引文格式:王甫红,程雨欣,赵广越,等.智能手机GNSS/MEMS IMU车载组合导航的安装角估计算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(10):1948-1956.DOI:10.13203/j.whugis20230381

Citation: WANG Fuhong, CHENG Yuxin, ZHAO Guangyue, et al. Mounting Angle Estimation Algorithm for Smartphone GNSS/MEMS IMU Vehicle-Borne Integrated System[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(10): 1948-1956.DOI:10.13203/j.whugis20230381

智能手机GNSS/MEMS IMU车载组合导航的安装角估计算法

王甫红[1] 程雨欣[1] 赵广越[1] 张万威[1]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:针对智能手机车载导航时因安装角未知而降低全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)/惯性导航系统组合导航精度与性能的问题,在智能手机GNSS/微机械惯性测量单元(micro-electro-mechanical system inertial measurement unit,MEMS IMU)紧组合导航算法的基础上,提出以载波相位时间差分计算得出的历元间位置变化量来构建安装角估计的观测方程,并在线估计智能手机车载导航安装角的卡尔曼滤波算法。在典型城市环境的两组车载实验结果表明,所提算法在较为严重的遮挡环境下可在80 s内实现大安装角初始化,安装角滤波器收敛后安装角波动在2°以内。安装角估计成功后,使用非完整性约束算法,严重遮挡条件下车载组合导航的精度与性能得到明显提升,平面位置与高程的精度统计均能维持在5 m左右。所提算法不需要增加里程计等辅助设备,能够较快实现智能手机大安装角的精确估计。

关键词:安装角估计;非完整性约束;智能手机;GNSS/MEMS IMU组合导航;车载导航

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-12-23

DOI:10.13203/j.whugis20230381 **文章编号**:1671-8860(2025)10-1948-09

Mounting Angle Estimation Algorithm for Smartphone GNSS/MEMS IMU Vehicle-Borne Integrated System

WANG Fuhong[1] *CHENG Yuxin*[1] *ZHAO Guangyue*[1] *ZHANG Wanwei*[1]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: The unknown inertial measurement unit (IMU) mounting angles, i.e., the misalignment angles between the smartphone's IMU and the vehicle body frame, can seriously affect the smartphone-based global navigation satellite system (GNSS)/inertial navigation system integrated system for vehicular navigation. **Methods**: A real-time estimation of the IMU mounting angles is addressed through a Kalman filter whose measurement updates are realized by position variation between epochs derived by time-differenced carrier phase besides the smartphone GNSS/ micro-electro-mechanical system inertial measurement unit (MEMS IMU) tightly-coupled integration algorithm. **Results**: Two vehicular navigation experiments were carried out in urban challenging environments to evaluate the performance of the proposed algorithm. The results show that a large mounting angle can be initialized within 80 s under moderate occlusion conditions, then convergence of the estimated mounting angle is shown to occur within minutes, and the accuracy is in the order of 2°. When the mounting angle is estimated successfully, the positioning performance of smartphone vehicular positioning will be improved significantly, both horizontal and vertical accuracy can be maintained at about 5 m in terms of root mean square by applying non-holonomic constraint under severe occlusion conditions. **Conclusions**: The proposed algorithm can estimate large mounting angles accurately and rapidly without any auxiliary equipment such as an odometer.

基金项目:国家自然科学基金(62103307,62073044);卫星导航系统与装备技术国家重点实验室开放基金(CEPNT-2021KF-05)。

第一作者:王甫红,博士,教授,主要从事卫星导航定位和卫星定轨方法的教学与研究工作。fhwang@sgg.whu.edu.cn

Key words: mounting angle; non-holonomic constraint; smartphone; GNSS/MEMS IMU integrated navigation; vehicle-borne navigation

智能手机大多内置了全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)、微机械惯性测量单元(micro-electro-mechanical system inertial measurement unit,MEMS IMU)、磁力计等传感器和高性能处理器,具备通信和导航定位等功能,已成为大众出行的首选导航工具[1-3]。充分利用智能手机内置MEMS IMU的数据,通过GNSS/MEMS IMU组合可以改进城市复杂环境下的大众导航定位的连续性和可靠性[4-6]。

在车载GNSS/惯性导航系统(inertial navigation system, INS)组合导航算法中,因建筑物、树荫等遮挡导致GNSS不可用时,通常采用零速修正(zero velocity update,ZUPT)、零积分航向角速率(zero integrated heading rate,ZIHR)和非完整性约束(non-holonomic constraint,NHC)等车辆运动学约束来抑制INS误差的快速累积,提高车辆的定位精度和性能[7-10]。当不发生侧滑或颠簸时,车辆只有沿车体前向的运动速度,其侧向和垂向速度为0。NHC算法以此来建立观测方程,参与组合导航滤波处理,有效提升复杂环境下的车载组合导航性能。

在使用NHC算法之前必须标定IMU b系和车辆 v 系之间的姿态参数[11],即IMU安装角参数。大众使用智能手机进行车载导航时,通常将手机放置于手机支架上,安装角一般较大且难以精确测定,需要在线精确估计MEMS IMU的安装角。当前,大多数学者以NHC约束方程为基础来建立安装角估计的观测方程,通过卡尔曼滤波在线估计并更新安装角参数。文献[12-14]利用GNSS测速或者组合导航速度结果构建观测方程,其中文献[14]还加入GNSS航向角约束来提高估计精度。文献[15-17]以里程计测得的里程增量或组合导航定位结果得到的位移量来构建观测方程,对IMU安装角进行估计。以上文献中大部分[14-17]仅对小角度安装角开展了相关实验分析。此外,文献[18]通过IMU静止时加速度数据计算安装俯仰角与横滚角,通过将车辆航向角与IMU姿态航向角作差得到粗略IMU安装航向角。文献[19]将车辆运动分解为平移与旋转两个分量并以此构建观测方程,实现对小角度安装角的准确估计。这些方法为智能手机车载组合导航的安装角估计算法研究提供了很好的参考,考虑到智能手机使用低成本消费级MEMS IMU传感器,INS推算误差随时间累积迅速增加,同时受城市遮挡环境的影响,GNSS测速精度在分米级甚至米级[20],直接使用这些方法将会影响安装角估计精度,进而降低智能手机车载导航系统的性能。

