

摘要：低成本捷联惯性导航系统 SINS、GPS 硬件和相应的组合导航算法已经开始成熟，但仍然缺少简单可行的、完整的组合系统方案。针对低成本 SINS\GPS 组合导航设计了一套完整的方案。首先利用 GPRS 和 TCP/IP 通信链路实时传输 GPS 差分数据，提高 GPS 定位精度。用计算机串口接收 SINS\GPS 数据，并利用计算机时间使 SINS 和 GPS 数据同步。然后给出了 SINS 速度和位置更新的简化算法，由于低成本 SINS 无法确定航向角，所以使用 SINS 自带的姿态和航向参考系统输出的航姿信息。最后阐述了方案采用的组合导航数据融合卡尔曼滤波模型，并以 RTK 定位数据为参考真值进行了车载实验，实验表明组合系统更加稳健，定位精度明显提高。

关键字：惯性导航；组合导航；卡尔曼滤波

中图分类号：V249.32+8

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2016)08-0023-05

收稿日期：2016-07-03

低成本 SINS/GPS 组合导航系统方案

侯凯宇 刘庆元 鹿星亮

中南大学地球科学与信息物理学院，湖南长沙 410083

一、引言

导航定位已成为了交通工具不可缺少的一部分。导航分为自主式和非自主式，自主式导航包括惯性导航、多普勒导航和天文导航等。非自主式导航包括卫星导航、无线电导航等。以 GPS 为代表的卫星导航能够提供全球性、全天候的导航定位服务，但是卫星导航的信号容易受到遮挡导致定位失败，且无法获取载体的姿态信息。

捷联惯性导航系统 (Strapdown Inertial Navigation System, SINS) 是惯性导航的一种实现方式，SINS 不受外界干扰，可以输出载体的位置、速度、姿态。但是 SINS 独立导航时误差会迅速积累。SINS\GPS 组合导航是公认的有发展前景的一种导航模式。

针对低成本 SINS\GPS 组合导航，国内学者进行了大量研究。周姜滨设计了适合于工程应用的组合导航系统的结构与方案，并给出了组合导航系统位置速度交替组合模式的数学模型^[1]；曹娟娟提出一种利用磁强计辅助 MEMS-SINS 组合导航系统信息融合模型^[2]；林雪原提出了利用 AHRS 代替 SINS 航向角信息的方法，试验表明利用该方法可有效地抑制组合系

统航向角的发散趋势^[3]；冯绍军设计了组合系统硬件和相应软件，并验证了组合系统的性能及可行性^[4]。其他学者也进行了相应研究^[5-6]。

以上研究重点介绍了组合导航系统的算法部分，对组合系统其他部分的介绍较少，没有形成一套完整的组合方案。本文设计了一套完整的组合导航系统方案，介绍了低成本 SINS\GPS 的硬件组成、GPS 差分数据传输、组合系统数据接收及数据同步的方法，给出了 SINS 导航数据更新的方案及简化数学模型，论述了数据融合卡尔曼滤波模型并进行了车载实验。

二、硬件组成与 TCP/IP 链路

系统组成包括：2 块 GPS 接收板，1 个 SINS 模块，2 台笔记本电脑，其中 1 台笔记本需要连接互联网。

系统工作流程如图 1，可分为四步：

- (1) GPS 基准站通过 TCP/IP 链路将定位数据上传到服务器；
- (2) 服务器通过 TCP/IP 链路将 GPS 基准站的定位数据发送到 GPS 流动站，流动站进行差分处理；
- (3) GPS 流动站通过串口 2 将差分后的定位数据

