

引用格式:冯木樨,翟昆朋,蔺晓龙,等. 基于简化车辆非完整约束辅助的低成本车载 INS/GNSS 组合导航系统研究[J]. 微电子学与计算机,2020,37(8):78-82. [FENG M J,ZHAI K P,LIN X L,et al. Study on low-cost vehicle INS/GNSS integrated navigation system based on assistance of simplified vehicle non-holonomic constraints[J]. Microelectronics & Computer,2020,37(8):78-82.]

基于简化车辆非完整约束辅助的低成本车载 INS/GNSS 组合导航系统研究

冯木樨^{1,2},翟昆朋¹,蔺晓龙¹,黄武康³,何文涛^{1,2}

(1 中国科学院 微电子研究所,北京 100020; 2 中国科学院大学,北京 100049;

3 中国科学院 微电子研究所 嘉兴微电子与系统工程中心,浙江 嘉兴 314001)

摘 要: 针对采用低成本 MEMS-IMU 器件的 INS/GNSS 组合导航系统在 GNSS 信号中断时产生较大误差的问题,研究了一种基于车辆非完整约束辅助的低成本车载 INS/GNSS 组合导航系统,针对系统的低成本特性对车辆非完整约束进行了简化,并据此推导了滤波算法的模型。仿真分析及车载测试的结果均表明,对于消费级 MEMS-IMU 和 GNSS 接收机构成的低成本 INS/GNSS 组合导航系统,加入简化车辆非完整约束的辅助后,在 GNSS 信号中断 1min 期间组合导航位置误差小于行驶距离的 3%。该约束的应用可以显著提高低成本车载 INS/GNSS 组合导航系统的精度。

关键词: MEMS-IMU; INS/GNSS 组合导航; 车辆非完整约束

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2020)08—0078—05

Study on low-cost vehicle INS/GNSS integrated navigation system based on assistance of simplified vehicle non-holonomic constraints

FENG Mu-ju^{1,2},ZHAI Kun-peng¹,LIN Xiao-long¹,
HUANG Wu-kang³,HE Wen-tao^{1,2}

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100020, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Jiaxing Microelectronics and System Engineering Center, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Jiaxing 314001, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of large errors for INS/GNSS integrated navigation system with low cost MEMS-IMU device, during loss of GNSS signal, a low-cost vehicle INS/GNSS integrated navigation system based on assistance of vehicle non-holonomic constraints is studied. The vehicle non-holonomic constraints are simplified for the low-cost characteristics of the system, and the model of the filtering algorithm is derived accordingly. The results of simulation analysis and on-board testing show that, for the low-cost INS/GNSS integrated navigation system composed of consumer-grade MEMS-IMU and GNSS receiver, during 1min loss of GNSS signal, the navigation position error is less than 3% of the driving distance, after adding the assistance of such simplified vehicle non-holonomic constraints. The application of such constraints can significantly improve the accuracy of low-cost vehicle INS/GNSS integrated navigation systems.

Key words: MEMS-IMU; INS/GNSS integrated navigation system; vehicle non-holonomic constraints

1 引言

惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 具有不依赖于外部观测环境、数据采样率高、短时精度高、导航参数完整等优点^[1-4]。然而,由于惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 本身的误差,INS 的导航精度会随着导航时间的推移而逐渐降低^[2]。采用某些外部观测量对 INS 进行辅助,可实时修正 INS 的误差。这种方式被认为是一种提高 INS 精度的有效方式^[1-3]。利用全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellites System, GNSS) 提供的导航信息作为 INS 的辅助是一种最常用的方法,这样的导航系统被称为 INS/GNSS 组合导航系统^[4-6],大量学者对其进行过深入的研究。然而,采用 GNSS 辅助也存在很多不足,主要是在 GNSS 信号较弱或中断时 (例如隧道内、城市高架桥下等环境),INS 误差仍然无法被有效地修正。

车辆非完整约束是指车辆在行驶过程中通常不会发生横向侧滑和沿路面垂直方向的移动,该特性可作为另一种有效的 INS 误差外部校正源^[7]。文献 [8] 将该方法应用于高成本的 DGPS-INS-里程计陆地车载组合导航系统 (采用战术级 IMU),取得了良好效果,但未在低成本组合导航系统上进行应用,且因需要额外在卡尔曼滤波器中估计车辆后轮到 IMU 的杆臂,而具有较大的计算复杂度。本文将该方法应用于低成本车载 INS/GNSS 组合导航系统 (采用消费级 IMU),并针对该应用场景对车辆非完整约束进行了简化,有效降低了滤波器的计算复杂度。