本文将充分利用智能手机GNSS和MEMS IMU观测数据,使用载波相位时间差分(time-differenced carrier phase,TDCP)得到的历元间位置变化量构建安装角的观测方程,提出一种适用于智能手机车载导航的安装角滤波估计方法,并通过车载实验来验证其可行性和有效性。

1　安装角估计算法的框架设计

本文提出的智能手机GNSS/MEMS IMU车载组合导航的安装角估计算法的框架设计如图1所示。整个安装角估计算法分为两步:(1)安装角初始化。在车辆运动过程中,当GNSS/INS紧组合滤波[21]收敛后可得到MEMS IMU的 b 系相对于 n 系的姿态角,同时利用TDCP得到车辆 v 系相对于 n 系的航向角,由此计算安装角的航向角,并利用IMU加速度数据计算俯仰角和横滚角,来初始化安装角滤波器的安装角矩阵。初始化过程中,由于安装角未知,GNSS/INS紧组合滤波不能使用NHC约束。(2)安装角滤波估计。利用TDCP计算得到的历元间位置变化量来构建安装角滤波估计的观测方程,通过在线滤波处理提高安装角的估计精度。整个安装角估计过程中均使用了TDCP算法。为确保TDCP计算的航向角能代表车辆行驶的航向,当车辆处于直线行驶且达到一定的运动速度时,才能进行安装角初始化或滤波估计。

2　安装角初始化及滤波模型

2.1　大安装角初始化方法

用户使用智能手机进行车载导航时,通常采用倾斜安置将手机屏幕朝向驾驶者,导致手机内置IMU b 系与车辆 v 系之间存在较大的安装角,且每次安置手机时均会存在一定的偏差,因此在每次进行车载导航时,需要重新估计手机的安装角。在安装角滤波估计之前,首先对大安装角进

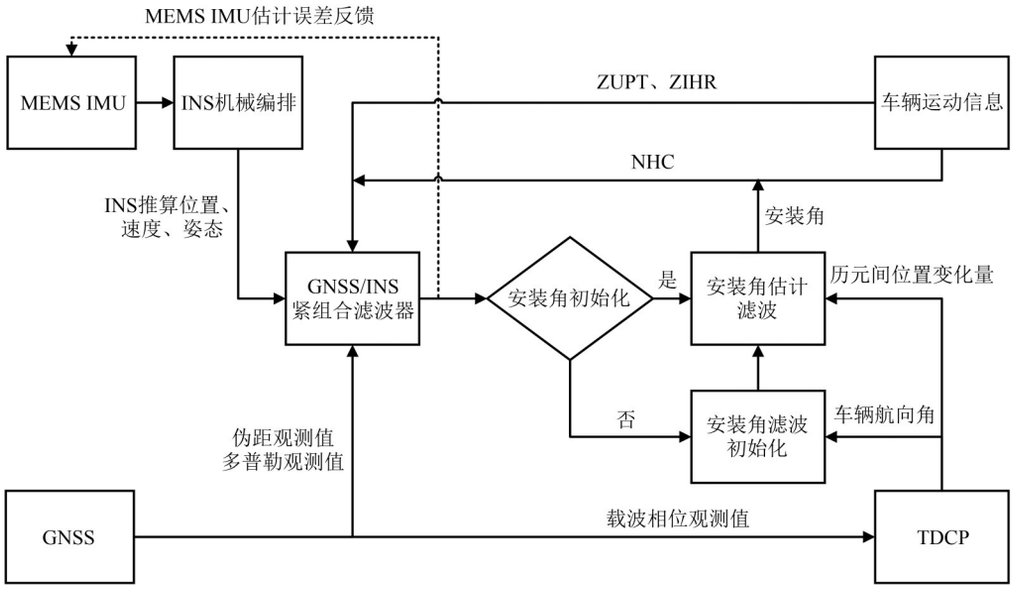


图1 智能手机GNSS/MEMS IMU车载组合导航的安装角估计算法的框架设计

Fig. 1 Framework of Mounting Angle Estimation Algorithm for Smartphone GNSS/MEMS IMU Vehicle-Borne Integrated System

行初始化,然后通过卡尔曼滤波进行估计修正。

大安装角初始化可分为两步,首先利用IMU加速度数据计算手机安装角中的俯仰角和横滚角。当车辆静止在水平地面上时,加速度计比力数据为$\boldsymbol{f}^b=[\,f_x^b\ f_y^b\ f_z^b\,]^{\mathrm{T}}$,当地重力为$g$,则手机安装角中的横滚角$\phi$和俯仰角$\theta$计算公式为[22]:

$$\phi=\mathrm{sign}\left(f_z^b\right)\sin^{-1}\left(\frac{f_y^b}{g}\right) \tag{1}$$

$$\theta=-\mathrm{sign}\left(f_z^b\right)\sin^{-1}\left(\frac{f_x^b}{g}\right) \tag{2}$$

