

# GPS/SINS 组合系统时间同步误差的分析与验证

杨 涛<sup>1</sup> 王 玮<sup>1</sup> 朱智勤<sup>2</sup>

(1 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,北京市学院路 37 号,100191)  
(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘 要:**用示波器测量了 Novatel Superstar II GPS 接收机串口输出的导航数据相对于 1 pps 的时间延迟,并以此估算出该接收机用于组合导航时时间同步误差的取值范围应为 0.6~1.6 s。使用该接收机与某现役机载 SINS 构成组合系统进行了跑车实验。实验结果表明,根据跑车数据拟合出的 GPS/SINS 组合系统的时间同步误差约为 1.1 s,说明本方法对时间同步概念的描述是符合实际的。

**关键词:**GPS/SINS;组合系统;时间同步;物理概念;实验验证

**中图法分类号:**P228.41;P207

SINS 自主性和实时性较好且分辨率高,但误差随时间积累;而 GPS 精度高,且误差不随时间积累,但抗干扰能力较差。这种互补特性使 GPS/SINS 组合系统可用于高精度定位定向系统(position and orientation system, POS),为其提供高精度的位置和姿态信息。GPS/SINS 可广泛应用于测绘、遥感和导航<sup>[1-5]</sup>。

GPS 和 SINS 的软件组合一般通过卡尔曼滤波实现。因为两套系统具有不同的时间基准和数据率,只有解决 GPS 和 SINS 的时间同步问题,才能使 GPS 和 SINS 的信息实现最优组合,才能保证 GPS/SINS 组合系统提供高精度的位置和姿态信息。国内外已有许多研究人员对实现组合导航系统时间同步的方法进行了研究<sup>[6-14]</sup>,他们对 GPS/SINS 时间同步物理概念的理解不尽相同。准确理解和把握 GPS/SINS 组合系统时间同步的物理概念是对其进行研究的前提和基础,为此,有必要对 GPS/SINS 组合系统时间同步的基本概念进行深入研究。本文在对时间同步基本概念进行理论研究的基础上,使用实验手段进行了验证。

## 1 时间同步问题的基本概念

游文虎等<sup>[10]</sup>提出一种以 GPS 接收机输出的

1 pps 作为参考时标,软硬件相结合实现时间同步的方法。刘广孚等<sup>[11]</sup>提出一种基于 CPLD 的同步电路实现时间同步的方法。肖进丽等<sup>[12]</sup>提出一种完全利用软件编程实现时间同步的方法。虽然他们实现时间同步的方法不同,但对时间同步问题基本概念的描述基本一致。他们认为在进行 GPS/SINS 时间同步时,可以利用 GPS 的 1 pps 脉冲作为同步的标准时刻进行时间同步,其提出的时间同步的概念如图 1 所示。图 1 中,长竖线表示 GPS 的 1 pps 脉冲,即 GPS 数据更新点;短竖线表示 SINS 的数据更新时刻。如果得到了 SINS 和 GPS 之间的时间差为  $\Delta\tau$ ,那么经过插值或外推就可以得到 SINS 在每个 1 pps 点上的对应值。

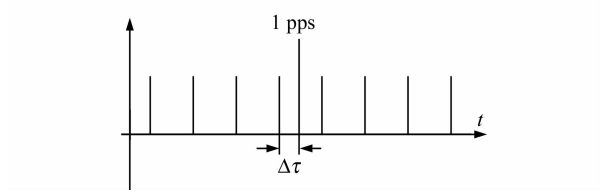


图 1 已有研究的时间同步概念  
Fig. 1 Time Synchronization Concept Proposed

他们提出的 GPS 和 SINS 时间同步的概念在实际应用中可能会遇到以下两个方面的问题:  
① 由于 GPS 接收机并不是在 1 pps 时刻就输出

导航数据包,而是相对 1 pps 时刻延迟一段时间才开始输出。要按照他们的设想进行时间同步,必须先 在组合导航处理器中构建一个缓冲区缓存 SINS 数据,等得到接收机输出的导航信息后再从缓冲队列中读取相应的 SINS 数据进行时间同步和组合导航计算。这不仅大大增加了组合导航处理器的负担,还会使 GPS/SINS 组合系统输出产生延迟,进而产生较大的位置和姿态误差。② 以 1 pps 为基准的组合方式会大大降低组合系统的可用性,因为在三维导航的情况下,只有当可见星数目大于或等于 4 颗时, GPS 接收机才能提供 1 pps 脉冲输出。