2 滤波算法模型

如图 1 所示,记车体坐标系为 v ,其原点位于车辆后轮与地面的接触点, x 轴指向车辆前进方向, y 轴指向车辆前进方向的右侧, z 轴指向车辆下方;记 IMU 坐标系为 b ,其三个坐标轴分别为 IMU 的三个敏感轴。算法采用卡尔曼滤波器 (KF) 在 ECEF 坐标系中进行导航解算。GNSS 天线相位中心到 IMU 坐标系的杆臂记为 l_{ba}^v ,其中上标 v 表示该矢量在 v 系的投影;车辆后轮到 IMU 坐标系的杆臂记为 l_{bv}^v 。IMU 在安装时三个敏感轴与 v 系的三个坐标轴大致重合,安装失准角为 ψ_{bv} 。

2.1 状态模型

取卡尔曼滤波器的状态向量为姿态误差、速度误差、位置误差、加速度计零偏、陀螺仪零偏、GNSS

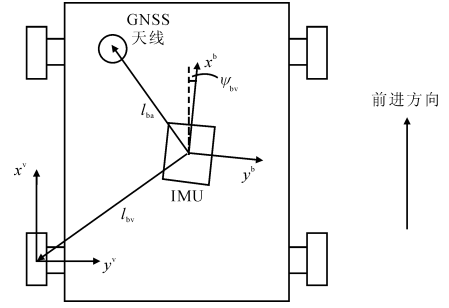


图 1 IMU 车载安装示意图

天线杆臂、IMU-车体失准角组成的 21 维向量:

$$\mathbf{x} = [\delta\psi_{eb}^e, \delta\mathbf{v}_{eb}^e, \delta\mathbf{r}_{eb}^e, \mathbf{b}_a, \mathbf{b}_g, \mathbf{I}_{ba}^v, \psi_{bv}]^T \quad (1)$$

姿态误差、速度误差、位置误差的时间导数期望分别为^[1]

$$\begin{aligned} E\left(\frac{d}{dt}\delta\psi_{eb}^e\right) &= -[\omega_{ie}^e]_{\times} \delta\psi_{eb}^e + \hat{\mathbf{C}}_b^e \mathbf{b}_g, \\ E\left(\frac{d}{dt}\delta\mathbf{v}_{eb}^e\right) &= -\hat{\mathbf{C}}_b^e \hat{\mathbf{f}}_{ib}^b \times \delta\psi_{eb}^e - 2[\omega_{ie}^e]_{\times} \delta\mathbf{v}_{eb}^e \\ &\quad - \frac{2\hat{\gamma}_{ib}^e}{\mathbf{r}_{es}^e(\hat{L}_b)} \frac{\hat{\mathbf{r}}_{eb}^{eT}}{|\hat{\mathbf{r}}_{eb}^e|} \delta\mathbf{r}_{eb}^e + \hat{\mathbf{C}}_b^e \mathbf{b}_a, \\ E\left(\frac{d}{dt}\delta\mathbf{r}_{eb}^e\right) &= \delta\mathbf{v}_{eb}^e \end{aligned} \quad (2)$$

式中,上标 i 表示惯性系; ω_{ie}^e 表示地球自转角速度; $[\cdot]_{\times}$ 表示方括号中矢量对应的反对称矩阵; $\hat{\gamma}_{ib}^e$ 为引力加速度; $\mathbf{r}_{es}^e(\hat{L}_b)$ 表示纬度 $\hat{L}_b$ 处的参考椭球表面地心半径。陀螺仪和加速度计零偏模型取为随机游走模型:

$$E\left(\frac{d}{dt}\mathbf{b}_a\right) = 0, E\left(\frac{d}{dt}\mathbf{b}_g\right) = 0 \quad (3)$$

同时假设 GNSS 天线杆臂和 IMU-车体失准角保持不变,有

$$E\left(\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{ba}^v\right) = 0, E\left(\frac{d}{dt}\psi_{bv}\right) = 0 \quad (4)$$