式中,sign( )表示某值的正负号。

然后采用动态对准的方式对手机安装角的航向角进行初始化。当车辆沿直线行驶时,用TDCP得到的历元间位置变化量来计算车辆v系的航向角ψ_v,即$\psi_v=\arctan\dfrac{\mathrm{d}r_{\mathrm{E}}}{\mathrm{d}r_{\mathrm{N}}}$,其中$\mathrm{d}r_{\mathrm{E}}$和$\mathrm{d}r_{\mathrm{N}}$分别为TDCP历元间位置变化量的东(east,E)向分量和北(north,N)向分量,TDCP原理见文献[23]。当GNSS/INS紧组合滤波收敛后可得到MEMS IMU的b系相对于n系的姿态角,其中的航向角为ψ_b,那么手机安装角的航向角ψ为:

$$\psi=\psi_b-\psi_v \tag{3}$$

手机大安装角初始化过程的关键是安装角中的航向角初始化。当GNSS/INS紧组合滤波收敛后,ψ初始化误差取决于ψ_b和ψ_v的计算精度,下文实验部分将对ψ_v的计算精度进行分析。即使是大安装角,也能将安装角的航向角初始化误差控制小角范围。

2.2 安装角估计的观测方程

本文提出利用GNSS TDCP计算得到的历元间位置变化量来构建安装角的观测方程,对安装角的航向角与俯仰角进行估计。当车辆沿直线行驶时,通过TDCP计算得到地心地固e系的位置变化量$\mathrm{d}\boldsymbol{r}^e$,可知其在车辆$v$系下的矢量为$\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v=[\mathrm{d}r\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}}$,其在IMU b系下的矢量为$\mathrm{d}\boldsymbol{r}^b=\boldsymbol{C}_n^b\boldsymbol{C}_e^n\mathrm{d}\boldsymbol{r}^e$,其中$\mathrm{d}r$为$\mathrm{d}\boldsymbol{r}^e$的模,$\boldsymbol{C}_e^n$为$n$系到$e$系的转换矩阵,$\boldsymbol{C}_n^b$为$b$系到$n$系的转换矩阵,也是GNSS/INS组合导航的姿态矩阵。因此,通过安装角姿态矩阵$\boldsymbol{C}_v^b$将$\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v$和$\mathrm{d}\boldsymbol{r}^b$两者联系起来,并转换到$n$系,可得:

$$\mathrm{d}\boldsymbol{r}^n=\boldsymbol{C}_b^n\boldsymbol{C}_v^b\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v \tag{4}$$

考虑到安装角和姿态角的误差扰动,则:

$$\begin{aligned}\mathrm{d}\boldsymbol{r}^n&=\hat{\boldsymbol{C}}_b^n\hat{\boldsymbol{C}}_v^b\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v=\\&[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\phi}\times]\boldsymbol{C}_b^n\boldsymbol{C}_v^b[\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\alpha}\times]\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v=\\&\boldsymbol{C}_v^n\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v+\left(\mathrm{d}\boldsymbol{r}^n\times\right)\boldsymbol{\phi}-\boldsymbol{C}_v^n\left(\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v\times\right)\boldsymbol{\alpha}\end{aligned} \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{\phi}$和$\boldsymbol{\alpha}$分别为姿态角和安装角的误差向量;$(\boldsymbol{x}\times)$为向量$\boldsymbol{x}$的反对称矩阵。对安装角的观测方程式(5)进行分析,$\boldsymbol{\phi}$的系数可以表示为$(\mathrm{d}\boldsymbol{r}^n\times)=\boldsymbol{C}_v^n(\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v\times)\boldsymbol{C}_n^v$,与$\boldsymbol{\alpha}$的系数仅相差$\boldsymbol{C}_n^v$,$\boldsymbol{C}_n^v$为车辆$v$系到$n$系的转换矩阵,即两者存在一定的耦合关系,尤其是当车辆沿北向行驶时,v系和n系的坐标轴指向一致,即$\boldsymbol{C}_n^v$为单位阵$\boldsymbol{I}$,导致安装角误差$\boldsymbol{\alpha}$与姿态角误差$\boldsymbol{\phi}$无法分离。因此,本文在GNSS/INS紧组合滤波器中估计姿态角误差$\boldsymbol{\phi}$,在安装角滤波器中仅估计安装角误差$\boldsymbol{\alpha}$,减小两

者之间的耦合影响。当紧组合滤波器收敛后,安装角滤波能够获得正确结果,且增强整个系统的稳定性。

2.3　安装角估计的滤波算法

结合上述讨论分析,因为安装角误差与姿态角误差存在耦合关系以及安装角中的横滚角具有不可观测性[24]等问题,安装角估计的滤波器状态仅选取俯仰角误差 $\delta\theta$ 和航向角误差 $\delta\psi$ 两个参数,系统状态向量表示为 $\boldsymbol{\alpha}=\begin{bmatrix}\delta\theta & \delta\psi\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$。安装角姿态矩阵 $\boldsymbol{C}_v^b$ 的初始化方法见§2.1 中的算法设计的第一步。

智能手机采用支架与车辆保持固定连接,在整个车载导航过程中保持不变时,可采用随机游走过程对系统状态向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 进行建模。根据§2.2 构建的安装角估计的观测方程,对安装角估计滤波器进行测量更新。安装角估计滤波器的观测方程可表示为:

$$\boldsymbol{Z}=-\boldsymbol{C}_v^n(\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v\times)\boldsymbol{\alpha}+\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{\alpha}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{6}$$

