

Design Technology of Integrated Navigation System Based on Fiber Optic Inertial Navigation

Hongjiang Xu

Qingdao Jereh Automation Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266101, China

Abstract

The paper designs an integrated navigation system based on fiber optic inertial navigation, which realizes the three-axis orthogonality design of six inertial sensitive devices. The integrated navigation system is designed by integrating high-precision A/D acquisition modules into the integrated navigation computer. The integrated navigation computer adopts a mature DSP+FPGA architecture, which delegates the data exchange task between the system and peripherals to FPGA logic, DSP is used for navigation and filtering algorithms, improving data processing efficiency. This dual processor master-slave architecture design method is convenient and fast for engineering implementation, and achieves the integration of inertial measurement and navigation with the smallest circuit size. It has good application prospects and significant military significance in the field of precision guidance control.

Keywords

fiber optic gyroscope; integrated navigation; Kalman filtering

基于光纤惯导的组合导航系统设计技术

徐宏江

青岛杰瑞自动化有限公司, 中国 · 山东 青岛 266101

摘 要

论文设计了基于光纤惯导的组合导航系统, 实现6只惯性敏感器件三轴正交性设计, 并通过组合导航计算机集成高精度A/D采集模块方式, 实现组合导航集成系统设计。组合导航计算机采用成熟DSP+FPGA架构, 将系统与外设的数据交换任务交由FPGA逻辑实现, DSP用于导航及滤波算法, 提高了数据处理效率。这种双处理器主从架构设计方法, 工程实现方便、快捷, 用最小的电路规模实现惯性测量及导航一体化的设计, 在精确制导控制领域具有良好的应用前景和重大军事意义。

关键词

光纤陀螺; 组合导航; 卡尔曼滤波

1 引言

组合导航系统经过多年的发展, 已形成系列化产品, 满足于各类军用特殊领域使用需求, 其自主性、精确和快速的定位定向导航性能, 在提高部队的协同作战能力, 单兵快速反应能力、精确打击能力方面正发挥越来越大的作用和意义。

近十几年来, 光纤陀螺技术突飞猛进, 其特有的工作原理和相对简单的结构组成, 决定了它在精度、可靠性、环境适应性、功耗、重量、体积、成本等诸多方面具有先天的优势。中国光纤陀螺中低精度已经实现工程化, 中高精度取得了快速发展, 为研制高精度光纤惯导系统提供了技术保障^[1]。

根据技术方案不同, 导航系统大体可分为两类: 一是平台式, 一般采用高精度机械陀螺和加速度计构成三轴机

械平台式惯导系统, 并采用零速修正技术, 抑制误差发散, 提高定位定向精度, 如法国的 ULISS30, 以及我国 618 所、707 所、33 所研制的高精度惯导, 目前大多应用于需要高精度定位定向场合。二是捷联式, 多采用光纤陀螺与加速度计, 利用导航计算机解算实现数学平台, 在实际使用中一般以捷联惯导信息为主, 同时结合 GPS、里程计信息等, 通过卡尔曼滤波技术实现最优导航信息输出, 如法国的 SIGMA30 惯性定位导航装置等。捷联惯性导航系统 (SINS) 具有自主性、信息的完备性等优势, 组合导航技术其中一个比较热门的研究方向是: GNSS 卫星导航 +SINS 惯性导航组合, 利用卫星导航瞬时高精度定位优势, 以及惯性导航短时间数据连续漂移误差小优势, 经过数据融合, 实现高精度导航定位, 此种 GNSS+SINS 信息融合方式在组合导航领域有着非常重要的地位。

2 总体架构设计

组合导航系统中的光纤陀螺和石英挠性加速度计负责

【作者简介】徐宏江 (1988-), 男, 中国云南宣威人, 本科, 工程师, 从事惯性制导与控制研究。

敏感沿导弹弹体坐标系三个轴上的角运动分量及线运动分量。导航计算机负责惯性测量数据采集、补偿算法、BD/GPS 信息接收、组合导航算法融合实现和接口管理等功能。

组合导航系统用捷联惯性导航为主架构的定位定向组合导航系统方案,以三个光纤陀螺和三个石英加速度计为敏感器件,构成惯性测量组件(IMU),选用公司成熟北斗定位模块 DXN2101,运用 FPGA 处理电路、DSP 处理电路进行信号采集、控制及导航计算,实现自主对准、卡尔曼滤波信息融合、导航输出等功能。系统有自主导航、组合导航两种工作模式,可工作在复位、自检、装订、对准、导航等工作状态。图 1 为组合导航系统总体架构图。

导航计算机作为数据采集与处理中心,一方面采集光纤陀螺仪组件及石英挠性加速度计敏感的弹体运动参数,根据导航力学编排完成误差补偿预处理计算出角速度、角度增量、视加速度、速度增量及温度数据;另一方面接收 BD/GPS 信息,按照组合导航信息融合算法实现载体姿态、速度、位置信息的更新,最后按照对外接口通讯协议要求,输出组合导航定位信息^[2]。