设时间间隔为 τ ,将式 (2)-(4) 离散化之后,可以得到卡尔曼滤波器的状态转移矩阵为

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11} & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \hat{\mathbf{C}}_b^e \tau & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{F}_{21} & \mathbf{F}_{22} & \mathbf{F}_{23} & \hat{\mathbf{C}}_b^e \tau & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 \tau & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{11} &= \mathbf{I}_3 - [\omega_{ie}^e]_{\times} \tau, \mathbf{F}_{22} = \mathbf{I}_3 - 2[\omega_{ie}^e]_{\times} \tau, \\ \mathbf{F}_{21} &= [-\hat{\mathbf{C}}_b^e \hat{\mathbf{f}}_{ib}^b]_{\times} \tau, \mathbf{F}_{23} = -\frac{2\hat{\gamma}_{ib}^e}{\mathbf{r}_{es}^e(\hat{L}_b)} \frac{\hat{\mathbf{r}}_{eb}^{eT}}{|\hat{\mathbf{r}}_{eb}^e|} \tau \end{aligned}$$

2.2 观测模型

采用 GNSS 的位置 $\tilde{\mathbf{r}}_{\text{ca}}^e$ 和速度测量值 $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{ca}}^e$ 为观测量,观测模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{ca}}^e &= \mathbf{r}_{\text{cb}}^e + \mathbf{C}_{\text{b}}^e \mathbf{C}_{\text{v}}^e \mathbf{l}_{\text{ba}}^e, \\ \mathbf{v}_{\text{ca}}^e &= \mathbf{v}_{\text{cb}}^e + \mathbf{C}_{\text{b}}^e (\boldsymbol{\omega}_{\text{ib}}^b \times \mathbf{C}_{\text{v}}^e \mathbf{l}_{\text{ba}}^e) \end{aligned} \quad (6)$$

同时,对于陆地车辆,通常情况下车体不会发生横向侧滑,也不会沿路面的垂直方向发生移动^[7,9],因此陆地车辆的速度满足如下非完整约束^[8,10-11]

$$\mathbf{J}_0 \mathbf{v}_{\text{ev}}^v = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{J}_0 \equiv \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

该约束可以作为一个虚拟观测,将其变换到 IMU 的速度有

$$\mathbf{0}_{2 \times 1} = \mathbf{J}_0 \mathbf{C}_{\text{b}}^v (\mathbf{C}_{\text{e}}^b \mathbf{v}_{\text{cb}}^e + \boldsymbol{\omega}_{\text{ib}}^b \times \mathbf{l}_{\text{bv}}^b) \quad (8)$$

上式已忽略地球旋转项。

在车辆发生侧滑的情况下,需在滤波器中禁用该约束。文献[12]表明,当车辆转弯的角速度大于 0.05 rad/s 时侧滑就会发生。对于普通的陆地车辆,车辆后轮到 IMU 的杆臂 $\mathbf{l}_{\text{bv}}^b$ 的量级为米级。低成本组合导航系统的测速精度不高,因此在以上约束有效的情况下, $\boldsymbol{\omega}_{\text{ib}}^b \times \mathbf{l}_{\text{bv}}^b$ 的最大值通常小于 $\mathbf{v}_{\text{cb}}^e$ 的误差,可忽略不计。所以,对于低成本组合导航系统,上面的非完整约束可以简化为

$$\mathbf{0}_{2 \times 1} = \mathbf{J}_0 \mathbf{C}_{\text{b}}^v \mathbf{C}_{\text{e}}^b \mathbf{v}_{\text{cb}}^e \quad (9)$$

经过上述简化之后,无需将车辆后轮到 IMU 杆臂 $\mathbf{l}_{\text{bv}}^b$ 加入卡尔曼滤波器的状态向量进行估计,从而可以有效降低滤波器的计算复杂度。

基于上述三个观测模型,观测新息为

$$\delta \mathbf{z}^- = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{r}}_{\text{ca}}^e - \hat{\mathbf{r}}_{\text{cb}}^e - \hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^e \hat{\mathbf{C}}_{\text{v}}^e \hat{\mathbf{l}}_{\text{ba}}^e \\ \tilde{\mathbf{v}}_{\text{ca}}^e - \hat{\mathbf{v}}_{\text{cb}}^e - \hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^e (\boldsymbol{\omega}_{\text{ib}}^b \times \hat{\mathbf{C}}_{\text{v}}^e \hat{\mathbf{l}}_{\text{ba}}^e) \\ - \mathbf{J}_0 \hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^v \hat{\mathbf{C}}_{\text{e}}^b \hat{\mathbf{v}}_{\text{cb}}^e \end{bmatrix} \quad (10)$$