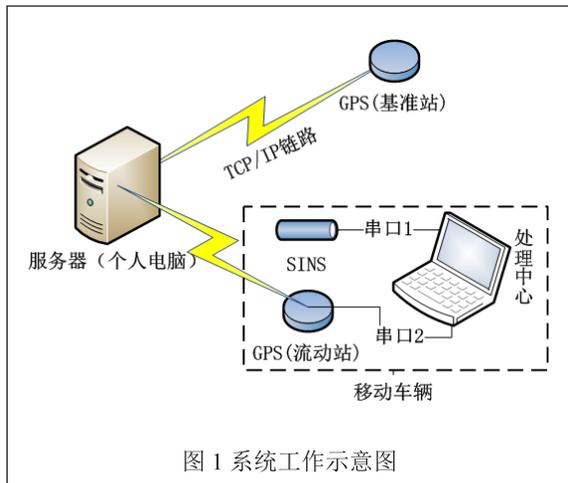


图 1 系统工作示意图

传输到处理中心，SINS 通过串口 1 将陀螺仪和加速度计数据传输到处理中心：

(4) 处理中心融合 SINS、GPS 数据。

1、硬件组成

MPU6050 是本文使用 SINS 的核心元器件，集成了 3 轴陀螺仪、3 轴加速度计，可测量载体的线加速度和角速度。模块内部整合了 16 位的 ADC 传感器允许陀螺仪和加速度计的实时采样，提高了测量精度以及实现了数据的实时性。

SIM908 是一款集成了 GSM/GPRS 技术的单频 C/A 码 GPS 模块，每秒输出 1 次 NMEA-0183 格式的 GPS 定位信息，由于其集成了 GSM/GPRS 功能，所以配合使用手机 SIM 卡就能快速搭建 TCP/IP 链路。

2、TCP/IP 链路

SIM908 定位精度低，无法输出伪距。可以使用两块 SIM908 开发板进行位置差分，从而提高 GPS 的定位精度。利用 SIM908 的 GPRS 功能搭建 TCP/IP 链路，利用该链路将基准站的定位信息传输给流动站（即组合系统的 GPS）。

基准站与流动站数据传输的方法为：

(1) 使用一台处于公网中的电脑作为远程服务器；

(2) 基准站和流动站分别与服务器建立 TCP/IP 连接；

(3) 利用服务器将基准站的数据转发给流动站。

利用 Visual Basic(VB) 语言及 TCP/IP 通讯控件

Winsock 可以快速实现 TCP/IP 通讯^[7]。当远程服务器处于内网中时，可以使用内网通软件映射一个外网 IP。

三、数据接收与同步

1、数据接收

SIM908 开发板采用 RS-232 串口通信接口标准，采用异步串行方式进行数据传送。SINS 数据通讯时可以通过硬件转换为同样的接口标准。

通过 VB 语言及串口通讯控件 MSComm 可以快速、方便地实现串口通讯^[7]。本文使用两个串口分别接收 SINS 和 GPS 数据。

2、数据同步

GPS 能提供授时服务，而 SINS 不具备时间系统，因此，SINS 和 GPS 存在数据不同步的问题。在组合导航系统进行数据融合时，数据不同步会影响组合系统的定位精度^[8]。数据同步可以通过三种方式实现：软件、硬件、软硬件结合。

本文使用软件实现数据同步。思路是将 SINS 和 GPS 置于同一个时间系统下，用该系统的时间对 SINS 和 GPS 数据进行标记，从而达到数据同步的目的。可以利用计算机时间作为统一的时间系统，在提取数据的同时记录计算机时间。

使用 windows 系统的 API 函数 GetLocalTime 能方便地获取计算机时间，时间精度为毫秒级^[9]。此外，数据同步的时间误差还包含：两个串口的数据传输时间之差；程序提取、解析数据的时间。但对于低精度的组合导航系统，数据同步的要求较低^[8]。

四、惯导数据更新

1、航姿的获取

低成本 SINS 的陀螺不能感知地球自转，导致组合系统无法获取航向角。为了解决这一现象，可以利用 SINS 自带的姿态和航向参考系统 (Attitude and Heading Reference System, AHRS)。AHRS 分为两部分：在 SINS 中植入姿态角算法，从而得到姿态角；在 SINS 中集成三轴磁力计获取地球磁北，经过磁偏角补偿后得到航向角。

