数字高程模型,生产数字正射影像图、数字地形图及可量测实景影像,搭建智慧城市的地理数据基础——城市地理空间框架。

全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)具有全天候、全球、连续实时的精密三维导航和定位能力。GNSS 能够提供高精度的定位、测速以及授时服务,目前已经广泛应用到导航、定位、测速与授时等各个领域。RTK(Real-time kinematic)技术利用载波相位差分技术利用双差模型能够削弱或者消除卫星钟差、对流层误差、电离层误差从而提高流动站的观测精度,所得到的测量精度可达厘米级甚至亚厘米级。

惯导具有较高的信息更新频率,在初始化完成后,依靠自身测得的角速度以及比力信息能够计算出载体的位置、速度、姿态等信息,然而由于受误差积累的影响,导致导航定位解算精度随时间发散<sup>[1-2]</sup>。在 GNSS/INS 组合导航中,GNSS 提供惯导需要的更新信息,从而抑制惯导信息的发散,而惯导又能输出高采样率的导航定位信息,当 GNSS 因为信号受到遮挡或者干扰而中断时,惯导仍能继续工作从而增加系统的可靠性和健壮性。利用高精度 GNSS 定位技术和惯导组合导航定位能够提供厘米级精度的定位信息以及高精度的测速和定姿信息<sup>[3-4]</sup>。

研究高精度 GNSS/INS 组合定位技术具有重要的意义和应用价值,本文针对移动测图领域对高精度定位、测速以及定姿信息的需求,推导并建立了一套高精度组合导航反向滤波模型,针对典型城市场景下 GNSS 信号衰落中断的情况,推导并建立了基于载体运动的约束模型,从而有效提高导航定位精度,能够在一定复杂场景下替代人工测量,从而大大地提高了高精度测图的工作效率。

## 1 高精度组合滤波模型

### 1.1 扩展卡尔曼滤波模型

卡尔曼滤波算法是大部分导航系统状态估计的理论基础,它广泛的应用于卫星导航、卫星定轨、组合导航以及多种数据融合算法中<sup>[5]</sup>。卡尔曼滤波从被提出之后,为了得到更好的工程应用,被不断地完善、改进,在原来的数学模型基础上相继出现了多种适合实际应用的模型。GNSS/INS 组合导航系统并非线性连续系统,因此标准的卡尔曼滤波模型并不适用于该系统的状态或者参数估计<sup>[6]</sup>。在本文中采用扩展卡尔曼滤波对数学模型进行线性化从而实现导航信息和惯导误差的最优估计,在本文中选取位置误差  $\delta r^n$ 、速度误差  $\delta v^n$ 、姿态误差  $\psi$ 、陀螺零偏误差  $\delta b_g$  以及加速度计零偏误差  $\delta b_a$  共计 15 维。该状态向量可以表示为

$$\delta x = [\delta r^n \quad \delta v^n \quad \psi \quad \delta b_g \quad \delta b_a]^T \quad (1)$$

式中: $\delta r^n = [\delta r_N \quad \delta r_E \quad \delta r_D]$ 代表导航坐标系下北、东、地三个方向的位置误差; $\delta v^n = [\delta v_N^n \quad \delta v_E^n \quad \delta v_D^n]$ 依次代表载体北、东、地三个方向的速度误差; $\psi = [\psi_r \quad \psi_p \quad \psi_y]$ 依次代表载体的横滚、俯仰和航向角误差; $\delta b_g = [\delta b_{gx} \quad \delta b_{gy} \quad \delta b_{gz}]$ 依次代表陀螺 X、Y、Z 轴的零偏误差; $\delta b_a = [\delta b_{ax} \quad \delta b_{ay} \quad \delta b_{az}]$ 依次代表加速度计的 X、Y、Z 轴的零偏误差。

建立的状态方程如下

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)w(t) \quad (2)$$

经过离散化的状态方程如下

$$X_k = \Phi_{k,k-1}X_{k-1} + \Gamma_{k-1}W_{k-1} \quad (3)$$

其中: $X_k$ 、 $X_{k-1}$ 分别为  $k$  和  $k-1$  时刻的状态向量; $\Gamma_{k-1}$ 为系统噪声驱动阵; $W_{k-1}$ 为状态的噪声向量; $\Phi_{k,k-1}$ 为离散后的状态转移矩阵,只考虑到一次项, $\Phi_{k,k-1}$ 可以表示为

