

INS/GNSS/CSAC/高度计组合导航微系统硬件设计*

王 琮 聂宜召 王雪博 蒋张涛 辛增献

上海无线电设备研究所,上海 201109



摘 要 为了提高单一导航系统的定位导航与授时(PNT)服务性能,提出了一种基于惯性导航系统(INS)、全球卫星导航系统(GNSS)、芯片原子钟(CSAC)和高度计模块的组合导航系统硬件设计方案。阐述了各模块的工作流程及工作原理。为了验证设计可行性,进行了跑车实验,结果显示本设计具有较好的定位精度和导航性能。

关键词 组合导航;芯片原子钟;微系统;高度计

中图分类号:V249.3 **文献标识码:**A

文章编号:1006-3242(2022)03-0044-06

INS/GNSS/CSAC/Altimeter Integrated Navigation
Micro System Hardware Design

Wang Cong, Nie Yizhao, Wang Xuebo, Jiang Zhangtao, Xin Zengxian
Shanghai Institute of Radio Equipment, Shanghai 201109, China

Abstract In order to improve the positioning navigation and timing (PNT) service performance of a single navigation system, a hardware design of an integrated navigation system based on inertial navigation system (INS), global satellite navigation system (GNSS), chip atomic clock (CSAC) and altimeter module is proposed. The working process and principle of each module are described. In order to verify the feasibility of the design, a sports car experiment is implemented, and the results show that the design has good positioning precision and navigation performance.

Key words Integrated navigation; Chip atomic clock; Microsystems; Altimeter

0 引言

传统的导航系统如卫星导航系统、惯性导航系统、无线电导航系统、多普勒导航系统等,均存在着一些不足和缺陷,已无法满足现代人们的需求。大量研究和实践表明组合导航系统的导航性能要优

于单一导航系统。组合导航也已经成为当前研究的一项热门领域。

将惯性导航系统与卫星导航系统相组合可有效克服其各自的缺点,大幅提高导航系统整体的性能^[1]。文献[2-3]针对卫星信号易受干扰的问题,选择用芯片原子钟为卫星导航系统提供稳定、精确的频率信息,从而改善导航系统定位精度及定位稳

* 国防基础科研计划(JCKY2016606B004)

收稿日期:2021-05-12

作者简介:王 琮(1996-),男,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为组合导航。E-mail:2949359153@qq.com;聂宜召(1993-),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事微系统设计与研究;王雪博(1991-),男,硕士研究生,工程师,主要从事数字电路设计;蒋张涛(1991-),男,硕士研究生,工程师,主要从事嵌入式开发。辛增献(1978-),男,硕士研究生,研究员,主要从事信号与系统研究。

定性,进而降低卫星信号受干扰后对导航系统产生的影响。文献[2]中还利用卫星导航系统为芯片原子钟提供一个稳定的高精度秒脉冲信号,从而解决原子钟自身的时间误差累积问题。文献[4]针对卫星导航接收机受卫星分布影响导致的垂直精度低于水平精度的问题,提出了一种利用气压高度计抑制导航系统中高度误差和野值出现的方法。

基于以上背景及理论,本文以 INS、GNSS、CSAC 和高度计为基础构建一体化的组合导航微系统。跑车实验表明 INS/GNSS/CSAC/高度计组合导航微系统的导航性能要优于其中的单个导航系统,且抗干扰能力较强。

1 组合导航微系统工作原理

INS/GNSS/CSAC/高度计组合导航微系统的工作原理如图 1 所示。下面分别介绍图中 5 个主要模块的工作原理:

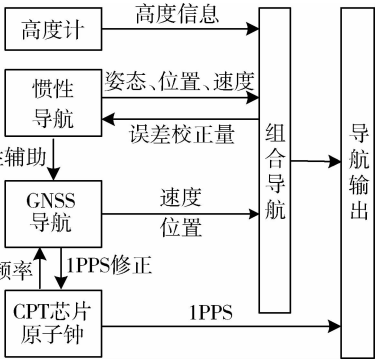


图 1 组合导航系统工作原理图

1) CPT 芯片原子钟:基于相干布局囚禁原理输出稳定的频率供 GNSS 接收机使用,可有效改善接收机的定位精度并使其环路更加稳定且不容易失锁^[5]。当用 GNSS 接收机输出的 1PPS 信号对芯片原子钟进行驯服,便可实现外秒同步功能。

