

# 一种激光陀螺惯导仪表信号采集电路设计

周琪

(长沙南方职业学院,长沙 410208)

**摘要:** 在激光惯导系统设计中,惯导仪表信号采集电路需要具备高精度采集惯性仪表信号和体积小的特点。介绍了一种简单且精度高、体积小的信号采集电路设计方法,该方法采用 FPGA 对激光陀螺输出信号进行采集和 FIR 滤波,采用 I/F 电路对石英挠性加速度计输出的电流信号进行转换,利用 FPGA 进行可逆计数从而转变为加速度计信号值。详细介绍了惯导仪表信号采集电路硬件和软件设计过程,包括 I/F 电路设计、FIR 低通滤波器设计等,最后通过试验验证设计的正确性。

**关键词:** 激光惯导; FIR 滤波; I/F 电路; FPGA

**中图分类号:** V241 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)03-0072-05

## Design of a Signal Acquisition Circuit for Laser Inertial Navigation Instrument

ZHOU Qi

(Changsha Nanfang Vocational College, Changsha 410208, China)

**Abstract:** In the laser inertial navigation system, signal acquisition circuit is required to have high acquisition precision and small size. A simple method for designing data acquisition circuit with high precision and small size is presented here. FPGA is used in the method for acquiring laser gyro output signal and FIR filtering, and I/F circuit is used to convert the quartz flexible accelerometer output current signal into frequency signal. The paper describes the design process of the circuit hardware and software of the signal acquisition circuit, including I/F circuit design and FIR low-pass filter design. The correctness of the design is verified through a final experiment.

**Key words:** laser inertial navigation; FIR filter; I/F circuit; FPGA

### 0 引言

传统的激光陀螺仪输出信号利用 FPGA 进行鉴相和可逆计数,然后将计数值发送到 DSP 进行 FIR 滤波,最后由导航计算机将陀螺仪数据、加速度计数据和 GPS 数据融合进行组合导航<sup>[1]</sup>。但在高速运动的惯导系统中,由于 FPGA 与 DSP 信号传输之间存在时间延时,对姿态解算的同步性造成影响,以至于影响导航精度,利用 DSP 进行 FIR 滤波虽然具有良好的滤波效果,却增大了数据采集电路板的体积与滤波时间;还有一种方法是采用 FPGA 的 IP 硬核滤波,这种方法需要将 Matlab 生产的滤波系数进行量化扩大,这样无形中增

加了 FIR 滤波器占用 FPGA 的资源,并且 IP 硬核的内部结构决定其精度无法满足激光陀螺滤波要求。本文采用 FPGA 进行鉴相和可逆计数,并利用 FPGA 的软核 EDK 嵌入式技术对激光陀螺信号进行 FIR 滤波,再对激光陀螺进行温度补偿、正交标定和零偏标定以达到高精度测量要求;本文还详细介绍了 I/F 电路的设计方法,以满足石英挠性加速度计的高精度采集要求<sup>[2]</sup>。

### 1 激光惯导仪表信号采集电路整体设计

激光陀螺两列正弦(余弦)脉冲信号需要经过光电耦合隔离后进入 FPGA,通过对其进行鉴相、可逆计数,然后输入到 FPGA 嵌入式内核进行 FIR 滤波,解算出角速度值之后进行温度补偿、零偏和正交修正、刻度因子标定,最后输出到导航计算机进行姿态解算。石英挠性加速度计通过 I/F 转换方法将加速度计输出的电流信

收稿日期:2014-04-08

修回日期:2014-05-27

基金项目:国家自然科学基金(51205373)

