

# GNSS/INS 紧组合算法实时性改进与嵌入式验证

章红平<sup>1</sup> 常 乐<sup>1</sup> 汪宏晨<sup>3</sup> 牛小骥<sup>1</sup> 高周正<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079)

(<sup>2</sup> 武汉大学测绘学院, 武汉 430079)

(<sup>3</sup> 武汉大学科学技术发展研究院, 武汉 430079)

**摘要:** 针对 GNSS/INS 实时紧组合导航系统中存在的 GNSS 数据延迟以及组合更新解算耗时过长的问題, 基于 Kalman 滤波理论, 提出了一种在完成了滞后的观测更新后将误差状态向量一步转移到当前时刻的 Kalman 滤波数学模型. 为了验证改进模型的有效性, 首先, 在 Windows 平台上, 利用车载实测 GNSS 观测数据和 IMU 观测数据对比分析了使用改进模型解算与标准 Kalman 模型解算在 GNSS 信号中断时段内的导航误差, 分析结果表明 2 种模型的导航误差相当, 说明了改进模型对时间延迟处理的正确性. 然后, 在 DSP 硬件平台上, 基于改进模型实现了 GNSS/INS 实时紧组合导航系统, 并进行了车载测试, 实测结果表明: 相对于标准 Kalman 模型, 所提出的改进模型能够在保障紧组合导航系统精度的前提下, 将输出导航结果的时间延迟减少到最小, 保障了组合导航结果的实时性.

**关键词:** GNSS/INS 紧组合; 算法实时性; DSP; Kalman 滤波

**中图分类号:** P228.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2016)04-0695-07

## Improvement and verification of real-time performance of GNSS/INS tightly coupled integration in embedded platform

Zhang Hongping<sup>1</sup> Chang Le<sup>1</sup> Wang Hongchen<sup>3</sup> Niu Xiaoji<sup>1</sup> Gao Zhouzheng<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(<sup>2</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(<sup>3</sup> Academy of Science and Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Aiming at the data delay of the global navigation satellite system (GNSS) and too long time consuming problems for Kalman updating existing in the GNSS/INS (inertial navigation system) real time tightly coupled integration system, an improved mathematical model for transferring the error state to the current time in one step after finishing the delayed observation update is proposed based on the Kalman filter theory. In order to verify the effects of the improved model, first, in the Windows platforms, navigation errors during the GNSS signal interruption period of the improved model and the standard Kalman filter model are comparatively analyzed by using the GNSS and the IMU observations of a vehicle testing. The results show that the navigation errors of the two models are similar. So the time delay processing of the improved model is correct. Then, a GNSS/INS real-time tightly coupled integration system based on the digital signal processor (DSP) is developed by using the improved mathematical model and verified by a vehicle testing. The testing results show that compared with the standard Kalman filter model, the improved model can significantly reduce the time delay, thus ensuring the accuracy of the tightly coupled integration system and real-time performance of the system.

**Key words:** GNSS (global navigation satellite system) /INS (inertial navigation system) tightly coupled integration; real-time performance; digital signal processor; Kalman filter

收稿日期: 2015-11-13. 作者简介: 章红平(1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, hpzhang@whu.edu.cn.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA124002)、国家自然科学基金资助项目(41404029).

引用本文: 章红平, 常乐, 汪宏晨, 等. GNSS/INS 紧组合算法实时性改进与嵌入式验证[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 695-701. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.04.004.

基于全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和惯性导航系统(inertial navigation system, INS)的组合导航是目前最具有应用价值的组合模式之一。特别是基于 GNSS 原始观测量和 INS 数据的紧组合。在该组合模式下,即使在可见卫星不足以单独进行 GNSS 解算时,仍可有效利用有限的 GNSS 观测数据和 INS 数据通过 Kalman 滤波进行紧组合解算,得到可靠的导航信息<sup>[1]</sup>。因此,GNSS/INS 紧组合在工程中得到了越来越广泛的应用。

然而,GNSS/INS 紧组合实时应用中,观测数据时间延迟会导致当前时刻观测数据无法实时获取,组合解算时间延迟会导致观测数据无法及时处理,这 2 个问题直接影响 GNSS/INS 紧组合系统的实时性能。目前,时间延迟的解决策略主要采用增广状态方法<sup>[2]</sup>和基于新息重组理论<sup>[3-4]</sup>建立最优滤波器。其中,增广状态方法会增加状态维度,使得计算量增大;而新息重组的方法,需要建立多个观测方程,如果有多步延迟,则不利于对 Kalman 滤波器的灵活拓展与应用。而且这些方法只能解决观测数据传输延迟,不能解决计算延迟问题。GNSS/INS 实时紧组合算法主要分为机械编排-Kalman 预测以及组合更新 2 部分,前者一般可以在 IMU (inertial measurement unit) 采样间隔内完成计算;后者则比较耗时,普通嵌入式处理器中无法在 IMU 采样间隔内及时完成,且 GNSS 观测数据基本上是从商业接收机板卡中获取,观测数据传输会有一定的延迟,导致 Kalman 滤波的观测更新计算不能及时完成。这种情况下,如果使用标准 Kalman 滤波算法,需要将后续 IMU 观测数据缓存起来不处理,等待观测更新完成才进行下一步计算,这会造成组合导航结果输出的阻塞和延迟,影响系统的实时性能。针对这个问题,本文提出了适用于 GNSS 观测数据延迟及组合更新计算延迟的 Kalman 滤波数学模型,并在 Windows 平台及 DSP (digital signal processor) 嵌入式硬件平台上对该模型的计算精度和实时性进行了验证和分析。