2) GNSS 导航系统:利用天线接收太空中可见的卫星信号,并对这些信号进行数据处理,根据得到的数据对定位方程进行解算求出载体当前的位置、速度信息^[6]。

3) 惯性导航系统:在对陀螺和加速度计输出的数据进行补偿后,通过更新姿态矩阵和进行积分运算,求出载体当前在导航坐标系下的导航参数^[7]。GNSS 接收机可利用其输出的惯性信息改善自身的捕获及跟踪效果。

4) 高度计模块:利用气压传感器测量当前气压和温度,并进行必要的补偿及校准,最后通过气压高度转换公式求解载体当前的垂直高度信息。

5) 组合导航系统:收到各个子系统传来的导航信息后,会选择融合模型,匹配滤波策略,并进行故障检测,接着进行信息融合和信息分配,最后再对相关参数进行误差修正后,输出一个最优的导航结果^[8]。

2 组合导航微系统硬件设计

INS/GNSS/CSAC/高度计组合导航微系统主要由 DSP + FPGA 的组合导航信息处理板、微惯性测量单元、ARM + MS5611 的数字气压高度计模块和 CSAC 模块构成。为了尽量缩减系统的体积和功耗,系统采用模块化设计思路,整个组合导航微系统硬件设计如图 2 所示。

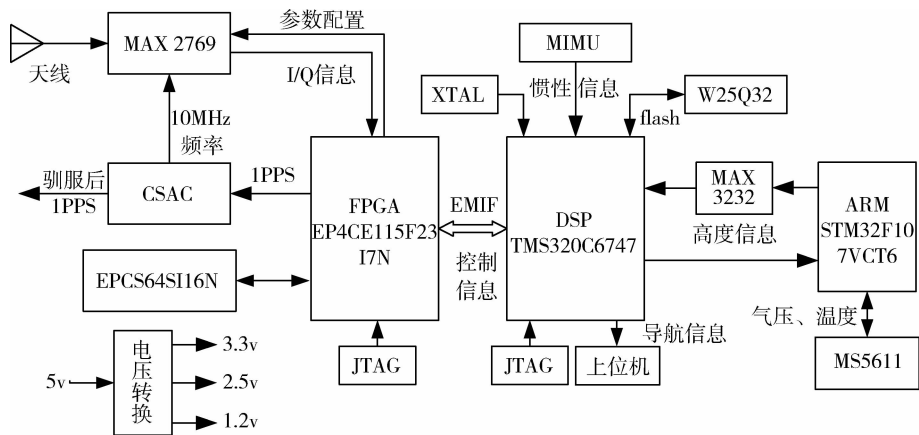


图 2 组合导航微系统硬件设计

$$f_{\text{GPScen}} = f_{\text{Li}} - 7857f_0 = 4.02\text{MHz} \quad (3)$$

根据采样频率和中心频率计算载波中心频率和码 NCO 中心频率。若要接收 BDS 信号,则要将 P_{NDIV} 设为 7785,将 P_{RDIV} 设为 50,BDS 射频信号分频 f_1 通过下式计算:

$$f_1 = \frac{f_{\text{CSAC}}}{P_{\text{RDIV}}} = \frac{10\text{MHz}}{50} = 0.2\text{MHz} \quad (4)$$

因为 BDS 的 B1 频点的载波频率为 $f_{\text{B1}} = 1561.098\text{MHz}$,那么可得 BO 的频率为:

$$f_{\text{BO}} = P_{\text{NDIV}} \times f_1 = 7785f_1 \quad (5)$$

进而中心频率为:

$$f_{\text{BDcen}} = f_{\text{B1}} - 7785f_1 = 4.098\text{MHz} \quad (6)$$

接着按 GPS 计算步骤算出相应参数,修改 NCO 的中心 M 值。经过计算和测试,若接收机接收的为 GPS 信号,则 FCARRCENTER 和 FCODECENTER 应设为 0x3374BC6A 和 0x1A305532,若是 BDS 信号则对应的参数应当设为 0x3474538F 和 0x3460AA65。