GPS 接收机严格在每个 1 pps 上升沿进行一次码相位和载波相位测量,而接收机的 NEMA 导航数据包输出相对 1 pps 上升沿会有一定的延迟。假设 GPS 的输出频率和滤波周期均为 1 s, GPS/SINS 组合导航的时间同步误差是指惯导的整秒时刻(即滤波时刻)与组合导航计算机此时可用的 GPS 导航信息对应的测量时刻之间的时间间隔。如图 2 和图 3 所示, GPS 时序中向上的箭头表示 1 pps 脉冲的上升沿,惯导时序中的长竖线表示惯导的整秒时刻。根据导航处理器完成 GPS 数据接收和提取的时刻与 1 pps 对应关系的不同,时间同步误差存在最小值  $\Delta_1$  和最大值  $\Delta_2$  两种极限情况<sup>[15]</sup>。

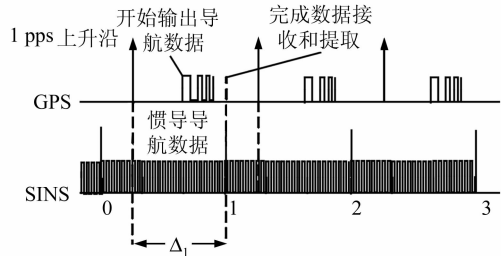


图 2 GPS/SINS 时间同步误差的最小值  
Fig. 2 Minimum Value of GPS/SINS Time Synchronization Error

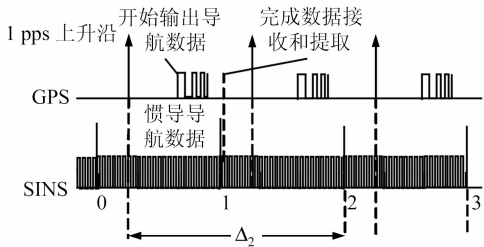


图 3 GPS/SINS 时间同步误差的最大值  
Fig. 3 Maximum Value of GPS/SINS Time Synchronization Error

如果在整秒时刻刚好完成一包导航数据的接收和提取,则此时时间同步误差取得最小值,有  $\Delta_1 = \text{数据延迟时间} + \text{数据接收和提取时间}$ 。如果前一整秒时刻刚好没有完成一帧导航信息的接收和提取,那么提取的 GPS 导航信息只能用于下一整秒时刻滤波,则此时时间同步误差取得最大值,有  $\Delta_2 = \text{数据延迟时间} + \text{数据接收和提取时间} + 1 \text{ 个 } 1 \text{ pps 周期}(1 \text{ s})$ 。对于一次特定的组合导航过程来说,如果忽略惯导时钟频漂的影响, GPS/SINS 组合导航时间同步误差可看作一个常数;然而,对不同的组合导航过程来说,这个量又是随机的,即 GPS/SINS 时间同步误差是一个随机常数,应满足  $\Delta_1 \leq \Delta \leq \Delta_2$ 。

## 2 时间不同步误差的估算

如果忽略数据传输延迟以及导航数据接收和提取时间,那么时间同步误差的取值范围就只取决于 GPS 接收机串口输出的导航数据相对于 1 pps 的延迟时间  $d_0$ ,有:

$$d_0 \leq \Delta \leq 1 + d_0 \tag{1}$$

对一台 GPS 接收机来说,只需测量出  $d_0$  就可以估算出使用该接收机组成的 GPS/SINS 系统时间同步误差的取值范围。使用 Tektronix TDS2024 示波器对 Novatel Superstar II GPS 接收机的  $d_0$  值进行了测量,结果如图 4 所示。

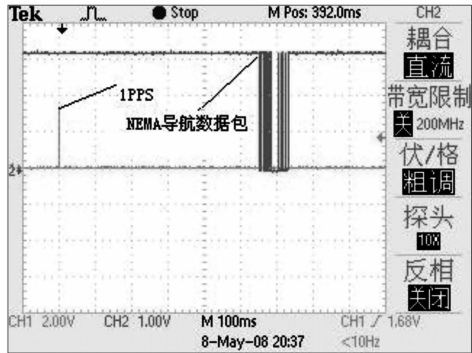


图 4 导航数据包相对 1 pps 的时间延迟  
Fig. 4 Time Delay of Navigation Data Relative to 1 pps

图 4 中,左侧的竖线为 GPS 的 1 pps 信号,右侧的波形数据为接收机串口输出的 NEMA 格式的导航数据,示波器的时间标度为 100 ms/格。从图 4 可以看出,  $d_0 \approx 0.6 \text{ s}$ 。根据式(1)可估算出使用该接收机构成的 GPS/SINS 组合系统的时间同步误差的取值应为  $0.6 \text{ s} \leq \Delta \leq 1.6 \text{ s}$ 。

