

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108076

基于FPGA与DSP的INS/BDS组合 导航数据精确对准方法*

纪志敏 李杰 胡陈君 张泽宇 王帅 李炳臻
(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: INS/BDS组合导航数据来源于不同的分系统,而不同系统之间在硬件和软件方面的因素都会导致系统间数据不同步,影响最终组合导航精度。可见在组合导航的应用中数据对准非常重要。针对这一问题,采用FPGA+DSP小型导航解算平台实现INS/BDS组合导航数据对准的方法。将BDS接收机的1PPS所激发的可调脉冲作为中断,通过FPGA主控芯片的控制实现对惯性传感器以及卫星导航模块的数据采集编帧和计时,然后由DSP实现对时延误差的计算以及外推拟合补偿,从而达到INS/BDS实时数据同步对准的目的。多次试验对比表明,该方法能够将位置精度提高50%左右,能够达到并且完成数据对准的要求,有一定的工程应用价值。

关键词: INS/BDS;组合导航;数据同步;嵌入式平台;FPGA;DSP

中图分类号: TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

Data alignment method based on FPGA and DSP in INS/BDS integrated navigation system

Ji Zhimin Li Jie Hu Chenjun Zhang Zeyu Wang Shuai Li Bingzhen
(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: INS/BDS integrated navigation data comes from different subsystems, but the hardware and software factors between different systems will lead to data synchronization between the systems, which will affect the final integrated navigation accuracy. It can be seen that data alignment is very important in the application of integrated navigation system. Aiming at this problem, a INS/BDS integrated navigation data alignment method is realized by using FPGA+DSP small navigation solution platform. The adjustable pulse excited by 1PPS of BDS receiver is used as interrupt, and the inertial sensor and satellite navigation module are captured and framed by FPGA control chip. Then the delay error is calculated and compensated by DSP, so as to achieve the synchronous alignment of INS/BDS real-time data. Experimental results show that this method can improve the position accuracy by about 50%, and can meet the requirements of data alignment, which has certain engineering application value.

Keywords: INS/BDS;integrated navigation;data synchronization;embedded platform;FPGA;DSP

0 引言

由纯惯性导航系统(INS)以及北斗卫星导航系统(BDS)组合的导航系统在保留了INS系统其自主性和隐蔽性的优点的基础上^[1-3],同时又弥补了其原本纯惯性导航的弊端,因此,INS/BDS组合导航系统的应用得到了极大的推广,其主要工作原理是利用卡尔曼滤波的方法将惯导信息及BDS信息结合起来,滤波后得到一组状态信息包含如

位置、速度、姿态、陀螺漂移、加速度计零偏、钟差等相关信息的最优估计值^[4-6],并将其反馈回INS系统进行校准。所以在实际系统的设计考量中,必须确保来自各分系统的数据及时间同步对准^[7-8]。至今为止已有非常多的学者针对这一问题提出不同的解决方法,其中丁贝^[7]是将DSP作为导航解算的核心,达到对惯性数据和BDS数据的同步采集,但是却忽略了BDS数据本身数据量以及传输速率的影响;还有一种较为常用的方法是利用软件补偿的方法,丁继

收稿日期:2021-10-12

*基金项目:国家自然科学基金(61973280)项目资助

成等^[8]通过中断计时获取二者数据更新时间的时间差,对数据进行外推拟合计算,但是这一方法对于处理器的要求较高,内部计算时间增加。由此可见,无论是软件还是硬件都存在不可避免的弊端。本文通过分析系统数据不同步产生因素及其应用环境,设计了一个小型组合导航系统平台,在多处理器并行基础上利用软硬件结合的方法进行数据同步处理,通过进行多次的车载试验验证了设计方案的可行性。

1 影响数据同步的主要因素

组合导航在实际应用中,由于不同分系统之间存在硬件以及内部处理器性能等多方面的差异,在应用过程中很难能保证不同系统同时上电,除此之外数据更新频率、传输延时等也是造成数据无法达到同步对准的因素^[9-11],因此在实际的组合导航系统中,研究多路数据精确对准技术十分重要。以下几点列出了从硬件设计和软件设计两方面综合考虑导致数据异步的因素:

1)时间基准不同:加速度计和陀螺仪组成的惯导系统与BDS是相互独立的分系统,其对应时间系统、时间基准都不一致^[12-13]。

2)各分系统数据信息输出有差异。

3)电路延时:在电路板中,测量、数模转换、采样、数字量信息串行输出以及编帧等过程中均会产生时延,这样就会导致INS数据和BDS信息传输过程中存在无法忽略的时间误差^[14-16]。