## 1 GNSS/INS 实时紧组合模型

### 1.1 GNSS/INS 实时紧组合数学模型

由于 IMU 采样率大于 GNSS 接收机采样率,因此当 GNSS 观测数据不可用时,GNSS/INS 紧组合利用 IMU 数据通过 INS 机械编排来更新状态参数中的位置、速度和姿态信息。紧组合系统中,系统状态参数  $x$  由 INS 误差状态和 GNSS 接收机时钟

误差共同组成,可以表示为<sup>[1]</sup>

$$x = [\delta r^n \quad \delta v^n \quad \psi \quad b_g \quad b_a \quad s_g \quad s_a \quad \delta V_{t_R} \quad \delta f_R]^T \quad (1)$$

式中,  $\delta r^n$ ,  $\delta v^n$ ,  $\psi$  分别表示位置误差、速度误差和姿态角误差;  $b_g$ ,  $s_g$  分别表示陀螺零偏和比例因子;  $b_a$ ,  $s_a$  分别表示加速度计零偏和比例因子;  $\delta V_{t_R}$  表示接收机钟差误差;  $\delta f_R$  表示接收机钟漂误差。

采用 Kalman 滤波时间更新方程实现状态参数的更新<sup>[1]</sup>,即

$$x_k = \Phi_{k,k-1} x_{k-1} + G_{k,k-1} w_{k-1} \quad (2)$$

式中,  $G_{k,k-1}$  为系统噪声驱动矩阵;  $w_{k-1}$  为系统噪声;  $\Phi_{k,k-1}$  为  $k-1$  时刻到  $k$  时刻的系统转移矩阵,其值由状态参数的动力学模型决定。本文采用 Psi 角模型来描述位置、速度和姿态的变化<sup>[5]</sup>,采用一阶高斯-马尔科夫过程描述 IMU 零偏和比例因子的变化<sup>[5]</sup>,采用随机游走过程描述接收机钟差和钟漂的变化<sup>[1]</sup>。

若 GNSS 观测数据可用,则利用 GNSS 观测值与 INS 推算观测值,以闭环修正模式进行 GNSS/INS 紧组合 Kalman 观测更新解算,其观测模型可简单表示为<sup>[1]</sup>

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (3)$$

式中,  $v_k$  为伪距、多普勒测量噪声;  $H_k$  为设计矩阵;  $z_k$  为观测向量,可通过计算 INS 推算的 GNSS 伪距、多普勒值与 GNSS 接收机观测的伪距、多普勒观测值之差得到,即

$$z_k = \begin{bmatrix} z_p \\ z_d \end{bmatrix}, z_p = \begin{bmatrix} P_{\text{INS}_1} - P_{\text{GNSS}_1} \\ \vdots \\ P_{\text{INS}_i} - P_{\text{GNSS}_i} \end{bmatrix}, z_d = \begin{bmatrix} \dot{P}_{\text{INS}_1} - \dot{P}_{\text{GNSS}_1} \\ \vdots \\ \dot{P}_{\text{INS}_j} - \dot{P}_{\text{GNSS}_j} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_{\text{INS}_i} - P_{\text{GNSS}_i} = A_i (r_i^s - \hat{r}_R) + c \hat{V}_{t_R} - c V_{t_i^s} - V_{\text{ion}_i} - V_{\text{trop}_i} - P_{\text{GNSS}_i} \quad (5)$$

$$P_{\text{INS}_j} - P_{\text{GNSS}_j} = A_j (v_j^s - \hat{v}_R) + c \hat{f}_R - \lambda_m D_j \quad (6)$$

式中,  $P_{\text{INS}_i}$  为 INS 推算的伪距;  $P_{\text{GNSS}_i}$  为 GNSS 接收机观测的伪距;  $A_i$  为载体与卫星  $i$  的方向余弦;  $r_i^s$  为卫星  $i$  的位置;  $\hat{r}_R$  为 INS 推算的载体位置;  $\hat{V}_{t_R}$  为接收机钟差估计值;  $c$  为光速;  $V_{t_i^s}$ ,  $V_{\text{ion}_i}$ ,  $V_{\text{trop}_i}$  分别为卫星  $i$  的钟差、电离层改正、对流层改正;  $P_{\text{INS}_j}$  为 INS 推算的卫星  $j$  的多普勒值;  $P_{\text{GNSS}_j}$  为 GNSS 接收机观测卫星  $j$  的多普勒值;  $v_j^s$  为卫星  $j$  的速度;  $\hat{v}_R$  为 INS 推算的载体速度;  $\hat{f}_R$  为接收机钟漂估计;  $D_j$  为  $m$  频段的多普勒观测值;  $\lambda_m$  为  $m$  频段的波长。