式中,$\boldsymbol{Z}=\mathrm{d}\boldsymbol{r}^n-\boldsymbol{C}_v^n\mathrm{d}\boldsymbol{r}^v-(\mathrm{d}\boldsymbol{r}^n\times)\boldsymbol{\phi}$;$\boldsymbol{H}$ 为观测矩阵,$\boldsymbol{H}=-\boldsymbol{C}_v^n\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -\mathrm{d}r\\ \mathrm{d}r & 0\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为观测误差。系统噪声矩阵 $\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}(q_\theta,q_\psi)$,$q_\theta$ 和 q_ψ 分别为安装俯仰角和安装航向角的噪声谱密度,与手机和车辆固定连接的稳定度有关,测量噪声矩阵 $\boldsymbol{R}$ 则由 TDCP 内符合精度得到。

安装角矩阵初始化完成后,当车辆直线行驶且运行速度达到某一阈值(如 3 m/s)时,使用卡尔曼滤波方法在线估计安装角误差,并对安装角矩阵进行反馈更新,提高安装角姿态矩阵的估计精度。当安装角估计滤波收敛后,GNSS/INS 紧组合滤波使用 NHC 约束,增强 GNSS 信号中断时的 INS 推算能力,提高组合导航的准确性和连续性。

3　安装角估计实验与分析

3.1　实验数据采集

为验证智能手机 GNSS/MEMS IMU 车载组合导航的安装角估计算法的定位精度和性能,在中国湖北省武汉市进行车载实验,整个实验轨迹可分为两段。轨迹一(见图 2 左上)是车辆从武汉大学信息学部出发,经水果湖和沙湖大桥,终点至武汉市车辆管理所,共计时长约 25 min,行驶里程约 8.2 km。轨迹二(见图 2 左下)是车辆从临江大道出发,经友谊大道和八一路,终点至武汉大学信息学部,共计时长约 34 min,行驶里程约 10 km。实验区域属于典型的城市道路,根据 GNSS 信号遮挡情况,整个行驶路线可以划分为 3 种典型场景:城区开阔场景 A、城区部分遮挡场景 B 和城市峡谷及高架桥等严重遮挡环境 C。

和正常的大众车载导航相似,将 Redmi K50 Pro(简称为 K50P)智能手机通过磁吸支架固定在车辆驾驶台上,如图 2 右所示。智能手机处于横向倾斜安置,手机 b 系(x 轴大致指向车辆右侧,y 轴指向后下方,z 轴构成右手坐标系)与车辆 v 系(x 轴指向车辆前方,y 轴指向车辆右侧,z 轴构成右手坐标系)存在较大的安装角。实验中,同车搭载北云高精度组合导航板卡 A1-3H,水平固定在驾驶台上,设置好 GNSS 天线杆臂和实时高精度组合导航解算参数,并将基站观测数据实时输入,使其进行实时动态定位/INS 组合导航解算,作为智能手机车载导航精度分析的参考。

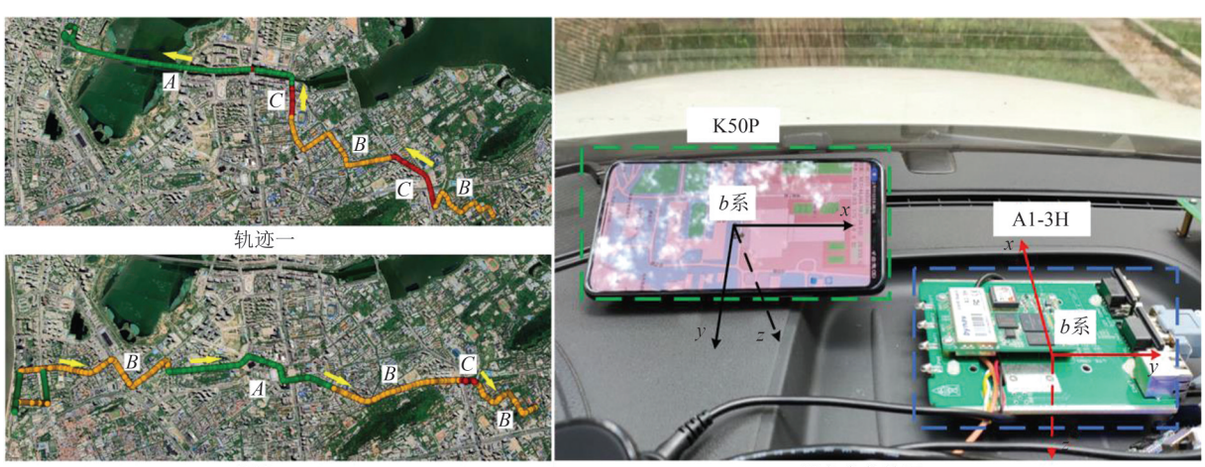


图 2　车载实验路线及设备安装情况

Fig. 2　Vehicle-Borne Experimental Trajectory and Equipment Installation

3.2 TDCP解算精度及其对车辆航向角的影响分析

一些文献采用多普勒测速结果来计算车辆航向角,并将车辆速度作为安装角估计的观测量[12-14],而本文提出利用TDCP计算得到的历元间位置变化量来初始化大安装角,并构建安装角的观测方程。重点分析TDCP解算得到的历元间位置变化量以及车辆航向角的精度,并与多普勒测速的相关结果进行对比分析,实验中分别以北云高精度组合导航解算出的车辆航向角、历元间位置变化量和车辆瞬时速度作为参考真值,计算得到车辆直线行驶且满足安装角估计条件下的各项差值,结果见图3,精度统计如表1所示。在整个实验过程中,因为存在静止、低速行驶、转弯、观测条件恶劣等因素,无法进行安装角估计,导致图3中出现结果不连续情况。