3 车载实验验证

为验证前面对 GPS/SINS 时间不同步误差的估算结果是否正确,使用某型现役机载惯导系统和 Novatel Superstar II GPS 接收机构成组合系统进行了跑车实验,车的运动轨迹如图 5 所示。实验中使用的 SINS 陀螺漂移为  $0.01^{\circ}/\text{h}$ ,加速度计零偏为  $10\text{ }\mu\text{g}$ ;使用的 GPS 接收机的水平位置误差为  $6\text{ m}(1\sigma)$ ,速度误差为  $0.05\text{ m/s}(1\sigma)$ ;GPS 接收机和 SINS 的数据采样率均为  $1\text{ Hz}$ 。

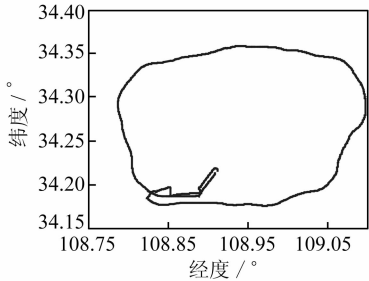


图 5 实验车的运动轨迹

Fig. 5 Trajectory of Experimental Vehicle

SINS 和 GPS 的速度差可分为以下两个部分:①经由时间同步误差  $\Delta$  引起的速度误差,它可表示为加速度与时间同步误差的乘积;② 其他因素(如惯导的初始误差、GPS 天线和 SINS 安装杆臂等)引起的速度误差,它在拟合时间段内可看作常值。因此, $\Delta V_e$ 和  $\Delta$ 、 $\Delta V_n$ 和  $\Delta$  均呈线性关系,可通过线性拟合的方法求解  $\Delta$ 。SINS 和 GPS 的速度差与组合系统时间同步误差  $\Delta$  的关系可表示为:

$$\Delta V_e = V_{Ie} - V_{Ge} = \Delta V_{e_0} + a_e \cdot \Delta \quad (2)$$

$$\Delta V_n = V_{In} - V_{Gn} = \Delta V_{n_0} + a_n \cdot \Delta \quad (3)$$

式中, $\Delta V_e$ 为 SINS 和 GPS 的东向速度差, $\Delta V_n$ 为 SINS 和 GPS 的北向速度差; $V_{Ie}$ 为 SINS 的东向速度, $V_{Ge}$ 为 GPS 的东向速度; $V_{In}$ 为 SINS 的北向速度, $V_{Gn}$ 为 GPS 的北向速度; $a_e$ 为 SINS 的东向加速度, $a_n$ 为 SINS 的北向加速度。

根据式(2)和式(3)分段线性拟合出时间同步误差  $\Delta$ ,结果如表 1 所示。

表 1 对  $\Delta$  线性拟合的结果

Tab. 1 Linear Fitting Results of  $\Delta$

数据区间/s	$\Delta$ 的拟合结果/s	
	使用 $\Delta V_e$ 数据	使用 $\Delta V_n$
[92, 120]	1.232 4	1.205 8
[315, 384]	1.100 3	1.096 3
[387, 487]	1.077 3	1.082 4

从表 1 可以看出,在[92, 120]区间内,用式(2)和式(3)拟合的时间同步误差分别为  $1.232\text{ 4 s}$ 和  $1.205\text{ 8 s}$ ;在[315, 384]区间分别为  $1.100\text{ 3 s}$ 和  $1.096\text{ 3 s}$ ;在[387, 487]区间内则分别为  $1.077\text{ 3 s}$ 和  $1.082\text{ 4 s}$ 。

在[92, 120]区间内  $\Delta V_e$ 和  $a_e$ 、 $\Delta V_n$ 和  $a_n$ 的变化趋势分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 可以直观地看出,在此区间内  $\Delta V_e$ 和  $a_e$ 、 $\Delta V_n$ 和  $a_n$ 的变化趋势基本一致,这也印证了前面所用的数据处理方法是合理的。