式(3)中的  $H_k$  可通过对式(5)、(6)进行线性化得到。

## 1.2 GNSS/INS 紧组合时间延迟处理

在实时处理中,为了解决 GNSS 数据获取不及时以及更新计算耗时较长所带来的等待问题,可以将机械编排-预测以及组合更新分解成具有优先级别的 2 个独立任务进行。处理时序示意图如图 1 所示,在 GNSS 采样时刻保存预测误差协方差矩阵和机械编排解算的导航状态,在该采样时刻 GNSS 观测数据实际接收到的时刻开始进行组合更新计算。在组合更新计算完成后,还需要将滞后计算出的、反映 GNSS 采样时刻的状态参数估计量以及状态参数协方差估计量正确转移到计算完成时刻(即当前时刻),以修正当前时刻的惯导误差,输出最优的组合结果。在进行这些处理的过程中,应一直保持优先进行 INS 机械编排和 Kalman 预测计算。只要保证机械编排-Kalman 预测在 IMU 采样间隔(如 5 ms)内完成,以及 Kalman 观测更新计算在 GNSS 采样间隔(如 1 s)内完成,就能够保证组合导航解算的实时性。

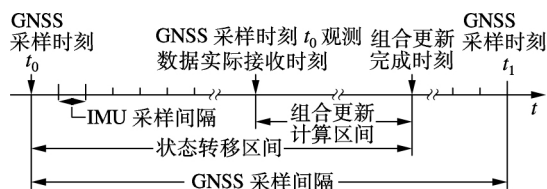


图1 处理时序示意图

## 1.3 状态转移

状态转移是根据  $k$  时刻的状态估计  $j$  时刻( $j > k$ )的状态,即根据  $k$  个测量  $z_1, z_2, \dots, z_k$  对  $x_j$  作线性最小方差估计  $\hat{x}_{j,k}^-$  [6],即

$$\hat{x}_{j,k}^- = \hat{E}[x_j / (z_1 z_2 \dots z_k)] \quad (7)$$

根据式(2),并且考虑到  $\Phi_{k+1,k-1} = \Phi_{k+1,k} \Phi_{k,k-1}$ ,从  $k$  时刻迭代到  $j$  时刻可以得到

$$x_j = \Phi_{j,k} x_k + \sum_{i=k+1}^j (\Phi_{j,i} G_{i,i-1} w_{i-1}) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),得到

$$\begin{aligned} \hat{x}_{j,k}^- &= \hat{E}[x_j / (z_1 z_2 \dots z_k)] = \hat{E} \left[ \left( \Phi_{j,k} x_k + \sum_{i=k+1}^j (\Phi_{j,i} G_{i,i-1} w_{i-1}) \right) / (z_1 z_2 \dots z_k) \right] = \\ &= \hat{E}[\Phi_{j,k} x_k / (z_1 z_2 \dots z_k)] + \\ &= \sum_{i=k+1}^j \Phi_{j,i} G_{i,i-1} \hat{E}[w_{i-1} / (z_1 z_2 \dots z_k)] \quad (9) \end{aligned}$$

由式(2)可知,  $w_{k-1}$  只影响到  $x_k$ ,所以  $w_{i-1}$  ( $i \geq k+1$  且  $i \leq j$ ) 与  $z_1 z_2 \dots z_k$  不相关,且  $E(w_{i-1}) = 0$ ,因此

$$\hat{x}_{j,k}^- = \Phi_{j,k} \hat{E}[x_k / (z_1 z_2 \dots z_k)] = \Phi_{j,k} \hat{x}_k^+ \quad (10)$$

式中  $\hat{x}_k^+$  为  $x_k$  更新估计量。

对于预测误差的协方差矩阵  $P_{j,k}^- = E[\tilde{x}_{j,k} \tilde{x}_{j,k}^T]$ ,  $\tilde{x}_{j,k}$  为  $\hat{x}_{j,k}^-$  的误差,即

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{j,k} &= x_j - \hat{x}_{j,k}^- = \\ &= \Phi_{j,k} x_k + \sum_{i=k+1}^j (\Phi_{j,i} G_{i,i-1} w_{i-1}) - \Phi_{j,k} \hat{x}_k^+ = \\ &= \Phi_{j,k} \tilde{x}_k + \sum_{i=k+1}^j (\Phi_{j,i} G_{i,i-1} w_{i-1}) \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{j,k}^- &= E[\tilde{x}_{j,k} \tilde{x}_{j,k}^T] = \Phi_{j,k} E[\tilde{x}_k \tilde{x}_k^T] \Phi_{j,k}^T + \\ &= \sum_{i=k+1}^j (\Phi_{j,i} G_{i,i-1} E[w_{i-1} w_{i-1}^T] G_{i,i-1}^T \Phi_{j,i}^T) = \\ &= \Phi_{j,k} P_k^+ \Phi_{j,k}^T + \sum_{i=k+1}^j (\Phi_{j,i} G_{i,i-1} Q_{i-1} G_{i,i-1}^T \Phi_{j,i}^T) \quad (12) \end{aligned}$$

式中  $P_{j,k}^-$  为  $x$  在  $j$  时刻的预测协方差矩阵;  $P_k^+$  为  $x$  在  $k$  时刻的协方差矩阵;  $Q$  为  $w$  的协方差矩阵。在 GNSS/INS 紧组合中  $G$  为正定矩阵,因此  $GQG^T = Q$ 。