3 组合导航系统设计

光纤陀螺作为新一代的实用惯性元件,其构成的捷联系统与平台系统相比,省去复杂的机械平台部分,系统成本得到明显的降低,系统的可靠性和可维修性也大大提高。同时,光纤陀螺所具有的快速启动、标度系数稳定、抗强冲击振动等自身固有的特点,使其特别适合于高精度导航领域使用。

北斗定位系统是中国完全自主研制的卫星导航定位系统,2000 年建成北斗一号系统;2012 年建成北斗二号系统;2020 年建成北斗三号系统,为全球用户提供高精度的定位、

导航和授时服务,已经成熟应用在海上北斗高精度卫星定位、海洋动平台高精度水面水下定位、海上平台安全监测、海上应急救援以及海上立体观测等方面。

捷联惯性导航系统(SINS)不受外界干扰影响,具备较好的自主性、信息的完备性等优势,在军事导航领域有着非常重要的地位,但捷联惯性导航系统由于精度高本身存在着成本高、误差积累等缺点。随着电子技术的快速发展,采用高性能导航计算机将卫星导航与惯性导航进行实时数据采集和信息融合,充分发挥各自的优势,获得较高的导航定位精度,是未来高精度导航定位的一个重要发展方向。

目前,对于 GNSS、SINS 组合导航系统的研究内容比较多,主要集中在组合方式和数据处理方法两方面^[3]。在信息融合方式上,根据不同导航设备间组合的深度划分,可分为三种组合方式:松组合、紧组合、超紧组合。

松组合方式是卫星导航和惯性导航,两种设备间的物理融合,通过合理的结构和电气设计,实现两设备的信息交互,再通过组合导航计算机完成 GNSS 接收机的数据实时校正 SINS 信息,校正系统间部分偏差,达到消除惯导系统误差积累的目的。这种方式工程实现较简单,两设备独立工作,信息融合技术难度不大,但是导航定位精度性能提升有限。

紧组合方式是利用惯导输出的位置和速度信息来估计 GNSS 的伪距和伪距率,与 GNSS 输出值相比较,用差值构造观测方程进行组合,也可将惯导的数据引入接收机内部辅助接收机工作,可以提高接收机的抗干扰性和动态性能^[4]。由于紧组合需要设计接收机的内部编排,实现较为复杂,目前国内对紧组合的研究经过近几年的发展,已取得部分成果。其他国家对紧组合系统研究起步较早,产品已经得到大量应用,如美国的联合制导攻击武器(JDAM,杰达姆)。

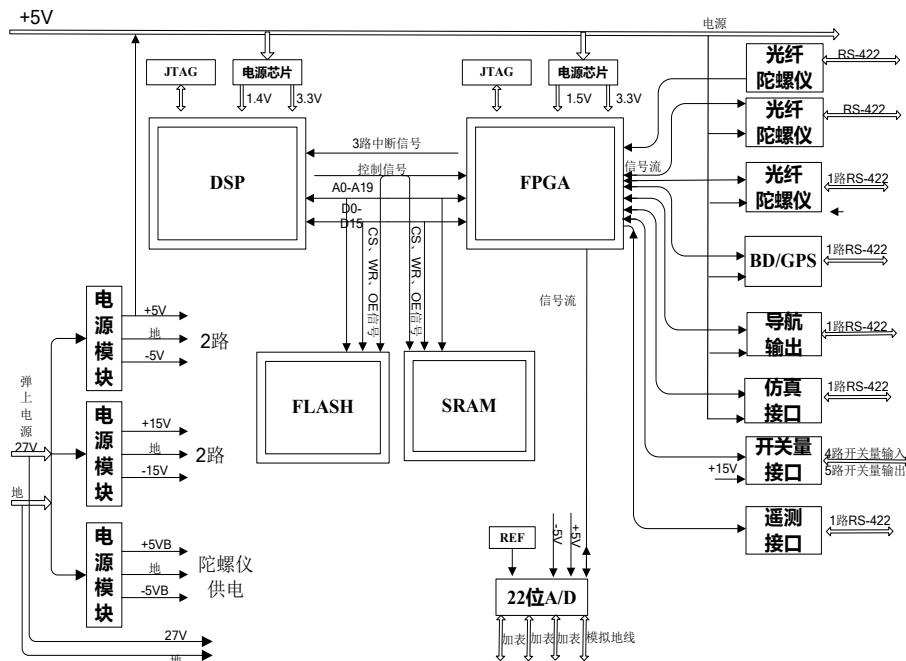


图 1 组合导航系统总体架构图

超紧组合方式目前还处于理论研究阶段,实际运用复杂,技术难度较大,未大面积推广。其核心是惯导信息辅助卫星导航接收机的跟踪环,在惯导的辅助下,利用接收到尽可能多的卫星信息来提高滤波修正的精度,改变了传统接收机的内部结构,在高动态、卫星信号中断等特定环境条件下仍能实时高精度导航定位。在数据融合处理方法上,初期采用标准的卡尔曼滤波算法实现,后期随着组合导航系统复杂度的不断提高,导航系统向着高维数、非线性系统方向延伸,逐渐发展到其他非线性滤波方法,目前存在的有扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波、粒子滤波等处理方法,组合导航系统的矩阵维数增加了,同时算法的复杂度同步提升,导航定位精度变得更好。