2.4 高度计模块设计

考虑到成本、体积和功耗,本次高度计选用 MEAS 的 MS5611-01BA 数字气压高度计,该款高度计量程为 10 ~ 1200hPa,分辨率为 0.012hPa,提供 IIC 和 SPI 两种接口方式。

由于单个高度计只能测量气压和温度,所以需要—个数字处理模块来对高度计的数据进行处理进而输出高度信息,考虑到 DSP 本身已有较多任务需要处理,所以选用意法公司的 STM32F107VCT6 作为高度计的数字处理器,该芯片价格低廉,接口资源丰富,满足设计需求。选用高度计的 IIC 接口进行通信,由于 STM32 上的固有的 IIC 接口并不稳定,所以用 STM32F107VCT6 上两个普通 GPIO 口模拟 IIC 与高度计进行通信。

在使用 MS5611 模块前,需要对其进行复位操作,因为本次选用 IIC 方式进行通信,模块的设备地址为 111011Cx,地址中的 C 是引脚 CSB 的补码值(取反),根据模块 CSB 引脚的硬件连线,可知地址为 0xEE。在复位完成后需要先读取 MS5611 模块的 PROM 中 C1 ~ C6 的值,然后进入转换模式,读取模块中的数字压力值和数字温度值,但是这个数值并不准确,所以要用模块内部的相关参数通过公式对压力值和温度值进行补偿,依据实际温度决定是否需要二阶温度补偿。

为了降低误差,将高度计模块初期采集的气压和温度的均值作为高度计系统初始化标定时的地面气压值和温度值。根据气压高度计计算公式,并

将相关常量代入,可得载体当前的高度值。此外在 DSP 收到高度计传过来的高度数据前,需要先根据卫星导航模块的收星数和 DOP 值判断卫星导航模块的工作状况,在状况良好的情况下将此时的卫导解算出的高度信息传给高度计模块,用于校正初始高度,之后再用高度计的数据进行修正处理。高度计系统工作流程图如图 5 所示。

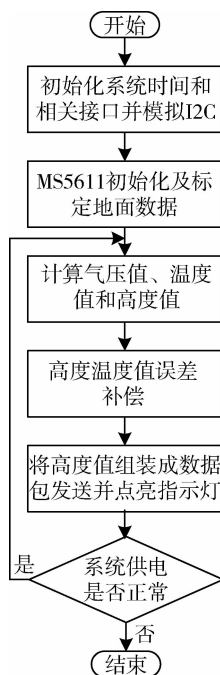


图5 高度计系统工作流程图

3 实验测试

为了验证 INS/GNSS/CSAC/高度计组合导航系统设计是否合理,在相关的软件算法烧录进样机后,将样机搭载在实验车上并选择一条较为空旷的城市路段进行跑车实验,跑车实验线路如图 6 所示。



图6 跑车实验路线图

在试验中,实时采集 INS/GNSS/CSAC/高度计

组合导航系统中的单接收机数据、组合数据、高度计数据以及分体式闭环光纤组合导航系统 SPAN-KVH1750 的数据,并以 SPAN- KVH1750 的数据为基准。利用 MATLAB 对采集的试验数据进行处理。位置误差与速度误差如图 7 ~ 12 所示,图中实线表示 INS/GNSS/CSAC/高度计组合导航系统的组合数据与 SPAN- KVH1750 的误差,虚线表示组合导航系统中卫星导航模块定位的数据与 SPAN- KVH1750 的误差,点画线表示组合导航系统中高度计模块与 SPAN- KVH1750 的高度误差。