令  $M_{j,k+1} = \sum_{i=k+1}^j \Phi_{j,i} Q_{i-1} \Phi_{j,i}^T$ ,可以得到

$$\begin{aligned} M_{j+1,k+1} &= Q_j + \Phi_{j+1,j} M_{j,k+1} \Phi_{j+1,j}^T \\ M_{k+1,k+1} &= Q_k \quad (13) \end{aligned}$$

综上,状态转移公式为

$$\begin{aligned} \hat{x}_{j,k}^- &= \Phi_{j,k} \hat{x}_k^+ \\ P_{j,k}^- &= \Phi_{j,k} P_k^+ \Phi_{j,k}^T + M_{j,k+1} \quad (14) \end{aligned}$$

由式(14)可以看出,状态转移可以由累积的状态转移矩阵及状态噪声阵得到。把 GNSS 采样时刻看作是  $k$  时刻,更新计算完成时刻看作是  $j$  时刻,利用式(14)可以把  $k$  时刻的状态参数更新估计量以及状态参数协方差更新估计量转移到  $j$  时刻,进而在更新计算完成时刻进行组合更新。

状态转移矩阵  $\Phi$  中存在大量零元素,在实时程序中,为了减少计算量,可以对与  $\Phi$  相关的计算进行专门处理,避免零元素参与乘法运算。

## 1.4 组合更新

采用 Kalman 滤波进行组合更新解算 [6],即

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_{k,k-1}^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k,k-1}^-) \quad (15)$$

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_{k,k-1}^- (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (16)$$

式中  $K_k$  为卡尔曼滤波增益矩阵;  $P_k^+$  为状态参数的协方差矩阵更新估计量;  $R_k$  为观测信息先验方差矩阵,本文按卫星高度角确定观测值先验方差 [7]。

在嵌入式系统中,内存资源十分宝贵,为了减少内存开销,本文在嵌入式实时紧组合系统的观测

<http://journal.seu.edu.cn>

更新中采用了序贯 Kalman 滤波<sup>[8]</sup>方式.

## 2 GNSS/INS 实时紧组合系统实现

本文在武汉迈普时空导航科技有限公司高精度定位测姿系统(POS310,IMU 主要参数见表 1,GNSS 板卡型号为 Trimble BD982)的基础上,基于 TMS320C6747 开发了 GNSS/INS 实时紧组合系统.IMU 采样率为 200 Hz,GNSS 采样率为 1 Hz,导航结果输出率为 200 Hz,系统设计结构主要有 ARM(acorn risc machine)和 DSP2 个处理器(见图 2).ARM 负责陀螺仪及加速度计原始数据采集,并利用 GNSS 板卡提供的 1PPS 把 IMU 数据标记上 GPS 时间标志<sup>[9]</sup>,通过串口向外部和 DSP 发送带有时间标志的 IMU 数据,DSP 负责实时组合导航的计算.

表 1 POS310 的 IMU 主要性能参数

| 参数  | 数值       |
|---|----------|
| 陀螺零偏/ $((^{\circ}) \cdot h^{-1})$         | 0.5      |
| 角度随机游走/ $((^{\circ}) \cdot h^{-1/2})$     | 0.05     |
| 加速度零偏/ $(mm \cdot s^{-2})$                | 0.000 25 |
| 速度随机游走/ $(m \cdot s^{-1} \cdot h^{-1/2})$ | 0.1      |

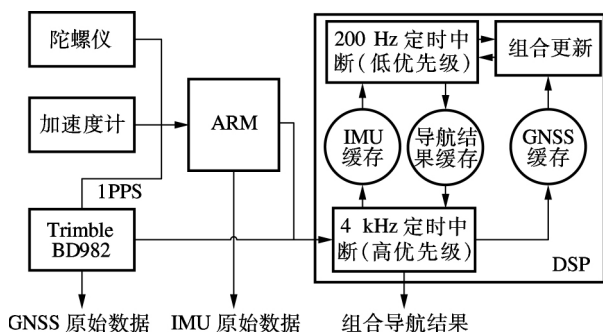


图 2 GNSS/INS 实时组合导航系统结构

为了实现多任务模式的解算,在 DSP 中进行了中断优先级和中断嵌套设计<sup>[10-12]</sup>.DSP 分为 4 kHz 定时中断、200 Hz 定时中断以及主函数 3 部分,4 kHz 定时中断优先级高于 200 Hz 定时中断,负责把 GNSS、IMU 原始数据采集到原始数据环形缓存区<sup>[13]</sup>中以及把导航结果环形缓存区中的数据通过串口发送到外部;200 Hz 定时中断从 IMU 原始数据环形缓存区中获取 IMU 观测数据进行机械编排、Kalman 预测以及从主函数获取组合更新量进行反馈,再把导航结果存入导航结果环形缓存区中;主函数负责从 GNSS 原始数据环形缓存区中获取 GNSS 观测数据进行组合更新计算,并将组合更新量传入 200 Hz 定时中断.

为了验证算法的实时性能,使用 DSP 片内计时器统计 200 Hz 定时中断内从 IMU 原始数据获

取到输出导航结果以及主函数中组合更新的运行时间,并在导航结果中记录输出.