利用 $\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\text{bv}}$ 为小角度,有

$$\hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^v = \mathbf{I}_3 - [\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\text{bv}}]_{\times}, \hat{\mathbf{C}}_{\text{v}}^e = \mathbf{I}_3 + [\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\text{bv}}]_{\times} \quad (11)$$

据此可以得到观测矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{r1} & \mathbf{0}_3 & -\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{H}_{r6} & \mathbf{H}_{r7} \\ \mathbf{H}_{v1} & -\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{H}_{v5} & \mathbf{H}_{v6} & \mathbf{H}_{v7} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{H}_{c2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{H}_{c7} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{r1} &= [\hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^e \hat{\mathbf{C}}_{\text{v}}^e \hat{\mathbf{l}}_{\text{ba}}^e]_{\times}, \mathbf{H}_{r6} = \hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^e \hat{\mathbf{C}}_{\text{v}}^e, \mathbf{H}_{r7} = -\hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^e [\hat{\mathbf{l}}_{\text{ba}}^e]_{\times}, \\ \mathbf{H}_{v1} &= [\hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^e (\boldsymbol{\omega}_{\text{ib}}^b \times \hat{\mathbf{C}}_{\text{v}}^e \hat{\mathbf{l}}_{\text{ba}}^e)]_{\times}, \mathbf{H}_{v5} = \hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^e [\hat{\mathbf{C}}_{\text{v}}^e \hat{\mathbf{l}}_{\text{ba}}^e]_{\times}, \\ \mathbf{H}_{v6} &= \hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^e [\boldsymbol{\omega}_{\text{ib}}^b]_{\times}, \mathbf{H}_{v7} = -\hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^e [\boldsymbol{\omega}_{\text{ib}}^b]_{\times} [\hat{\mathbf{l}}_{\text{ba}}^e]_{\times}, \\ \mathbf{H}_{c2} &= -\mathbf{J}_0 (\hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^v \hat{\mathbf{C}}_{\text{e}}^b)^T, \mathbf{H}_{c7} = \mathbf{J}_0 [(\hat{\mathbf{C}}_{\text{b}}^v)^T \hat{\mathbf{v}}_{\text{cb}}^e]_{\times} \end{aligned}$$

3 仿真分析

在仿真环境中设置好 IMU 相对车体的位置并保持不变,然后生成一组 175 s 的车辆真实运动参数:时间,IMU 的位置与速度,以及车体的姿态。每隔 0.01 s 生成一次。真实的车辆行驶轨迹如图 2 所示,具有 4 个转弯部分和 4 个直行部分。

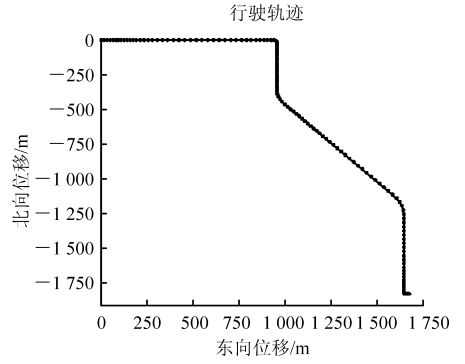


图 2 车辆真实行驶轨迹(仿真环境)

在仿真环境中设置 GNSS 天线-IMU 杆臂为 $\mathbf{l}_{\text{ba}}^v = [-0.3, 0.6, 0.1]^T \text{m}$, 后轮-IMU 杆臂为 $\mathbf{l}_{\text{bv}}^v = [-1.3, -0.6, 0.2]^T \text{m}$, IMU-车体失准角为 $\boldsymbol{\psi}_{\text{bv}}^v = [-1^\circ, 3^\circ, 2^\circ]^T$, 并将 IMU 模型设置为低成本消费级 MEMS 传感器模型,其参数如表 1 所示。然后生成 IMU 和 GNSS 测量数据。在 70 s 至 130 s 时间段内模拟 GNSS 信号中断。

表 1 仿真环境 IMU 模型参数

参数	值	单位
陀螺仪静态零偏	$[-200, 300, -500]$	deg/s
陀螺仪零偏不稳定性	2×10^{-12}	rad ² /s ³
陀螺仪随机噪声 PSD	0.004	deg ² /s/Hz ^{1/2}
加速度计静态零偏	$[10, -13, 9]$	mg
加速度计零偏不稳定性	1×10^{-12}	m ² /s ⁵
加速度计随机噪声 PSD	100	$\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$