从图3中可以看出:(1)在直线行驶路段,TDCP解算航向角的稳定性和准确性优于多普勒测速得到的航向角,可以将车辆v系的航向角误差控制在±4°以内,由此大安装角的初始化误差主要取决于组合导航的姿态角的估计精度。(2)TDCP在E、N、天(up,U)3个方向的解算精度均优于多普勒测速,使用TDCP计算得出的历元间位置变化量参与安装角滤波解算能提高安装角估计精度。由此可知,直线行驶时可以通过TDCP得到车辆航向角、准确的历元间位置变化量来构建安装角的观测方程,有利于提高安装角估计的精度和可靠性。

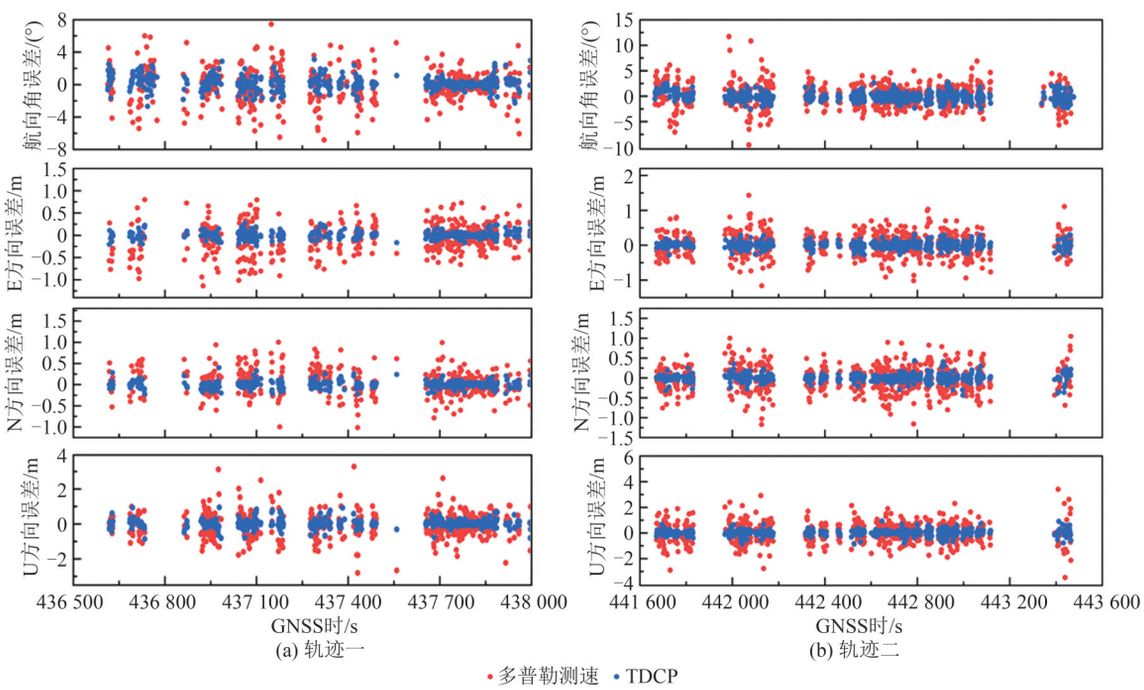


图3 TDCP与多普勒测速的历元间位置变化量、航向角计算误差

Fig. 3 Compute Errors of Inter-Epoch Position Variation and Heading Angles Calculated by TDCP and Velocity of Doppler

表1 TDCP与多普勒测速的历元间位置变化量、航向角计算误差统计

Table 1 Errors Statistics of Inter-Epoch Position Variation and Heading Angles Calculated by TDCP and Velocity of Doppler

实验场景	解算方式	航向角误差/(°)	解算误差/m		
			E	N	U
轨迹一	TDCP	0.789	0.074	0.081	0.226
	多普勒测速	1.961	0.331	0.288	0.713
轨迹二	TDCP	0.830	0.086	0.084	0.206
	多普勒测速	2.113	0.317	0.305	0.760

3.3 安装角估计结果及其分析

经过安装角估计的初始化与滤波处理后,得到两组轨迹的智能手机安装角的航向角和俯仰角结果(见图4),子图中竖虚线左边为安装角初始化计算结果,右边为安装角滤波估计结果。每组实验开始前,智能手机重新安置固定,实验过程中保持不变,从估计结果来看,两组实验的安装角存在一定的差异。与§3.2类似,在整个实验过程中存在无法进行安装角估计路段,如果整个导航过程中智能手机安置保持不变,则安装角相对稳定,估计中断不会影响组合导航的精度与