## 3 实测结果和分析

为了验证 GNSS/INS 实时紧组合导航系统的性能,本文于 2015 年 9 月 29 日在武汉市文化大道附近进行了 2 次实际车载测试,每次测试时长约 40 min,平均速率为 20 km/h,最大速率达 38 km/h,测试环境为开阔天空.本次测试使用 Trimble Net R9 作为静止参考站,基线长度约为 16 km,在测试车中搭载本文开发完成的 GNSS/INS 实时紧组合系统.第 1 次测试使用本文给出的改进 Kalman 滤波算法的程序,第 2 次测试使用标准 Kalman 滤波算法的程序,同时采集 GNSS 原始观测数据、IMU 原始观测数据以及实时组合导航解算结果.数据分析采用武汉迈普时空导航科技有限公司开发的高精度 GNSS/INS 组合导航数据处理软件 GINS v1.5,使用 GINS 解算的 PPK(post processed kinematic)/INS 松组合反向平滑结果作为位置、速度和姿态的参考真值.由于所选路段处于开阔地带,PPK 解算均是固定解,在基线小于 20 km 的情况下,经 PPK/INS 松组合反向平滑处理后,位置精度为 0.05 m,速度精度为 0.01 m/s,航向精度为  $0.02^{\circ} \sim 0.05^{\circ}$ ,横滚俯仰精度为  $0.01^{\circ} \sim 0.02^{\circ}$ ,该精度高于常规的 GNSS/INS 伪距紧组合算法约 1 个量级以上,因而可以用来评价 GNSS/INS 实时紧组合导航系统的性能.

### 3.1 延迟处理精度验证

利用采集的原始数据,在 Windows 平台下采用正向滤波仿真 GNSS/INS 实时紧组合的方式来验证本文对延迟处理的正确性.对测试时段从 GPS 历元数 260 开始到 GPS 历元数 2 660 结束,共模拟了 14 次卫星信号中断,每次中断时长 1 min,中断结束后信号恢复 2 min,用来恢复状态估计.通过对比在没有延迟 GNSS 观测数据的情况下,标准 Kalman 滤波处理方法(方案 1)与 GNSS 观测数据被人为延迟 0.9 s 的情况下,采用本文提出的改进 Kalman 滤波处理方法(方案 2)在信号中断时段的导航误差,来评估本文方法对时间延迟处理的精度.

2 种方案处理的误差曲线如图 3 和图 4 所示,图中  $\Delta P_N$ 、 $\Delta P_E$ 、 $\Delta P_D$  分别表示位置北、东、地误差, $\Delta V_N$ 、 $\Delta V_E$ 、 $\Delta V_D$  分别表示速度北、东、地误差, $\Delta A_R$ 、 $\Delta A_P$ 、 $\Delta A_H$  分别表示横滚、俯仰、航向的姿态误差.从图中可以看出,导航误差曲线基本一致.从表 2 的统计结果来看,方案 1 和方案 2 在卫星信号

中断期间的导航误差统计值具有很好的一致性,北向位置误差 RMS 分别为 8.490 8.526 m,东向位置误差 RMS 分别为 8.660 8.691 m,地下的位置误差 RMS 分别为 5.698 5.971 m;北向速度误差 RMS 分别为 0.260 0.261 m/s,东向速度误差 RMS 均为 0.309 m/s,地下速度误差 RMS 分别为 0.047 0.049 m/s;横滚姿态误差 RMS 均为 0.033°,俯仰姿态误差 RMS 均为 0.039°,航向的姿态误差 RMS 分别为 0.314° 0.316°。因此可以认为方案 1 与方案 2 处理精度一致,验证了本文给出的改进 Kalman 滤波算法对延迟处理的正确性。