本文使用 AHRS 输出的航向角和姿态角替代惯导解算的航姿,省去了航姿更新的步骤,也无需考虑惯导的初始对准问题。

2、速度与位置更新

首先定义坐标系, i 表示惯性坐标系, e 表示地心地固坐标系, 选取东-北-天为导航坐标系 n (忽略 n 系变化)。

由惯导基本方程, 速度更新算法如下^[10]:

$$\mathbf{v}_m^n = \mathbf{v}_{m-1}^n + \Delta \mathbf{v}_{sfm}^n + \Delta \mathbf{v}_{g/corm}^n \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{v}_{g/corm}^n = \mathbf{g}_{m-1}^n T_m - (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n) \times \mathbf{v}_{m-1}^n T_m \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{v}_{sfm}^n = \mathbf{C}_{b(m-1)}^n \Delta \mathbf{v}_{sfm}^{b(m-1)} \quad (3)$$

$$\Delta \mathbf{v}_{sfm}^{b(m-1)} = \Delta \mathbf{v}_m + \Delta \mathbf{v}_{rotm} + \Delta \mathbf{v}_{sculm} \quad (4)$$

式中, 下标 m 、 $m-1$ 分别表示 t_m 、 t_{m-1} 时刻;

$\Delta \mathbf{v}_{sfm}^n$ 一在 $[t_m, t_{m-1}]$ 时间段内由比力引起的的速度补偿量;

$\Delta \mathbf{v}_{g/corm}^n$ 一在 $[t_m, t_{m-1}]$ 时间段内由有害加速度引起的速度补偿量;

T_m 一惯导数据更新时间间隔, $T_m = t_m - t_{m-1}$;

ω_{en} 一位置速率;

ω_{ie} 一地球自转角速度;

g 一当地重力加速度;

$\mathbf{C}_{b(m-1)}^n$ 一表示 t_{m-1} 时刻的姿态矩阵

$\Delta \mathbf{v}_m$ 一比力产生的速度增量;

$\Delta \mathbf{v}_{rotm}$ 一表示速度旋转效应产生的速度增量;

$\Delta \mathbf{v}_{sculm}$ 一表示划桨效应产生的速度增量。

$\Delta \mathbf{v}_{rotm}$ 和 $\Delta \mathbf{v}_{sculm}$ 采用双子样优化算法计算得出, 到此完成速度更新。

位置更新算法如下^[10]:

$$L_m = L_{m-1} + \frac{v_{Nm-1}^n + v_{Nm}^n}{2(R_{Mm-1} + h_{m-1})} \quad (5a)$$

$$\lambda_m = \lambda_{m-1} + \frac{v_{Em-1}^n + v_{Em}^n}{2(R_{Nm-1} + h_{m-1})} \sec L_{m-1} \quad (5b)$$

$$h_m = h_{m-1} + \frac{v_{Um-1}^n + v_{Um}^n}{2} \quad (5c)$$

式中, L 、 λ 、 h 一分别表示纬度、经度和大地高;

v_N 、 v_E 、 v_U 一分别表示北向、东向和天向速度;

R_M 、 R_N 一分别表示子午圈和卯酉圈半径。

五、数据融合

使用卡尔曼滤波器融合 SINS 与 GPS 数据, 组合模式为位置组合, 数学模型^[11]为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{Q} \\ \mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{R} \end{cases} \quad (6)$$

由于使用 AHRS 输出的航姿替代惯导解算的航姿, 所以卡尔曼滤波器状态方程仅包含惯导速度和位置误差方程。

综上所述, 选取状态估计量为:

$$\mathbf{x} = [\delta v^n \quad \delta p^n \quad o^b]^T \quad (7)$$

式中, δv^n 一速度误差;