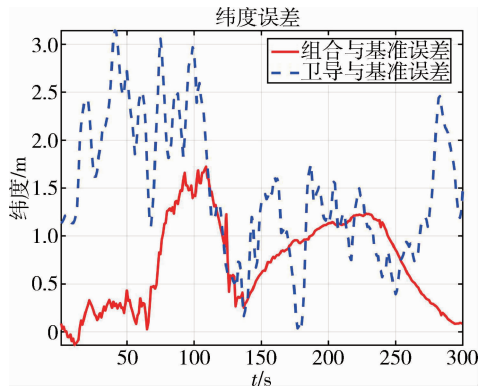


图 7 纬度误差对比

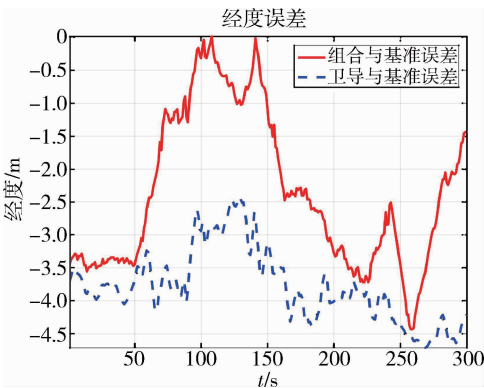


图 8 经度误差对比

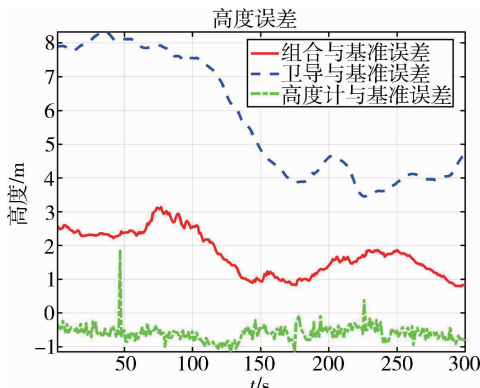


图 9 高度误差对比

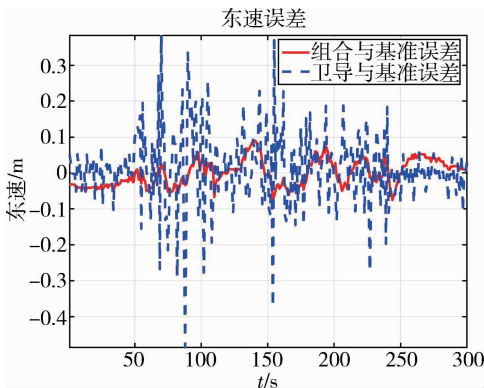


图 10 东向速度误差对比

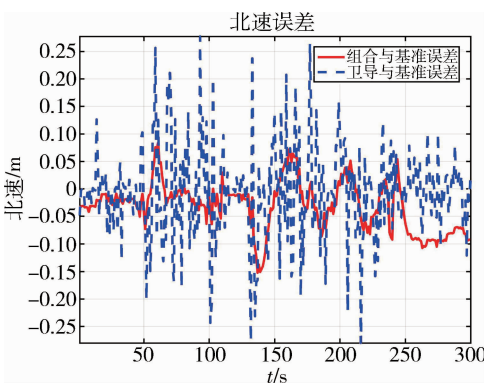


图 11 北向速度误差对比

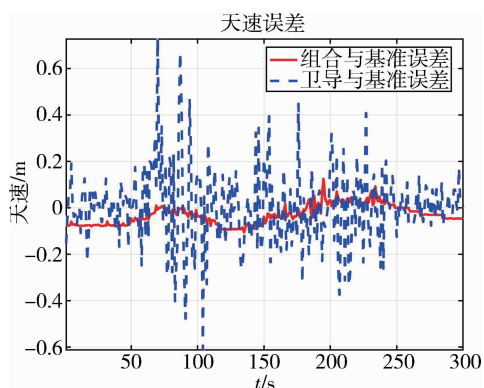


图 12 天向速度误差对比

计算得到组合后均方根误差:纬度误差为 0.86m,经度误差 2.63m,高度误差 1.88m,东向速度误差 0.03m/s,北向速度误差 0.05m/s,天向速度误差 0.05m/s,组合后导航系统的定位精度要优于系统中单卫星的定位精度。由图 9 可知导航系统中的高度计模块输出的高度信息较为准确。此外系统中各个模块运行稳定,导航效果较好,达到设计预期。