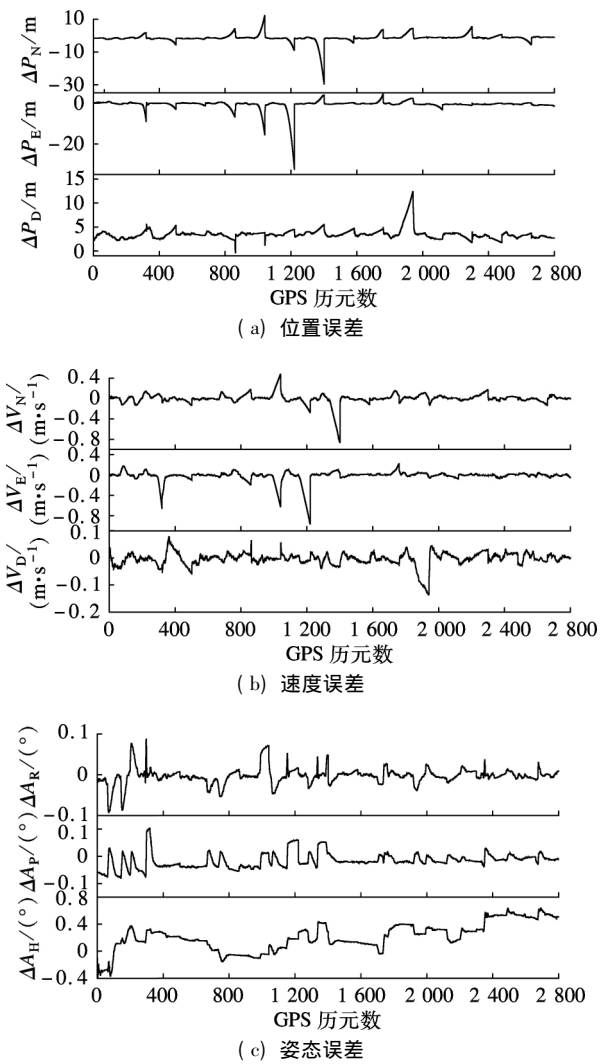


图 3 方案 1 误差曲线

3.2 实时性验证

根据实时记录的计算耗时,绘制出第 1 次测试的 GNSS 数据延迟、200 Hz 中断计算耗时以及更新计算耗时的频率直方图。从图 5 可以看出:获取 GNSS 数据有明显的延迟,大约在 56 59 以及 49 ms,时间延迟的差异可能是观测卫星数目不同以及

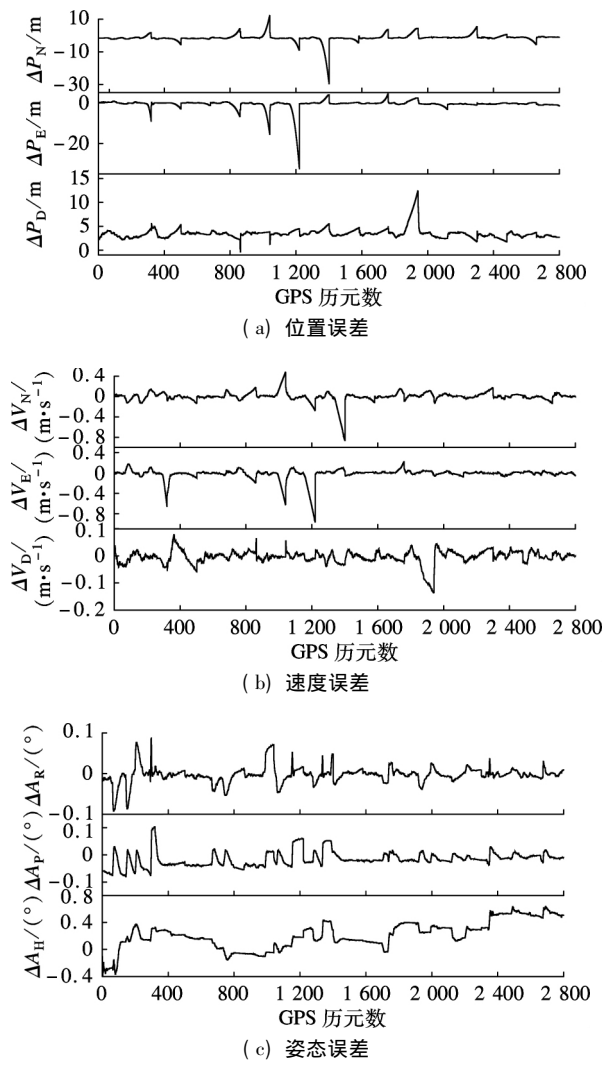


图 4 方案 2 误差曲线

表 2 信号中断导航误差统计

| 误差项                       |    | 方案 1   |       |       | 方案 2   |       |       |
|---------------------------|----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
|                           |    | 最大值    | 均值    | RMS   | 最大值    | 均值    | RMS   |
| 位置误差/m                    | 北向 | 28.756 | 5.714 | 8.490 | 28.746 | 5.847 | 8.526 |
|                           | 东向 | 31.736 | 5.048 | 8.660 | 31.730 | 5.206 | 8.691 |
|                           | 地下 | 15.304 | 4.682 | 5.698 | 15.309 | 5.017 | 5.971 |
| 速度误差/(m·s <sup>-1</sup> ) | 北向 | 0.858  | 0.176 | 0.260 | 0.857  | 0.179 | 0.261 |
|                           | 东向 | 0.961  | 0.181 | 0.309 | 0.961  | 0.184 | 0.309 |
|                           | 地下 | 0.137  | 0.035 | 0.047 | 0.137  | 0.038 | 0.049 |
| 姿态误差/(°)                  | 横滚 | 0.089  | 0.024 | 0.033 | 0.089  | 0.024 | 0.033 |
|                           | 俯仰 | 0.105  | 0.031 | 0.039 | 0.104  | 0.030 | 0.039 |
|                           | 航向 | 0.535  | 0.279 | 0.314 | 0.535  | 0.281 | 0.316 |

导航星历消息数据更新引起的传输数据大小不同所致;200 Hz 中断函数的执行时间 95% 左右的约在 0.5 ms,4% 左右的约在 1.25 ms,少部分约在 2.8 ms,没有大于 4 ms 的部分,因此可以认为中断函数能够在 200 Hz 中断间隔中执行完毕;组合更新执行时间大部分在 45 ~ 70 ms,没有大于 90 ms 的部分。综合图 5 的统计,可以看出 GNSS 延迟更新时间大约为 150 ms,完全可以在一个 GNSS 采

样间隔内完成组合更新计算. 由此看来, 本文提出的改进 Kalman 滤波实时处理方案在实际测试中能够按照设计要求运行, 可以满足 GNSS/INS 实时紧组合系统的实时性要求.