4)各信息源数据更新频率不一致^[17]。

2 硬件结构

2.1 硬件电路设计

依据组合导航的基本工作原理,工作平台需要对惯性传感器以及BDS数据进行采集、时序控制,除此之外处理器需要在非常短的时间内完成大量的计算,所以对于主控芯片自身的处理能力具有极高的要求。如图1所示,采用FPGA和DSP多处理器并行完成导航计算平台工作,极大地提高了工作效率。

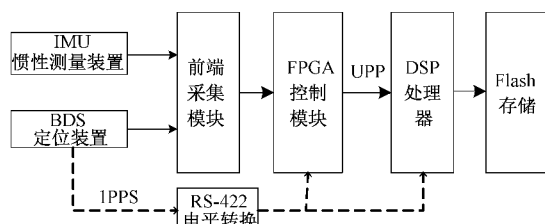


图1 系统总体硬件设计图

2.2 数据采集

系统所采用的卫导模块采用的是数字量输出,通过RS-422协议输出相关数据信息以及脉冲信号,FPGA采集通过MAX3490电平转换芯片转换得到的TTL电平信号,

而脉冲信号则分别传到FPGA以及DSP,作为其时间基准。惯性数据的采集由16位6通道的ADS8365转换芯片进行同步并行采样。其同步传输通过JESD204B高速串行接口完成,能够确保多通道数据高效准确传输以及传输过程中的时延稳定。在两个模块的数据采样转换完成后按照一定的数据协议利用8B10B编码对并行数据进行分类编帧处理,这样的方式不仅能够保证数据的高速处理,而且极大地减少了资源占用率。

FPGA将编好帧的原始数据通过DSP的外设接口UPP通道以2ms一帧的速率并行发送给DSP进行组合解算,因为BDS数据的更新速率为100ms,所以为了匹配两个处理器之间数据的通信速率,在FPGA内部需要建立一个120字节的缓存来缓存BDS数据,并增加对应的更新标志字,在数据未更新时传输缓存内的数据。DSP解算完成之后再以相同的速率传输到FPGA,并存储在Flash芯片中,以便后续进行数据读取分析。

3 软件控制

3.1 数据编帧

由于传统的数据同步方法对于硬件设施本身的要求比较高,较难实现所以本设计中选择了从软件方面着手,运用软件开发优势来实现对INS/BDS组合导航系统的数据同步对准,本设计选择的卫星导航模块的秒脉冲接口区别于常见秒脉冲接口的是,脉冲输出频率与系统中BDS数据的更新周期保持一致为10Hz,脉冲宽度为2ms,这样就可以将秒脉冲的上升沿时刻作为BDS数据的更新时间。在进行数据编帧是以MEMS陀螺仪数据的输出更新频率同时作为PPS和BDS的编帧周期,这里是1ms,与此同时PPS与惯性数据的更新频率误差是远远小于1ms的,这一数值与BDS数据的传输误差相比而言完全可以忽略。此时就可以认为PPS与惯性数据是几乎同步对准的,具体编帧格式如图2所示。当FPGA未检测到BDS采集完成标志字时,数据保持不变,此时BDS更新标志字为0x00;而当FPGA检测到采集完成标志字时,BDS数据更新,同时更新标志字变为0x01。同理,在检测PPS是否更新有效时,FPGA采取同样的编帧方法,在检测到PPS上升沿的时候,更新标志字将变为0x01,否则保持不变。

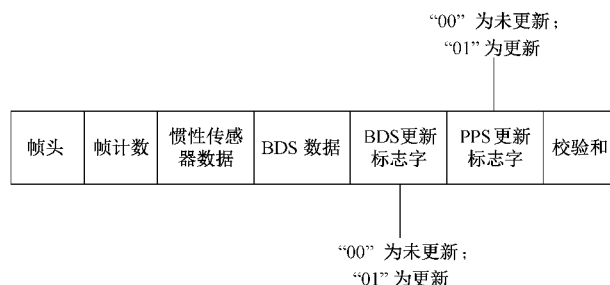


图2 具体数据编帧格式

为保证数据在传输过程中的可读性与连续性,在编帧过程中加入帧头、帧计数和校验和。

3.2 时间误差获取及同步

本次设计中认为 PPS 与惯性数据是已经对准的,那么导航解算模块仍然需要得到 INS 数据与卫导数据的延时误差,才能进一步实现 INS 数据与 BDS 数据的同步对准。这一部分由 DSP 解算完成,在 FPGA 主控完成整体数据编帧后,经过二者所连接的通用并行端口将数据以 2 ms 每帧的频率导入 DSP 芯片中,DSP 将传输数据通过 DMA I 通道存入 DSP 内存中。BDS 数据在实际情况下通过串口传输到 FPGA 中时会由于数据量较大以及串口传输速率的限制,产生一定的传输延时,在高动态环境下造成较大的导航误差,所以 PPS 更新标志字和 BDS 更新标志字不可能同时有效,那么可以推出其可能出现的排列组合方式就只有 3 种情况:

- 1) PPS 更新有效, BDS 更新无效;
- 2) PPS 更新无效, BDS 更新有效;
- 3) 二者同时无效。

为了补偿由于卫导数据传输延时造成的误差,将 1PPS 作为中断触发信号接入 DSP 模块中,当 DSP 在检测到 PPS 更新标志字为 0x01 即认为此时 PPS 有效时,DSP 内部的计数器便开始计时,直到检测到 BDS 更新标志字为 0x01 即 BDS 数据更新时,将所得到的值存到对应变量中,计数器清零并停止工作,即完成了 INS 与 BDS 数据时间差 Δt 的捕捉工作,因为 DSP 内部的计数器是高精度的,所以可以认为得到的时间是非常准确的。

图 3 所示为实际组合导航系统运行中 INS 数据信息及 BDS 数据信息更新同步解析图, t_0 对应 BDS 模块 1PPS 脉冲上升沿, t_1 为 FPGA 对 PPS 的编帧时刻, t_2 为 DSP 检测到 1PPS 的更新时刻,则 $\Delta\tau = t_2 - t_1$ 为 FPGA 与 DSP 数据传输过程中的延迟时间, t_3 为 FPGA 接收一帧完整的 BDS 数据的时刻, t_4 为 DSP 检测到 BDS 数据更新的时刻。

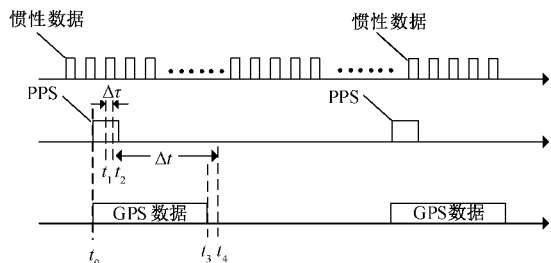


图 3 INS/BDS 数据更新同步示意图

由图 3 可知,INS 数据与卫导数据的时间误差为 $\Delta t = t_4 - t_2$,如果忽略 1PPS 在 FPGA 内部采样时间以及 FPGA 与 DSP 之间的数据传输时间,则可以近似地认为 t_4 时刻 DSP 接收到的 BDS 数据是 t_2 时刻定位数据,所以需要将这一时刻的 INS 数据与卫导数据进行滤波融合处理,但是由于组合导航系统在这个时间范围内已经进行了多次的纯惯

性解算,为了确保最终解算结果的实时有效性,必须对 t_4 时刻 DSP 接收到的 BDS 数据加以补偿,由于短时间内的纯惯性导航基本可以保持较高的精度,因此可以利用 Δt 时间内惯导解算的位置、速度增量对 BDS 的位置、速度信息进行外推补偿,外推算法如式(1)和(2)所示。

$$\Delta_{INS} = X_{INS}(t_2 + \Delta t) - X_{INS}(t_2) \quad (1)$$

$$X_{GPS}(t_2 + \Delta t) = X_{GPS}(t_2) + \Delta_{INS} \quad (2)$$

4 实验验证

为了验证以上分析的数据同步对准方案对于提高组合导航定位精度的可应用性与可靠性,在惯性数据已经高度同步的基础上,将设计完整的 INS/BDS 组合导航解算平台固定在安装有高精度定位母惯导系统的试验车上,以该系统为基准进行地面车载试验。本试验在 BDS 收星状况良好时进行多次组合导航车载试验。为了对比不同分系统数据在同步与不同步的情况下对组合导航解算结果精度的影响,选择两块功能性能最为接近的解算板卡分别与同一个 IMU 以及 BDS 模块连接测试,其中一块导航解算板卡没有对 IMU/BDS 数据进行同步处理,另一块则加入了本文提出的同步处理方法,多次试验后选择其中一组试验数据进行分析对比。组合导航之后的位置以及位置误差对比如图 4(a)、(b)所示。