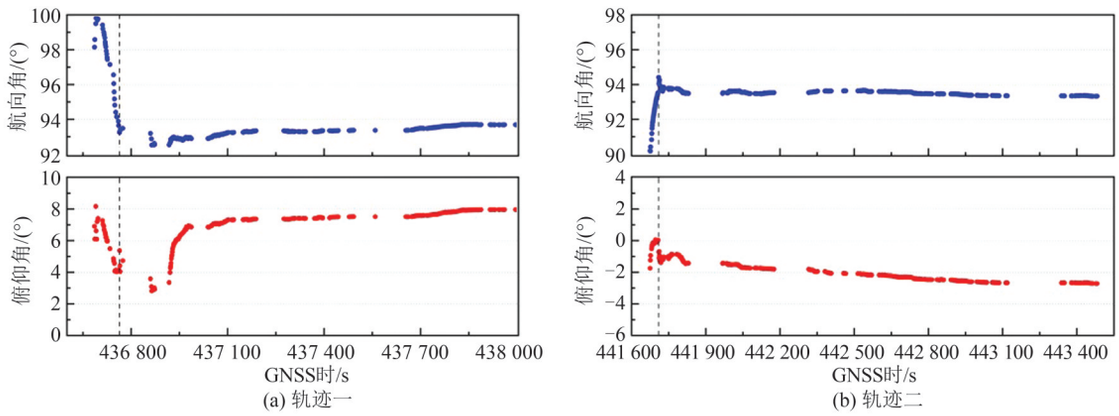


图 4　安装角初始化与滤波估计结果

Fig. 4　Results of the Mounting Angle Initialization and Filter Estimation

性能。

从安装角估计结果可以看出:(1)实验中智能手机横向倾斜安置,安装角中的航向角达到 90°,属于大安装角估计。(2)两组轨迹的安装角初始化所需要的时间差异较大,轨迹一需要约 80 s,轨迹二需要约 35 s,主要与组合导航启动阶段的车辆运动速度、转弯、观测条件和姿态角收敛速度相关,轨迹一受到武汉大学校园内的严重遮挡环境影响,需要较长的时间才能初始化成功。(3)安装角滤波估计收敛后,安装角的估计值波动小于 2°,因为安装角与姿态角存在耦合关系,安装角的波动与姿态角估计精度存在一定的关系,另外智能手机与车体之间并非固定连接,车辆震动也有可能会导致安装角产生微小的变化。

安装角真值难以通过测量准确获得,如果安装角估计正确,将组合导航得到的 n 系速度投影到车辆 v 系,其侧向与垂向速度分量将接近于 0[13]。利用这一特性对安装角估计精度进行评估,分别将组合导航的 n 系速度投影到 IMU b 系和车辆 v 系,如图 5 所示。可以看出:(1)投影到车辆 v 系的速度集中在前向、侧向与垂向的速度大多在 ±0.2 m/s 内波动。这说明本文算法估计出的安装角准确度较高,可以有效将车辆速度改正到前向。(2)车辆侧向与垂向速度偶尔会有接近 1 m/s 的波动,两个方向速度产生波动的时间一致。这些波动主要集中在角度较大的转弯处,因为手机置于车辆前端,投影到 v 系计算时没有考虑 NHC 杆臂影响。

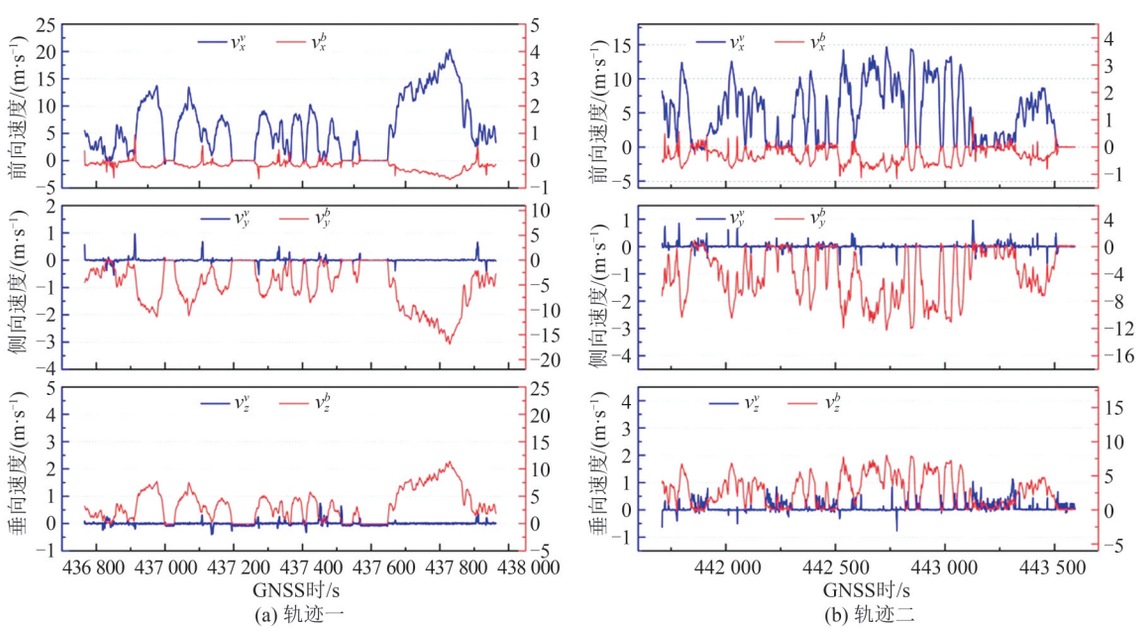


图 5　车辆 v 系与 IMU b 系的行驶速度投影

Fig. 5　Projection of Driving Velocity in the Vehicle v-Frame and the IMU b-Frame

3.4 安装角估计对组合导航性能的影响分析

为了进一步分析本文的安装角估计对智能手机车载导航定位精度的影响,设计了两种数据处理方案,并将处理结果分别与参考轨迹进行比较并统计定位精度。两种方案分别为:(1)方案一:附加安装角估计的紧组合滤波算法;(2)方案二:不估计安装角的紧组合滤波算法。两者的主要区别是没有安装角估计结果,智能手机车载组合导航系统不能使用NHC算法。