δp^n 一位置误差;

o^b 一加速度计零偏。

六、实验

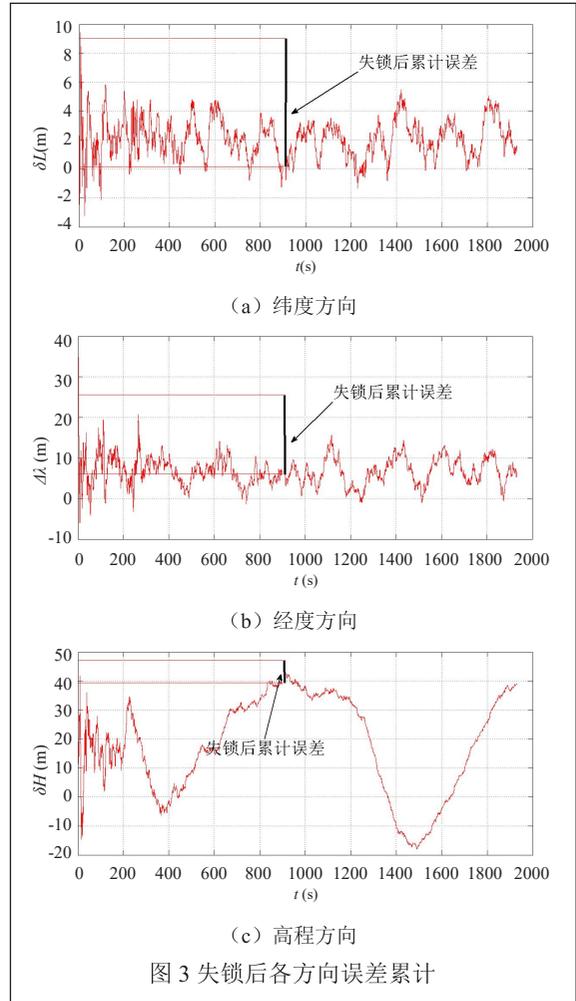
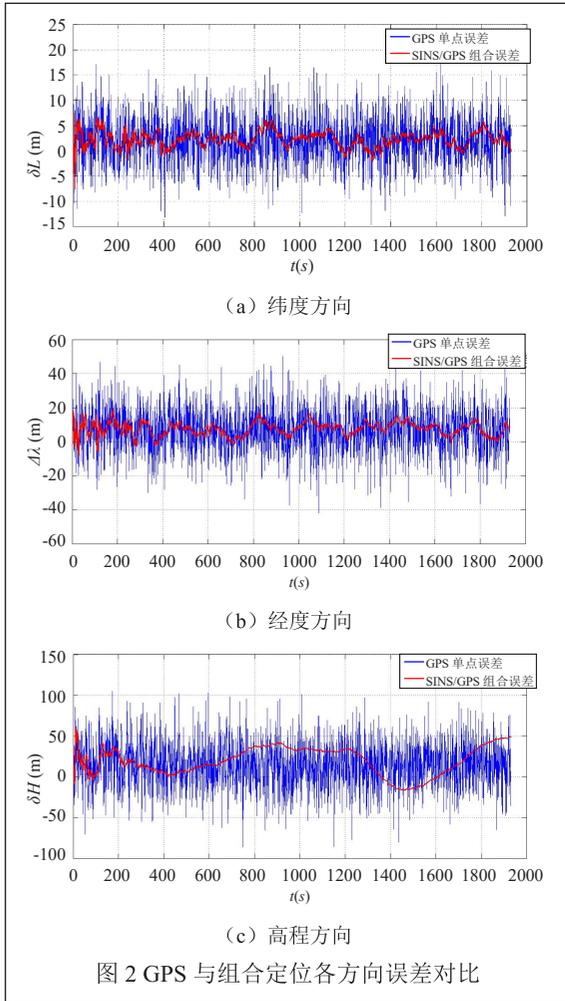
为了验证该方案的可行性, 在中南大学新校区进行了车载实验。实验中, 除了采集 SINS 和 GPS 数据, 还利用商用 GPS 接收机进行了 RTK 定位, 并以 RTK 数据作为车载的真实轨迹。SINS 和 GPS 的各项精度指标见表 1, 其中, GPS 定位中误差 (位置差分后) 由原始数据计算得出; SINS 加速度计零偏和 AHRS 航姿误差 (无干扰磁场时) 为 SINS 生产厂家提供值。