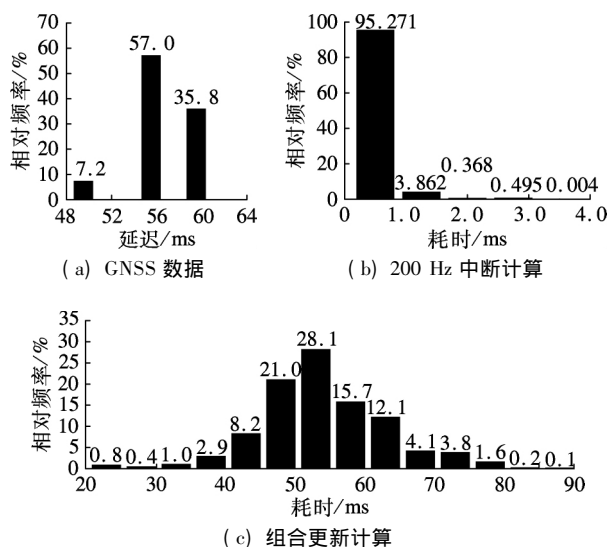


图 5 频率直方图

从图 6 可以看出: 改进 Kalman 滤波算法的时间延迟都在 5 ms 之内, 在 IMU 采样间隔内完成了导航解算. 延迟时间大致可以分为 2 部分: ① 延迟较小的部分, 完成的是基本机械编排-Kalman 预测; ② 延迟较大的部分, 完成的是要同时处理组合更新量的状态转移以及反馈. 标准 Kalman 滤波算法的时间延迟大部分在 100 ms 左右, 显著大于 IMU 采样间隔, 因而存在严重的时间延迟. 相比于

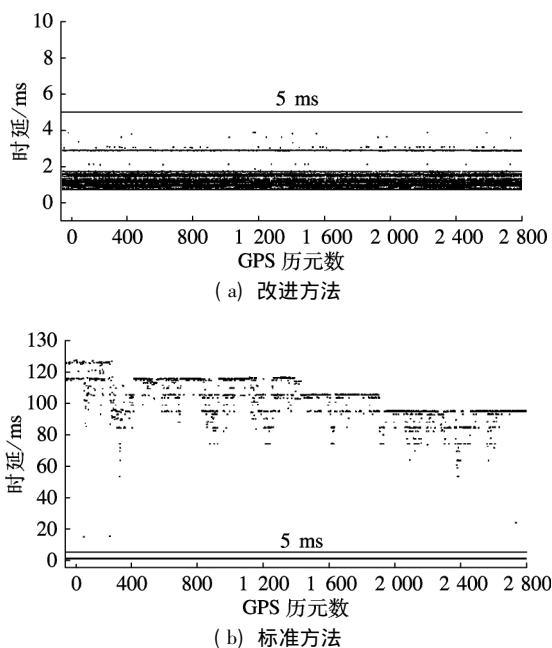


图 6 导航解算延迟

标准 Kalman 滤波计算方式, 本文给出的改进 Kalman 滤波方式有效地减少了时间延迟, 确保了实时系统的实时有效性能.

### 3.3 实测精度验证

将第 1 次测试采集的实时导航结果与参考真值做比较, 实时导航误差曲线如图 7 所示, 导航误差统计见表 3. 从表 3 的统计结果可以看出, 北向、东向、地下的位置误差的标准差分别为 0.408,