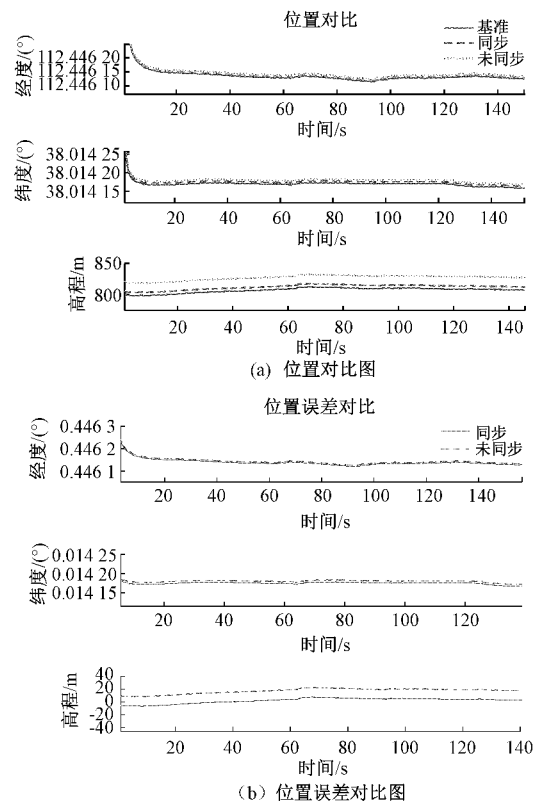


图 4 数据同步前后位置信息对比图

图 4(a)、(b)是其中一组车载组合导航试验之后的位置以及位置误差对比情况,可以看到对于做了数据及时

间同步补偿处理的系统,其组合导航解算之后的三向位置的精度都有显著提高,误差明显减小,与高精度母惯导所测得结果相比,采用本文所提的同步对准方法之后测试结果更为接近。数据同步前后位置参数误差最大值对比如表1所示。

表1 组合导航位置参数对比 m

导航参数	未使用数据 同步技术	使用数据 同步技术
东向位置误差	12.736 1	6.186 7
北向位置误差	7.682 4	5.785 3
天向位置误差	15.555 9	6.002 4

由表1中数据可以看出在进行数据同步之后,组合导航定位精度有明显提高,可以证明本文提出的这一数据同步方法对于提高INS/BDS组合导航系统的精度有很大的帮助,具有一定的工程应用价值。

5 结 论

本文提出的基于FPGA+DSP的导航解算平台的软硬件结合的数据同步方法,在惯性传感器数据精度很高且已经完成多路数据同步的基础上,解决了INS与BDS分系统之间由于数据更新率、硬件电路延时等因素带来的时间同步误差,将1PPS同时引入FPGA和DSP中断触发获取惯性数据与BDS数据的时间同步误差,采用外推拟合的方法补偿了BDS数据由于串口传输而引起的时延误差,基本实现了INS/BDS的实时数据同步输出。这一方法可推广应用于智慧消防、无人机以及箭载等多场合,具有较高的工程应用价值,可满足较高精度的组合导航系统时间同步需求。但是文中对于其可行性的验证是通过多次地面车载试验进行的,未来可以进一步在实际箭载或消防等应用环境中进行试验,验证其稳定性及可应用性。

参考文献

- [1] 杜瑾,李杰,罗丹瑶,等.高动态GPS/INS组合导航中时间延迟软硬件补偿算法研究[J].传感技术学报,2016,29(12):1858-1863.
- [2] 高宁,李杰,胡陈君,等.弹载SINS/GPS组合导航系统数据采集与同步设计[J].中北大学学报(自然科学版),2020,41(1):55-59.

- [3] 张提升. GNSS/INS 标量深组合跟踪技术与原型系统验证[D]. 武汉:武汉大学,2013.
- [4] 刘斌. 传递对准与组合导航滤波器优化设计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [5] 孔超. MINS/GPS/ADS 组合导航系统实现关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
- [6] 许廷金. 基于 TMS320C6748 的弹载组合导航系统硬件平台设计与实现[D]. 太原:中北大学,2019.
- [7] 丁贝. 基于 1pps 的 GPS/INS 组合导航系统数据同步方法[J]. 海峡科技与产业,2016(12):91-92.
- [8] 丁继成,吴谋炎,赵琳,等. 基于嵌入式平台的 GNSS/INS 组合导航时间同步方法研究[J]. 遥测遥控,2016,37(3):15-22.
- [9] 李炳臻. 箭载高精度伞降测控系统设计与实现[D]. 太原:中北大学,2021.
- [10] 陈克振. 嵌入式 GNSS/SINS 超紧组合导航系统的设计与实现[D]. 南京:南京理工大学,2017.
- [11] 李慧霞. 多传感器组合的室内定位方法研究[D]. 南昌:南昌大学,2020.
- [12] 张国强,鲁昌华,李燕,等. 小波变换与改进 Kalman 在北斗/SINS 组合导航中的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(7):65-71.
- [13] 范时伟. TC-OFDM 与 INS 组合导航方法的研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2019.
- [14] 付廷强. 基于 GNSS/IMU/视觉多传感融合的组合导航定位算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [15] 段睿. GNSS/SINS 实时组合导航系统设计与关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2019.
- [16] 朱晓晗. 弹载捷联惯性/卫星组合导航技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2019.
- [17] 王艳,高嵩,马天力,等. 基于变分贝叶斯理论的 GPS/INS 组合导航系统[J]. 国外电子测量技术,2019,38(11):5-10.

作者简介

纪志敏,硕士研究生,主要研究方向为惯性导航与数据传输处理。

E-mail:18235148187@163.com

李杰,教授,主要研究方向为导航、制导与控制研究及智能信息处理。

E-mail:Lijie@nuc.edu.cn