设置好相应的参数后,分别运行加入约束辅助和未加入约束辅助的卡尔曼滤波器。两种情况下导航解算结果的位置误差、速度误差对比如图 3 所示。

仿真结果表明,在 GNSS 信号中断的 1 min 时间内,车辆行驶距离约为 1.4 km。如果不采用简化车辆非完整约束辅助低成本的 INS/GNSS 组合导航系统,在该区间内,最大位置误差可达 70 m(行驶距离的 5%),最大速度误差可达 1.4 m/s;在采用该约束辅助后,最大位置误差仅为 20 m 左右(行驶距离的 1.4%),最大速度误差仅为 0.7 m/s 左右。由此可见,加入简化车辆非完整约束辅助可显著提高

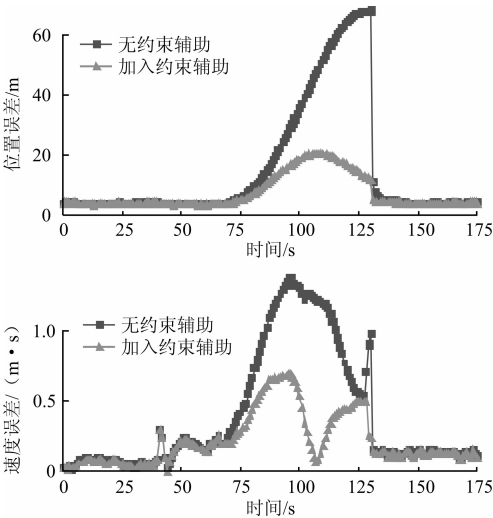


图 3 位置误差、速度误差对比(仿真环境)

低成本 INS/GNSS 组合导航系统的精度。

4 车载测试

车载测试采用的低成本 GNSS 接收机为杭州中科微电子公司的 ATGM332D 多模卫星定位模块(消费级,售价约几十元人民币),低成本 IMU 为 Bosch Sensortec 公司的 BMI160 六轴 MEMS 传感器(消费级,售价约 5 元人民币),两者安装于同一块板卡上并置于测试盒子内. 同时,采用千寻位置公司提供的网络 RTK 数据输入 Trimble 公司的厘米级 RTK 测绘板卡 BD982,将其固定解作为车载测试的位置基准.

测试车顶部的 GNSS 定位天线连接射频功分器的输入端口,然后分别将 BD982 板卡和测试盒子连接到功分器的两个输出端口. 测试路线全部位于 GNSS 信号良好的开阔地带,以使得 RTK 保持在锁定状态. 在测试过程中利用断开测试盒子天线的方法模拟 GNSS 信号中断的环境.

测试车、BD982 板卡和测试盒子的照片以及测试路线的 Google Earth 截图如图 4 所示. 其中测试车前部的天线为定位天线,后部的天线为定向天线,在本次实验中不用. 在行驶的过程中,断开测试盒子的 GNSS 天线大约 1 分钟,该区间内测试车大约行驶了 1.1 km.

以 BD982 板卡输出的定位结果作为基准,同时采用加入了简化非完整约束辅助和未加入该约束辅助的卡尔曼滤波器对数据进行处理,在 GNSS 信号中断区间附近,两种方法解算出的位置误差对比如图 5 所示,Google Earth 截图如图 6 所示.

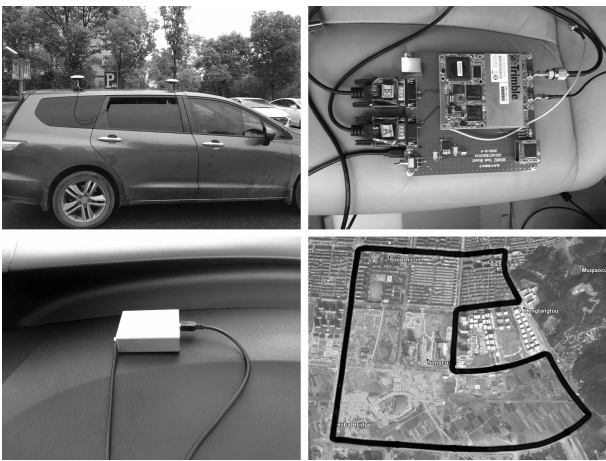


图 4 测试车、BD982 板卡、测试盒子照片以及测试路线

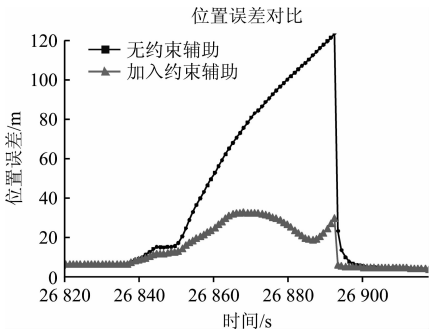


图 5 车载测试位置误差(以 BD982 RTK 固定解为基准)