将两种方案的定位误差分别投影到n系,结果如图6所示,阴影部分为严重遮挡路段(图2左图中标记为C),精度统计见表2。

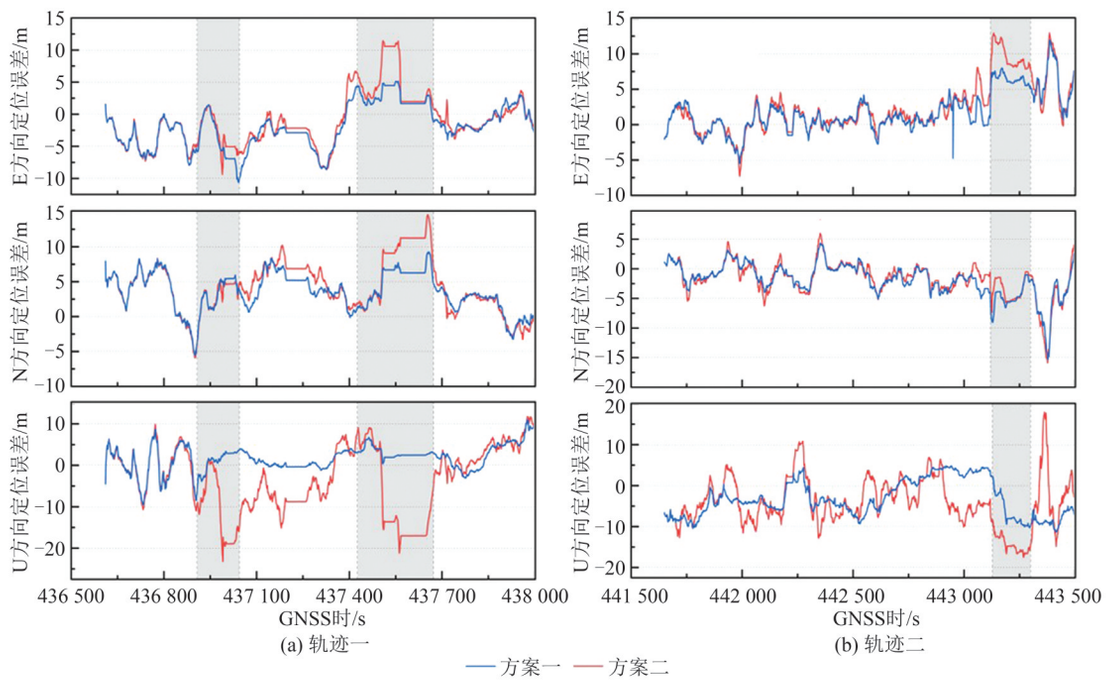


图6 城区环境下两种方案定位误差对比

Fig. 6 Comparison of Position Errors of Two Schemes in Urban Environment

表2 城区环境下两种方案定位误差统计/m

Table 2 Statistics of Position Errors of Two Schemes in Urban Environment/m

实验场景	实验方案	E方向			N方向			U方向		
		均值	标准差	均方根值	均值	标准差	均方根值	均值	标准差	均方根值
轨迹一	方案一	−1.88	3.34	3.83	3.50	2.76	4.46	1.73	3.19	3.63
	方案二	−1.11	4.01	4.16	4.20	3.72	5.61	−3.07	8.03	8.59
轨迹二	方案一	1.79	2.85	3.37	−1.84	2.72	3.29	−3.43	4.47	5.63
	方案二	2.34	3.53	4.23	−1.66	2.89	3.33	−4.25	5.96	7.32

可以看出:(1)在组合导航启动阶段,安装角估计处于初始化过程中,两种方案均无法使用NHC算法,因此两者的定位误差相同。(2)在安装角初始化完成之后,方案一的误差曲线整体更为平滑,尤其是阴影部分的严重遮挡路段,因为NHC增加了车辆侧向和垂向速度的约束,有效提升车辆在复杂环境下的定位精度与性能。(3)两种方案因使用INS辅助,均能实现城市道路的连续导航,平面位置均方根值统计约为5 m,高程方向精度因NHC作用方案一提升较为明显。由于定位中只使用GNSS导航电文中的广播星历和电离层模型参数,两种方案均存在较大的系统偏差(统计中的均值)。

4 结 语

本文在智能手机GNSS/MEMS IMU紧组合导航算法的基础上,利用TDCP计算得出的历元间位置变化量构建安装角估计的观测方程,提出一种适用于智能手机车载导航的安装角估计方法,实现了智能手机在城市环境下的实时连续车载定位。典型城市道路环境的两组车载导航实验结果表明:(1)安装角初始化时间与GNSS观测条件及紧组合滤波收敛时间有关,在较为严重

的遮挡环境下可在80 s内实现大安装角初始化。(2)本文提出的安装角估计算法具有较强的稳定性与较好的估计精度。安装角估计滤波收敛后,安装角估计波动值小于2°。将车辆速度投影到v系,车辆速度集中在前向,侧向与垂向的速度大多在±0.2 m/s内波动。(3)利用估计的安装角参数与NHC算法,城市复杂环境下的车载导航性能提升明显,平面位置与高程的精度统计均能维持在5 m左右。本文算法不需要增加里程计等辅助设备,能够较快实现智能手机大安装角的精确估计。

参 考 文 献

[1] 张小红,陶贤露,王颖喆,等. 城市场景智能手机GNSS/MEMS融合车载高精度定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1740-1749.
ZHANG Xiaohong, TAO Xianlu, WANG Yingzhe, et al. MEMS-Enhanced Smartphone GNSS High-Precision Positioning for Vehicular Navigation in Urban Conditions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1740-1749.

[2] 王颖喆,胡捷,陶贤露,等. Android智能手机双频GNSS伪距差分动态定位性能分析[J]. 导航定位与授时,2021,8(5):103-110.
WANG Yingzhe, HU Jie, TAO Xianlu, et al. Performance Analysis of Dual-Frequency GNSS Pseudo-Range Differential Dynamic Positioning for Android Smartphones[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, 8(5): 103-110.

[3] 王颖喆,陶贤露,朱锋,等. 利用智能手机实现GNSS原始观测值的高精度差分定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(12):1941-1950.
WANG Yingzhe, TAO Xianlu, ZHU Feng, et al. High Accuracy Differential Positioning with Smartphone GNSS Raw Measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1941-1950.

[4] 朱元,吴博宇,陆科,等. 城市复杂环境下的车辆组合定位算法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(1):9-18.
ZHU Yuan, WU Boyu, LU Ke, et al. Research on the Integrated Vehicle Positioning Algorithm in Complex Urban Environments[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2023, 37(1): 9-18.