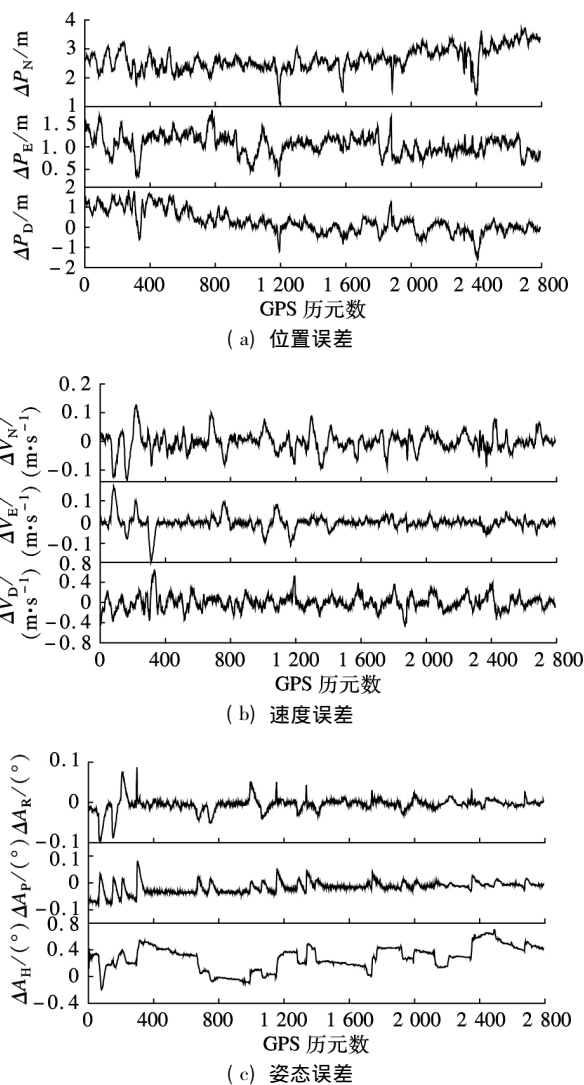


图 7 实时导航误差曲线

表 3 实时导航误差统计

| 误差项                              |    | 最大值   | 均值     | 标准差   |
|----------------------------------|----|-------|--------|-------|
| 位置误差/m                           | 北向 | 2.407 | -1.356 | 0.408 |
|                                  | 东向 | 1.036 | -0.011 | 0.363 |
|                                  | 地向 | 1.683 | -0.136 | 0.366 |
| 速度误差/<br>( m • s <sup>-1</sup> ) | 北向 | 0.147 | -0.001 | 0.034 |
|                                  | 东向 | 0.203 | -0.003 | 0.034 |
|                                  | 地向 | 0.068 | -0.001 | 0.014 |
| 姿态误差/(°)                         | 横滚 | 0.095 | -0.003 | 0.017 |
|                                  | 俯仰 | 0.085 | -0.016 | 0.021 |
|                                  | 航向 | 0.548 | 0.172  | 0.184 |

0.363 0.366 m,北向、东向、地向的速度误差的标准差分别为0.034 0.034 0.014 m/s,横滚、俯仰、航向的姿态误差的标准差分别为0.017° 0.021°, 0.184°。导航误差均在伪距紧组合理论精度范围内,可以认为运用本文给出的改进 Kalman 滤波实现的 GNSS/INS 实时紧组合系统计算精度满足设计要求。

## 4 结语

本文针对 GNSS/INS 实时紧组合中存在的 GNSS 数据获取延迟以及更新计算耗时较长的问题,从 Kalman 滤波基本原理出发,得到了适用于 GNSS 观测及更新延迟的 Kalman 滤波数学模型,并且通过后处理仿真延迟与正常处理做对比,验证了延迟更新处理的正确性。最后,在硬件平台上实现了 GNSS/INS 实时紧组合系统,实际车载测试表明导航精度及实时性达到了设计要求。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘川川. 基于伪距/多普勒的 GPS/INS 紧组合算法实现与抗差性能研究[D]. 武汉: 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 2012.
- [2] 王光辉. 基于时滞多传感器数据的信息融合滤波[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学电子工程学院, 2013.
- [3] 卢晓. 观测时滞系统的最优滤波[D]. 大连: 大连理工大学控制理论与控制工程系, 2008.
- [4] 李林林. 测量数据延迟下的不完全量测滤波研究[D]. 南京: 南京理工大学控制理论与控制工程系, 2012.
- [5] Shin Eun-Hwan. Estimation techniques for low-cost inertial navigation[D]. Calgary, Canada: Department of Geomatics Engineering, Calgary University, 2005.
- [6] 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000: 33-56.
- [7] 岳俊, 何冰. 定位坐标分量依赖于卫星高度角的灵敏度分析[J]. 测绘通报, 2014(1): 5-8, 18. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2014.0002.
- Yue Jun, He Bing. Analysis of the sensitivity-components linked by satellite azimuth in GPS measurement [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(1): 5-8, 18. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2014.0002. (in Chinese)
- [8] 孙德波, 杨功流, 张玉堂. SINS/GPS 组合导航序贯滤波算法[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(1): 59-63, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6734.2005.01.014. Sun Debo, Yang Gongliu, Zhang Yutang. Sequential estimation for SINS/GPS integrated navigation [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2005, 13(1): 59-63, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6734.2005.01.014. (in Chinese)
- [9] 刘帅, 孙付平, 陈坡, 等. GPS/INS 组合导航系统时间同步方法综述[J]. 全球定位系统, 2012, 37(1): 53-56. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9268.2012.01.014. Liu Shuai, Sun Fuping, Chen Po, et al. A survey of time synchronization solutions in GPS/INS integrated systems [J]. *GNSS Word of China*, 2012, 37(1): 53-56. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9268.2012.01.014. (in Chinese)
- [10] Texas Instruments. TMS320C6745/C6747 DSP Technical reference manual [EB/OL]. (2013-03-01) [2014-07-29]. <http://www.ti.com/lit/ug/spruh91b/spruh91b.pdf>.
- [11] Texas Instruments. TMS320C674x DSP CPU and instruction set [EB/OL]. (2010-07-10) [2011-08-18]. <http://www.ti.com/lit/ug/sprufe8b/sprufe8b.pdf>.
- [12] Texas Instruments. TMS320C674x DSP megamodule reference guide [EB/OL]. (2010-08-23) [2011-08-16]. <http://www.ti.com/lit/ug/sprufk5a/sprufk5a.pdf>.
- [13] 姚章俊, 陈蜀宇, 卢尧. 一种高性能环形缓冲区的研究与实现[J]. 计算机工程, 2012, 38(8): 228-231. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.08.074. Yao Zhangjun, Chen Shuyu, Lu Yao. Research and implementation of high-performance ring buffer [J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(8): 228-231. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.08.074. (in Chinese)