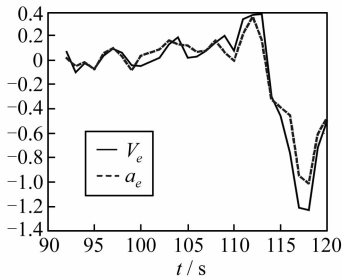


图 6 [92, 120]区间内  $\Delta V_e$ 和  $a_e$ 变化趋势的对比

Fig. 6 Comparison of Variation Trend Between  $\Delta V_e$  and  $a_e$  in [92, 120]

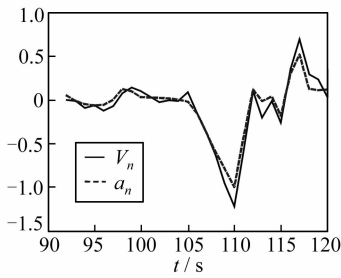


图 7 [92, 120]区间内  $\Delta V_n$ 和  $a_n$ 变化趋势的对比

Fig. 7 Comparison of Variation Trend Between  $\Delta V_n$  and  $a_n$  in [92, 120]

参 考 文 献

[1] 郭大海,吴立新,王建超,等. 机载 POS 系统对地定位方法初探[J]. 国土资源遥感,2004,17(2): 26-31

[2] 袁修孝,傅建红,左正立,等. 机载 POS 系统用于航空遥感直接对地目标定位的精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(10): 847-850

[3] 袁修孝,杨芬,赵青,等. 机载 POS 系统视准轴误差检校[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(12): 1039-1043

[4] 袁修孝,季顺平. POS 数据辅助的航空影像变化检测方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(4):283-286

[5] 傅建红,袁修孝. 基准站设置对 POS 系统定位精度的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32

- (5): 398-401
- [6] Li B H, Rizos C, Lee H K, et al. A GPS-slaved Time Synchronization System for Hybrid Navigation [J]. GPS Solutions, 2006, 10(3): 207-217
- [7] Li Y, Mumford P J, Wang J L, et al. Time Synchronization Analysis of an FPGA Based GPS/INS Integrated System [EB/OL]. [http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/liy\\_et al2006c.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/liy_et al2006c.pdf), 2008
- [8] Ding W D, Wang J L, Li Y, et al. Time Synchronization Error and Calibration in Integrated GPS/INS Systems [J]. ETRL Journal, 2008, 30(1): 59-67
- [9] Skaloud J, Viret P. GPS/INS Integration [J]. European Journal of Navigation, 2004, 2(4): 40-44
- [10] 游文虎, 姜复兴. INS/GPS 组合导航系统的数据同步技术研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(4): 20-22
- [11] Liu Guangfu, Zhang Weigong, Li Xu, et al. Data Synchronization in IMU/GPS Integrated Measurement System of Vehicle Motion Parameters [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2006, 22(2): 200-203
- [12] 肖进丽, 潘正风, 黄声亭. GPS/INS 组合导航系统数据同步处理方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008(7): 715-717
- [13] Lee H K, Lee J G, Jee G I. Calibration of Measurement Delay in Global Positioning System/Strapdown Inertial Navigation System [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2002, 25(2): 240-247
- [14] Skog I. GNSS-aided INS for Land Vehicle Positioning and Navigation [D]. KTH (Royal Institute of Technology): School of Electrical Engineering, 2007
- [15] Yang Tao, Wang Wei. On-line Estimation and Compensation of Measurement Delay in GPS/SINS Integration [C]. Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology, Beijing, 2008

---

第一作者简介: 杨涛, 博士生, 现从事 GPS/SINS 组合导航方面的研究。

E-mail: yangtaoaspe@gmail.com

## Analysis and Verification of Time Synchronization Error in GPS/SINS Integrated System

YANG Tao<sup>1</sup> WANG Wei<sup>1</sup> ZHU Zhiqin<sup>1</sup>

(1 School of Instrumentation and Optoelectronics Engineering, Beihang University, 37 Xueyuan Road, Beijing 100191, China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Aiming at the fact that many researchers did not understand the concept of GPS/SINS time synchronization clearly, understanding of time synchronization was proposed. Firstly, time delay of serial navigation data relative to 1 pps of Novatel GPS receiver was measured by an oscillograph, based on which time synchronization error of GPS/SINS integrated system including this GPS receiver was estimated, which was between 0.6 s and 1.6 s. Then, a vehicle experiment was accomplished with an integrated system comprised of this receiver and a military airborne SINS. Experiment results showed that time synchronization error fitted with vehicle experiment data was about 1.1 s, which illustrated that the description on the concept of GPS/SINS integrated system time synchronization in this paper is practical.

**Key words:** GPS/SINS; integrated system; time synchronization; physical concept; experimental demonstration