卡尔曼滤波是一种递归的滤波算法,它通过线性系统状态方程和观测方程,结合系统的输入输出观测数据,对系统状态进行最优估计^[5]。卡尔曼滤波的本质是一种线性最小方差估计,与传统的最小二乘估计、最小方差估计、极大验后估计、贝叶斯估计、极大似然估计相比,卡尔曼滤波有较好的递归性和高效性,非常适用于均方差方面的数学统计。它存在以下技术优点:

①递归算法,不需要占用大量的 CPU 存储原始数据的空间,利用资源空间小。

②时域设计算法,通过一种状态空间法描述惯导系统,多维的平稳和非平稳的随机过程均能较好地实现数据处理。

③离散型或连续性算法,数据离散后可以直接在计算机上实现,方便快捷。因此,卡尔曼滤波算法在各个领域的工程实践中均有着广泛的应用。

卡尔曼滤波算法主要分为两步:预测和更新。

①在预测时,计算机运行算法,完成使用状态转移矩阵和控制输入矩阵来预测下一时刻的状态。

②在更新时,计算机根据观测数据和预测状态来评估卡尔曼增益值,并利用卡尔曼增益来更新状态估计。

假设 t_k 时刻,组合导航系统被估计状态 X_k ,受信号系统噪声 W_{k-1} 影响,状态方程为公式(1):

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1} \quad (1)$$

对 X_k 的量测满足线性关系,量测方程公式为公式(2):

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (2)$$

W_k 和 V_k 满足公式(3)和(4):

$$E[W_k] = 0; \quad \text{Cov}[W_k, W_j] = E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_j \quad (3)$$

$$E[V_k] = 0; \quad \text{Cov}[V_k, V_j] = E[V_k V_j^T] = R_k \delta_j$$

$$\text{Cov}[W_k, V_j] = E[W_k V_j^T] = 0 \quad (4)$$

其中, Q_k 为系统噪声方差阵; R_k 为量测噪声方差阵。

离散系统中 X_k 的估计 $\hat{X}_k$ 如下:

状态预测为公式(5):

$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (5)$$

均方误差预测为公式(6):

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (6)$$

滤波增益为公式(7):

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (7)$$

状态估计为公式(8):

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1}) \quad (8)$$

均方误差估计为公式(9):

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (9)$$

公式(1)~(9)即为卡尔曼滤波基本方程,通过给定初值 $\hat{X}_0$ 和 P_0 ,根据 K 时刻的量测值 Z_k ,计算机运行程序递推计算出 K 时刻的状态估计 $\hat{X}_k$ ($k=1,2,\dots$)。

卡尔曼滤波中的滤波计算回路和增益计算回路,分别完成滤波回路计算和更新过程。计算机运行每次估计更新分两步:时间更新、量测更新。前者基于状态转移方程,对系统状态量进行时间预测,后者将预测的状态量和观测值,作为输入对系统状态量,随后进行最小二乘估计。得到的估计值,又递归作为下一时刻系统更新的起点,如此循环迭代^[6]。

4 结语

论文基于光纤惯导的组合导航系统,通过融合 GNSS 和 SINS 导航定位数据,依靠两种导航定位系统的优势互补来提高定位精度和可靠性。在具体设计方法上,采用 GNSS/SINS 组合导航系统的设计思想,自主设计 DSP 和 FPGA 导航计算模块,通过合理的组合导航信息融合技术,实现高精度的定位导航。此种设计具有良好的通用性和扩展性,应用前景十分广阔。

参考文献

- [1] 李方慧,王飞,何佩琨,著.TMS320C6000系列DSP原理及其应用[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [2] 王剑飞,程耀瑜,王鹏,著.基于FPGA和DSP的多路信号采集系统的设计[J].电视技术,2013(3).
- [3] 练军想.GNSS与惯性及多传感器组合导航系统原理[M].北京:国防工业出版社,2015.
- [4] 秦永元.惯性导航(第二版)[M].北京:科学出版社,2014.
- [5] 高伟.捷联惯性导航系统初始对准技术[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [6] 严恭敏.惯性仪器测试与数据分析[M].北京:国防工业出版社,2015.