图 2 中蓝色和红色曲线分别显示了 GPS 定位误差和组合系统的定位误差, 可以看出组合系统的定位精度较 GPS 有了较大提高。为了验证在 GPS 短时间失锁的情况下组合系统的定位性能, 模拟 GPS 信号失锁 20 秒。图 3 显示了 GPS 失锁状态下组合系统的定位误差, 纬度方向约 9m, 经度方向约 20m, 高程方向约 7m, 加速度计零偏在线估计值 0.012g。

表 1 SINS 和 GPS 各项精度指标

GPS 平面	GPS 高程	加速度计零偏	姿态角
14.58m	30.37m	0.01g	3'

七、结语



低成本 SINS\GPS 组合导航较 GPS 导航定位误差明显降低, 原因是惯导的测量信息和滤波器的作用平滑了 GPS 定位误差。AHRS 易受磁场干扰, 航向角测量精度较低, 只能在较短时间内进行自主导航定位, 但在 GPS 短时间失锁或故障时仍然能发挥一定作用。

参考文献

[1] 周姜滨, 袁建平, 岳晓奎. 低成本 MIMU/GPS 组合导航系统设计与实验 [J]. 西北工业大学学报, 2007,25(2): 215-219.
 [2] 曹娟娟, 房建成, 盛蔚, 等. 低成本多传感器组合导航系统在小无人机自主飞行中的研究与应用 [J]. 航空学报, 2009,30(10):1923-1929.
 [3] 林雪原, 刘华章, 史佩. 一种低成本、低精度 SINS/GPS 组合导航系统及试验研究 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006,31(10):871-874.

[4] 冯绍军, 胡国辉, 袁信. 低成本 IMU/GPS 组合导航系统研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 1998,30(6):50-54.
 [5] 刘海涛, 段志勇. 低成本 INS/GPS 组合导航系统算法研究及其实现 [J]. 遥测遥控, 2003,24(2):36-41.
 [6] 刁鹏, 谢聂, 吴训忠. 低成本 MINS/GPS 组合导航系统的设计实现 [J]. 传感技术学报, 2009,22(9):1366-1370.
 [7] 曾丽丽. VB 通信编程技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2014.
 [8] 张涛, 徐晓苏, 刘晓东, 等. 不同动态条件下组合导航系统的时间同步 [J]. 中国惯性技术学报, 2012,20(3): 320-325.
 [9] 肖进丽, 潘正风, 黄声享. 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, 33(7):715-717, 743.
 [10] 严恭敏. 捷联惯导算法及车载组合导航系统研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
 [11] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 2 版. 西安: 西北工业大学, 2012.

A system solution for low cost SINS/GPS integrated navigation

HOU Kai-yu, LIU Qing-yuan, LU Xing-liang

(School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Low cost strapdown inertial navigation system(SINS), GPS hardware and corresponding integrated navigation algorithm are maturing, but simple and feasible system solutions are lack. A complete solution is designed for low cost SINS/GPS integrated navigation in this paper. First GPRS and TCP/IP communication-links are used to transmit GPS differential data in real-time for improving GPS positioning accuracy. The computer receives SINS/GPS data through serial port and synchronizes them with computer time. And then a simplified speed and position updating algorithm of SINS is given. Due to low cost SINS cannot determine heading angle, the attitude and heading information from included AHRS of SINS are adopted. Finally the Kalman filtering algorithm of combined navigation data fusion is introduced. With RTK positioning

data as reference true value , the vehicle experiments are carried out. The experiment results show that the integrated system is more stable and the positioning accuracy is improved obviously

Keywords: inertial navigation; integrated navigation; Kalman filter

作者简介

侯凯宇, 中南大学地球科学与信息物理学院, 硕士生, 研究方向为捷联惯性导航与组合导航。

通信地址: 湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号中南大学本部

邮编: 410083

邮箱: 739275645@QQ.com

刘庆元, 中南大学地球科学与信息物理学院, 教授, 博士, 从事大地测量与卫星导航数据处理、无人机影像处理与三维重建、3S 集成与应用的研究。

鹿星亮, 中南大学地球科学与信息物理学院, 硕士生, 研究方向为摄影测量。