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & 0 & 0 & 0 \\ F_3 & F_4 & F_5 & 0 & F_6 \\ 0 & 0 & F_7 & F_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{10} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中各项参数的计算公式参考文献[7-11]。

### 1.2 更新算法

#### 1) 卫导更新算法

$$z_k = \begin{pmatrix} r_{INS}^n - r_{GPS}^n \\ v_{INS}^n - v_{GPS}^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_{INS} - \varphi_{GPS} \\ \lambda_{INS} - \lambda_{GPS} \\ h_{INS} - h_{GPS} \\ v_{INS}^n - v_{GPS}^n \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中: $z_k$ 代表卡尔曼滤波更新的信息; $r_{INS}^n$ 代表惯导计算的位置信息; $r_{GPS}^n$ 代表卫导计算的位置信息; $\varphi_{INS}$ 、 $\lambda_{INS}$ 、 $h_{INS}$ 代表惯导推算的纬度、经度和高程信息; $\varphi_{GPS}$ 、 $\lambda_{GPS}$ 、 $h_{GPS}$ 代表卫导推算的纬度、经度和高程信息。

$$H_k = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中:  $H_k$  代表卡尔曼滤波模型的系数矩阵;  $I_{3 \times 3}$  代表三维单位矩阵。

$$R_k = \text{diag}(\sigma_\varphi^2, \sigma_\lambda^2, \sigma_h^2, \sigma_{v_n}^2, \sigma_{v_e}^2, \sigma_{v_d}^2) \quad (7)$$

其:  $R_k$  代表量测噪声;  $\sigma_\varphi^2, \sigma_\lambda^2, \sigma_h^2, \sigma_{v_n}^2, \sigma_{v_e}^2, \sigma_{v_d}^2$  依次代表北、东、地三个方向的定位和测速精度, 该信息可以在卫导定位解算时得到。

## 2) 零速修正算法

将惯导系统反推得到的伪距  $\rho_{\text{INS}}$ 、伪距率  $\dot{\rho}_{\text{INS}}$  与卫星导航系统提供的伪距  $\rho_{\text{GNSS}}$ 、伪距率  $\dot{\rho}_{\text{GNSS}}$  的差值作为量测值  $z_\rho, z_\rho^\bullet$ , 量测矩阵  $H_\rho, H_\rho^\bullet$  的构成可参阅文献[5]。

车体坐标系速度  $V^m$  可表示为

$$V^m = C_b^m C_n^m V^n \quad (8)$$

$V^m$  为惯导系统输出的导航坐标系下的速度分量。由运动约束条件提供的观测值构成如下

$$V^m = \begin{bmatrix} \delta V_x^m \\ \delta V_z^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x^m \\ V_z^m \end{bmatrix} \quad (9)$$

$V_x^m, V_z^m$  分别为车体坐标系的  $X$  轴速度量、 $Z$  轴速度量, 若安装偏差角本身满足小角度要求, 即  $C_b^m$  为单位阵, 则速度约束条件构成的量测值直接由惯导系统解算得到的速度构成

$$Z_v = \begin{bmatrix} V_x^b \\ V_z^b \end{bmatrix} \quad (10)$$

对式(10)进行微分, 可得

$$\delta V^m = -C_b^m C_n^m (V^n \times) \varphi + C_b^m C_n^m \delta V^n + (C_b^m V^b) \times \alpha = M_1 \varphi + M_2 \delta V^n + M_3 \alpha \quad (11)$$

其中  $\alpha = [\alpha_\theta \ 0 \ \alpha_\psi]^T$ ,  $m \times$  表示向量  $m$  的反对称矩阵。根据式(11)即可得到对应的量测矩阵  $H_v$

$$H_v = \begin{bmatrix} M_1(1, \times) & M_2(1, \times) 0_{2 \times 9} & M_3(1, 3) 0_{2 \times 6} \\ M_1(3, \times) & M_2(3, \times) 0_{2 \times 9} & M_3(3, 1) 0_{2 \times 6} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $M_1(1, \times)$  表示矩阵  $M_1$  的第一行;  $M_3(1, 3)$  表示矩阵  $M_3$  的第1行3列的元素。