4 结束语

提出了一种 INS/GNSS/CSAC/高度计组合导航微系统的设计方案,基于模块化设计思路,完成组合导航系统中各模块的硬件选型及设计,该组合导航系统具有体积小、功耗低等优点。经过实验验证:该组合导航系统能在较为复杂的环境下为用户提供较为准确的导航信息。系统在智慧城市、交通运输、农林渔业等方面均具有较好的发展前景。

参 考 文 献

- [1] 牛小骥,班亚龙,张提升,等. GNSS/INS 深组合技术研究进展与展望[J]. 航空学报, 2016, 37(10): 2895-2908. (Niu Xiaoji, Ban Yalong, Zhang Tisheng, et al. Research progress and prospect of GNSS / INS deep combination technology [J]. Aviation Journal, 2016, 37 (10): 2895-2908.)
- [2] 顾得友,陈帅,温哲君,等. 芯片原子钟对 SoC 北斗导航接收机定位精度影响[J]. 导航与控制, 2021, 20(1): 44-50. (Gu Deyou, Chen Shuai, Wen Zhejun, et al. Influence of chip atomic clock on positioning accuracy of SOC Beidou navigation receiver[J]. Navigation and Control, 2021, 20 (1): 44-50.)
- [3] 刘洋,李四海,付强文,等. 芯片级原子钟辅助的惯性/卫星组合导航系统欺骗检测方法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(5): 654-660. (Liu Yang, Li Si-hai, Fu Qiangwen, et al. Deception detection method of inertial / satellite integrated navigation system assisted by chip level atomic clock[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2019, 27 (5): 654-660.)
- [4] 刘善武,陈帅,谭聚豪,等. 一种辅助 GNSS/INS 组合导航系统的高度计设计[J]. 航天控制, 2019, 37(5): 75-80. (Liu Shanwu, Chen Shuai, Tan Juhao, et al. Design of auxiliary GNSS / INS combination navigation system[J]. Aerospace Control, 2019, 37 (5): 75-80.)
- [5] 李松松,张奕,田原,等. 芯片原子钟的工作原理及其研究进展[J]. 导航与控制, 2018, 17(6): 10-15 + 41. (Li Songsong, Zhang Yi, Tian Yuan, et al. The principle of working principle and research in chip atomic clocks[J]. Navigation and Control, 2018, 17 (6): 10-15 + 41.)
- [6] 薛涛,赵伟,李荣冰,等. 北斗导航接收机的硬件设计与实现[J]. 航天控制, 2015, 33(1): 94-98. (Xue Tao, Zhao Wei, Li Rongbing, et al. Hardware design and implementation of Beidou navigation receiver[J]. Aerospace Control, 2015, 33 (1): 94-98.)
- [7] 侯振环. 基于 MEMS 惯性器件的 SINS/GPS 组合导航系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. (Hou Zhenhuan. Research on SINS / GPS combination navigation system based on MEMS inertial devices[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [8] 谭聚豪,陈安升,张博雅,等. 基于联邦滤波的多源融合导航算法[J]. 导航与控制, 2020, 19(2): 10-18. (Tan Juhao, Chen Ansheng, Zhang Boya, et al. Multi-source fusion navigation algorithm based on federal filtering[J]. Navigation and Control, 2020, 19 (2): 10-18.)
- [9] 孙昭行. 定位导航授时微系统硬件设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2018. (Sun Zhaohang. Design of the microsystem hardware design of positioning navigation [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2018.)
- [10] 杨阳. 基于 FPGA 和 DSP 的 GNSS 软件接收机设计[D]. 南京: 东南大学, 2017. (Yang Yang. Design of GNSS software receiver based on FPGA and DSP[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.)
- [11] 陈帅,蒋长辉,付梦印,等. 一种 GNSS/SINS 容错深组合导航系统设计[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(1): 77-80. (Chen Shuai, Jiang Changhui, Fu Mengyin, et al. Design of a GNSS/SINS fault-tolerant deep integrated navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(1): 77-80.)