[5] 纪新春,魏东岩,袁洪,等. 基于智能手机的车辆多源融合导航方法[J]. 中国惯性技术学报,2020,28(5):638-644+693.
JI Xinchun, WEI Dongyan, YUAN Hong, et al. Vehicle Multi-source Fusion Navigation Method Based on Smartphone Platform[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, 28(5): 638-644.

[6] 旷俭,葛雯斐,张全,等. 基于手机内置传感器的车辆组合定位方法[J]. 中国惯性技术学报,2020,28(6):701-708.
KUANG Jian, GE Wenfei, ZHANG Quan, et al. Smartphone Built-in Sensors Based Vehicle Integrated Positioning Method[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, 28(6): 701-708.

[7] SHIN E, EI-SHEIMY N. Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications[D]. Canada: University of Calgary, 2001.

[8] DISSANAYAKE G, SUKKARIEH S, NEBOT E, et al. The Aiding of a Low-Cost Strapdown Inertial Measurement Unit Using Vehicle Model Constraints for Land Vehicle Applications[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 17(5): 731-747.

[9] 邓玥,余江,郭文飞,等. 信号遮挡环境下融合TOA/AOD的5G/SINS组合导航算法模型与精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(7):1133-1139.
DENG Yue, YU Jiang, GUO Wenfei, et al. Modeling and Accuracy Analysis of TOA/AOD Based 5G/SINS Integrated Navigation in Case of Signal Blockage[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(7): 1133-1139.

[10] 牛小骥,丁龙阳,旷俭,等. 基于MEMS IMU和运动约束的共享单车定位算法[J]. 中国惯性技术学报,2021,29(3):300-306.
NIU Xiaoji, DING Longyang, KUANG Jian, et al. A MEMS IMU and Motion Constraint-Based Positioning Algorithm for Shared Bicycles[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(3): 300-306.

[11] SYED Z F, AGGARWAL P, NIU X J, et al. Civilian Vehicle Navigation: Required Alignment of the Inertial Sensors for Acceptable Navigation Accuracies[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(6): 3402-3412.

[12] 冯木桦,高迪,何文涛. 面向低成本车载IMU的安装姿态估计[J]. 测绘通报,2020(6):67-70.
FENG Muju, GAO Di, HE Wentao. A Mounting-Attitude Estimation Algorithm for Low-Cost Vehicle IMU[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(6): 67-70.

[13] WAHLSTRÖM J, SKOG I, HÄNDEL P. IMU Alignment for Smartphone-Based Automotive Navi-

gation[C]//The 18th International Conference on Information Fusion (Fusion), Washington D C, USA, 2015.

[14] LU Y S,XIONG L, XIA X, et al. Vehicle Heading Angle and IMU Heading Mounting Angle Improvement Leveraging GNSS Course Angle[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2023, 237(9): 2249-2261.

[15] WU Y X, GOODALL C, EL-SHEIMY N. Self-calibration for IMU/Odometer Land Navigation: Simulation and Test Results[C]//The 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, 2010.

[16] CHEN Q J, ZHANG Q, NIU X J. Estimate the Pitch and Heading Mounting Angles of the IMU for Land Vehicular GNSS/INS Integrated System[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 22(10): 6503-6515.

[17] 邓成剑,陈起金,张提升,等.基于航位推算的车载组合导航系统NHC杆臂估计算法[J].北京航空航天大学学报,2025,51(2):668-675.
DENG Chengjian, CHEN Qijin, ZHANG Tisheng, et al. NHC Lever Arm Estimation Algorithm for Vehicle-Integrated Navigation Systems Based on Dead Reckoning[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2025, 51(2): 668-675.

[18] MU M X, ZHAO L. A GNSS/INS-Integrated System for an Arbitrarily Mounted Land Vehicle Navigation Device[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 112.

[19] HWANG Y, JEONG Y, KWEON I S, et al. Online Misalignment Estimation of Strapdown Navigation for Land Vehicle Under Dynamic Condition[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2021, 22(6): 1723-1733.

[20] 张嘉骅,陶贤露,朱锋.安卓智能手机GNSS单点测速性能评估[J].导航定位学报,2021,9(3):26-35.
ZHANG Jiahua, TAO Xianlu, ZHU Feng. The Performance Evaluation of GNSS Absolute Velocity Determination for Android Smartphone[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2021, 9(3): 26-35.

[21] 王甫红,栾梦杰,程雨欣,等.城市环境下智能手机车载GNSS/MEMS IMU紧组合定位算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1106-1116.
WANG Fuhong, LUAN Mengjie, CHENG Yuxin, et al. Smartphone GNSS/MEMS IMU Tightly-Coupled Integration Positioning Method for Vehicular Navigation in Urban Conditions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1106-1116.

[22] 王献忠,张肖.基于准北东地系地面静态对准算法[J].航天控制,2022,40(1):37-41.
WANG Xianzhong, ZHANG Xiao. Ground Static Alignment Algorithm Based on Quasi-North-East Ground Coordinate System[J]. *Aerospace Control*, 2022, 40(1): 37-41.

[23] 郭磊,王甫红,桑吉章,等.一种新的利用历元间位置变化量约束的GNSS导航算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(1):21-27.
GUO Lei, WANG Fuhong, SANG Jizhang, et al. A New Inter-Epoch Position Variation Constrained Navigation Algorithm for Stand-Alone GNSS Receiver[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 21-27.

[24] WU Y X, WU M P, HU X P, et al. Self-Calibration for Land Navigation Using Inertial Sensors and Odometer: Observability Analysis [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Illinois, 2009.