至此, 系统量测方程可表示为

$$Z = HX + V \quad (13)$$

其中

$$Z = [Z_\rho \ Z_\rho^\bullet \ Z_v]^T \quad (14)$$

$$H = [H_\rho \ H_\rho^\bullet \ H_v]^T \quad (15)$$

### 1.3 反向滤波模型

反向平滑最优估计综合利用了前向信息和反向平滑信息因此能有效提高信息融合的精度。反向平滑分为固定点平滑、固定延迟平滑、固定区间平滑。固定区间平滑是对整个数据段的平滑, 因此广泛应用于测绘等适合后处理的领域, 固定延迟平滑最常用的方法是 R-T-S 方法, R-T-S 算法结构如图1所示。在进行前向滤波的过程中保存下滤

波得到的方差信息在反向平滑过程中对这些信息进行利用从而有效提高组合精度。

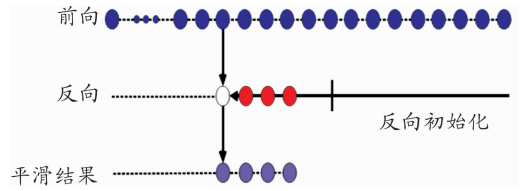


图1 反向滤波结构

反向平滑滤波的数学模型为

$$\begin{aligned} \delta \hat{x}_{k-1|N} &= \delta \hat{x}_{k-1|k-1} + A_{k-1} (\delta x_k | N - \delta \hat{x}_k | k-1) \\ P_{k-1|N} &= P_{k-1|k-1} + A_{k-1} (P_k | N - P_k | k-1) A_{k-1}^T \\ A_{k-1} &= P_{k-1|k-1} \Phi_k^T P_k^{-1} P_{k|k-1} \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $k = N-1, N-2, \dots, 0, N$  为测量值的总数。

## 2 试验及测试结果

### 2.1 试验描述

为了验证组合导航反向平滑算法的精度, 采用成熟商用组合导航系统天宝 POS LV610 作为参考基准, 该系统采用其后处理软件 PosPac, 利用 RTK 定位结果进行组合导航解算时得到的位置精度优于 5 cm, 测速精度优于 0.01 m/s, 水平姿态精度优于 0.005°, 航向精度优于 0.05°, 该系统可以作为高精度的位姿参考。测试地点选择在石家庄市西三环, 该场景大部分为开阔场景, 也包含典型城市复杂场景以及立交桥等遮挡场景, 测试开始前在已知点架设基准站用于高精度的后处理, 基准站如图2所示, 跑车测试过程中将参考基准和被测基准牢固固定保证相对位置的固定, 测试图如图3所示。



图2 基准站

图3 跑车测试图

被测系统的惯性器件主要技术指标如表1所示。

表1 惯组器件主要技术指标

光纤惯组器件		激光惯组器件	
陀螺零偏稳定 性/((°)·h <sup>-1</sup> )	加计零偏稳 定性/mg	陀螺零偏稳定 性/((°)·h <sup>-1</sup> )	加计零偏稳 定性/mg
1	1	0.005	0.01

### 2.2 试验结果及分析

跑车测试的轨迹图如图4所示。



图4 跑车测试轨迹

利用天宝组合导航系统高精度的位姿信息作为参考,计算得到的位置、速度、以及姿态误差如图5所示。可以看出位置误差最大值小于0.2 m,速度误差最大值小于0.1 m/s,水平姿态误差最大值小于0.05°,航向误差最大值小于0.1°。

为了进一步评估导航定位精度对误差进行了统计,结果

如表2所示,结果表明,位置误差优于5 cm,速度误差优于0.01 m/s,水平姿态优于0.005°,航向精度优于0.05°,该结果验证了算法的正确性和可靠性。

表2 测试结果

位置误差/m	东向	0.033
	北向	0.034
	天向	0.035
速度误差/ (m · s <sup>-1</sup> )	东向	0.012
	北向	0.012
	天向	0.007
姿态误差/(°)	横滚	0.0048
	俯仰	0.0047
	航向	0.022