图 6 部分导航解算结果与基准位置的 Google Earth 截图,箭头符号表示基准位置,偏离较大的三角形符号表示无约束辅助的解算结果,偏离较小的三角形符号表示加入约束辅助的解算结果

车载测试结果表明,在 GNSS 信号开始减弱至中断的区间内,传统 INS/GNSS 组合导航系统的位置误差会随着导航时间的推移而迅速增大,在大约 1 min 的时间内位置误差会增大到大约 120 m(行驶距离的 11%). 加入简化车辆非完整约束辅助后,在 GNSS 信号中断的区间内,由于约束可以作为另一外部校正源持续对 IMU 的误差进行校正,在大约 1 min 的时间内位置误差最大仅 30 m 左右(行驶距离

的 2.7%)。简化车辆非完整约束的辅助对于低成本消费级 INS/GNSS 组合导航系统的精度具有显著的提升。

5 结束语

车辆非完整约束是一种有效的 IMU 误差校正源。本文通过理论分析、仿真分析和车载测试,证明了车辆非完整约束用于辅助低成本消费级 INS/GNSS 车载组合导航系统的可行性。同时,也证明了该约束在应用于该场景时可进行简化,省去车辆后轮到 IMU 杆臂的估计,从而降低滤波器的计算复杂度。这一简化车辆非完整约束的应用对于提升低成本消费级 INS/GNSS 车载组合导航系统的精度具有实际意义。

参考文献:

- [1] PAUL D GROVES. Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems [M]. 2nd Edition. London: Artech House, 2013.
- [2] DAVID H TITTERTON, JOHN L WESTON. Strapdown Inertial Navigation Technology [M]. 2nd Edition. London: Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [3] COX D B. Integration of GPS with inertial navigation systems [J]. Navigation, 1978, 2(25): 236-245.
- [4] GREENSPAN R L. Global Positioning System: Theory and Applications, Volume II [M]. Washington: AIAA, 1996: 187-220.
- [5] TANG Y G, WU Y X, WU M P, et al. INS/GPS Integration: Global Observability Analysis [J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 2009, 58(3): 1129-1142.
- [6] GREWAL M S, WEILL L R, ANDREWS A P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration [M]. 2nd Edition. New York: Wiley, 2007: 382-387.
- [7] 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 TRANSAC-

TIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2001, 17(5): 731-747.

- [8] WU Y X, CHRIS GOODALL, NASER EI-SHEIMY. Self-calibration for IMU/Odometer Land Navigation: Simulation and Test Results [C] // ION 2010 International Technical Meeting. San Diego: ION, 2010: 839-849.
- [9] NIU X J, SAMEH NASSAR, NASER EI-SHEIMY. An Accurate Land-Vehicle MEMS IMU/GPS Navigation System Using 3D Auxiliary Velocity Updates [J]. NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation, 2007, 54(3): 177-188
- [10] WU Y X. Versatile Land Navigation Using Inertial Sensors and Odometry: Self-calibration, In-motion Alignment and Positioning [C] // Inertial Sensors and Systems. Karlsruhe: IEEE, 2014.
- [11] WU Y, WU M, HU X, et al. Self-calibration for Land Navigation Using Inertial Sensors and Odometer: Observability Analysis [C] // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Chicago: AIAA, 2009.
- [12] RYAN J, BEVLY D. Robust Ground Vehicle Constraints for Aiding Stand Alone INS and Determining Inertial Sensor Errors [C] // International Technical Meeting of The Institute of Navigation. Newport Beach: ION, 2012: 374-384.

作者简介:

冯木樨 男,(1995-),硕士研究生.研究方向为 INS/GNSS 组合导航。

翟昆朋 男,(1986-),博士,副研究员.研究方向为组合导航算法。

蔺晓龙 男,(1985-),博士,副研究员.研究方向为卫星导航算法。

黄武康 男,(1981-),硕士,研究员.研究方向为超大规模集成电路设计。

何文涛(通讯作者) 男,(1982-),博士,研究员.研究方向为导航算法及超大规模集成电路设计。

E-mail:hewentao@casic.ac.cn