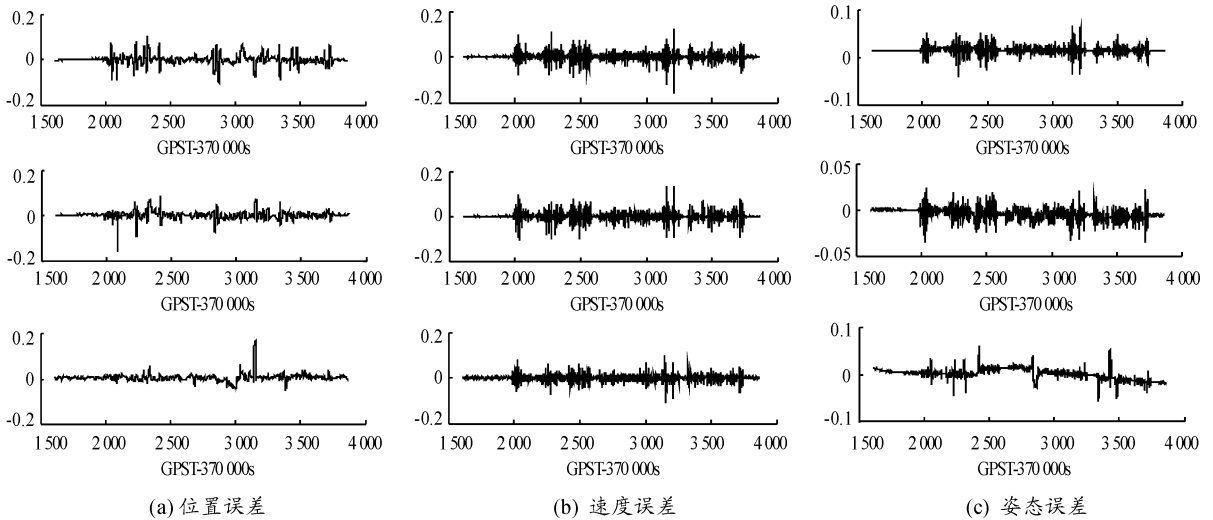


图5 跑车测试误差

### 3 结论

基于扩展卡尔曼滤波的高精度 GNSS/INS 反向平滑滤波模型,可以广泛应用于高精度移动测图领域,提供高精度的位置、速度、姿态。

### 参考文献:

- [1] 李旦,秦永元,梅春波.组合导航自适应卡尔曼滤波改进算法研究[J].测控技术,2011,30(3):114-116.
- [2] 杨波,秦永元,柴艳.UKF在INS/GPS直接法卡尔曼滤波中的应用[J].传感技术学报,2007,20(4):842-846.
- [3] 刘帅.GPS/INS组合导航算法研究与实现[D].郑州:解放军信息工程大学,2012.
- [4] 刘江.基于GPS/INS列车组合定位数据融合算法研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [5] SHIN E H. Estimation techniques for low-cost inertial navigation

[J]. UCGE Report,2005.

- [6] 牛小骥,旷俭,陈起金.采用MEMS惯导的小口径管道内检测定位方案可行性研究[J].传感技术学报,2016,29(1):40-44.
- [7] SHIN E H,EL-SHEIMY N. Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications[M]. University of Calgary, Department of Geomatics Engineering,2001.
- [8] GIORGI G,TEUNISSEN P J G,GOURLAY T P. Instantaneous Global Navigation Satellite System (GNSS)-Based Attitude Determination for Maritime Applications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012,37(3):348-362.
- [9] KAPLAN D,HEGARTYC. Understanding GPS Principles and Applications[M]. 寇艳红,译.北京:电子工业出版社,2012:130-134.
- [10] WANG Huinaned. GPSnavigationPrinciplesand Applications [M]. Beijing: Science Press,2003(8):258-265.
- [11] 陈雷,卞鸿巍.基于模糊自适应互补滤波的姿态解算算法[J].兵器装备工程学报,2017(4):184-187.