作者简介:周琪(1985—),女,湖南邵阳人,学士,讲师,研究方向为数控技术。

号转换为脉冲频率信号,然后对脉冲信号进行高精度的频率可逆计数,得到对应的加速度测量信号值。I/F 电路模块包含选通开关电路、运放器件构成的积分电路、

电压比较器电路、门限选通电路和恒流源电路。图1为激光陀螺采集滤波和石英加速度计 I/F 采集处理电路原理图<sup>[3-4]</sup>。

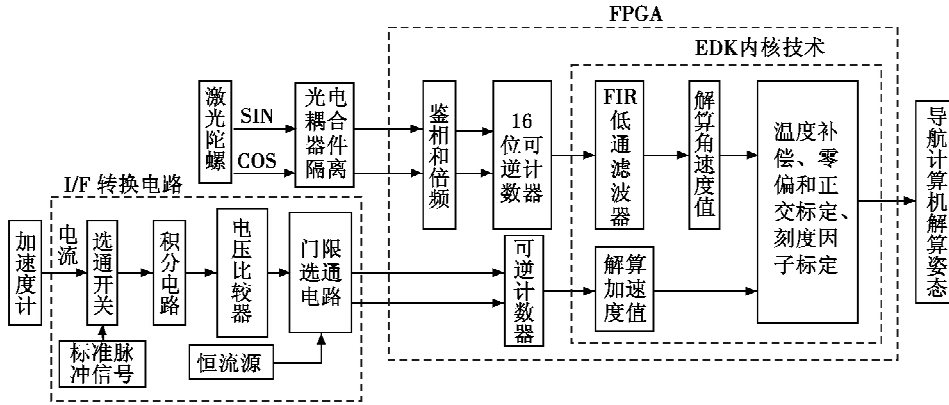


图1 激光惯导仪表信号采集处理电路原理图

Fig. 1 Principle of the laser inertial navigation signal acquisition and processing

### 2 I/F 转换器电路设计

石英挠性加速度计输出信号需要用 I/F 转换方式才可以获得较高的精度,也就是将加速度计输出的电流信号转变为脉冲频率信号,通过对频率脉冲信号进行计数则可以得到相应的加速度信号值。

#### 2.1 恒流源电路

在 I/F 电路设计过程中,恒流源的电流输出精度决定 I/F 电路设计的成败,恒流源能够向负载提供恒定电流源,稳定的恒流源能给 I/F 电路提供比较精准的电流源来作为参考的标准。图2为精度较高的恒流源电路图,采用 MAX6250 作为 +5 V 参考电压源,选用运算放大器 OPA277U 和少量的外围分立元器件则可以产生基准的电流源 +5 V<sub>I</sub>。

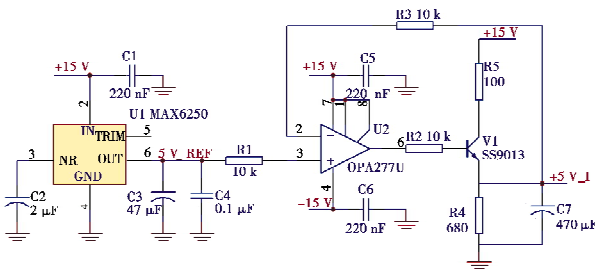


图2 恒流源电路图

Fig. 2 The schematic of constant current source circuit

#### 2.2 I/F 转换电路

I/F 转换电路的基本原理就是由标准电流源 ±5 V<sub>I</sub> 形成反积分电荷量,通过 MAX314 选通开关连

续输入标准电流源来修正加速度计电流 AX 输入电路的积分电荷量。主要依据电荷平衡原理和利用 I/F 转换积分器原理来实现。如图3和图4所示,AX 为加速度计输出的电流信号,L1 为选通开关 MAX314 的选通信号,主要由 FPGA 的 IO 管脚产生。

图3中的 10 kHz 为标准的恒流源输入选通信号。当 L1 为逻辑低电平时,MAX314 选通 S2,加速度计 AX 信号转变为电压信号 U<sub>e</sub>,通过积分电路转换输入到电压比较器 LM339 的正输入端。当加速度计电流 AX 输出电压 U<sub>e</sub> 达到电压比较器 LM339 的门限电压时,LM339 就产生一个输出信号高电平 B+ 输入到由 D 触发器 74HCT74 组成的同步器输入 D 端口(见图4),在 1 MHz 的同步时钟作用下 D 触发器产生高电平 AX+, 该信号就是 IF 电路的输出信号;二级 D 触发器在反向时钟 1 MHz\_NOT 作用下,同时产生一个低电平 D-, 此时低电平控制换向选通开关选通标准的参考电流源 -5 V<sub>I</sub>, 选通的标准电流总与加速度计输入的电流 AX 相反,图4中的网络编号 5 V<sub>I</sub>\_REF\_A 与 5 V<sub>I</sub>\_REF\_B 为反向的标准电流连接网络端口编号。当满足条件 | -5V<sub>I</sub> | > AX 时,积分电容的电压开始减小,当标准输入信号电压 U<sub>e</sub> 低于电压比较器的门限电压时,门限电压恢复到以前的低电平 B- 状态,在 1 MHz 的时钟沿到来时信号从高电平变为低电平。换向选通开关恢复到原来的状态,在电容的充放电作用下,输入信号 AX 就变为脉冲频率信号 U<sub>f</sub>, 输出信号的频率精度主要取决于标准电流源和充放电周期 T<sup>[5-6]</sup>。

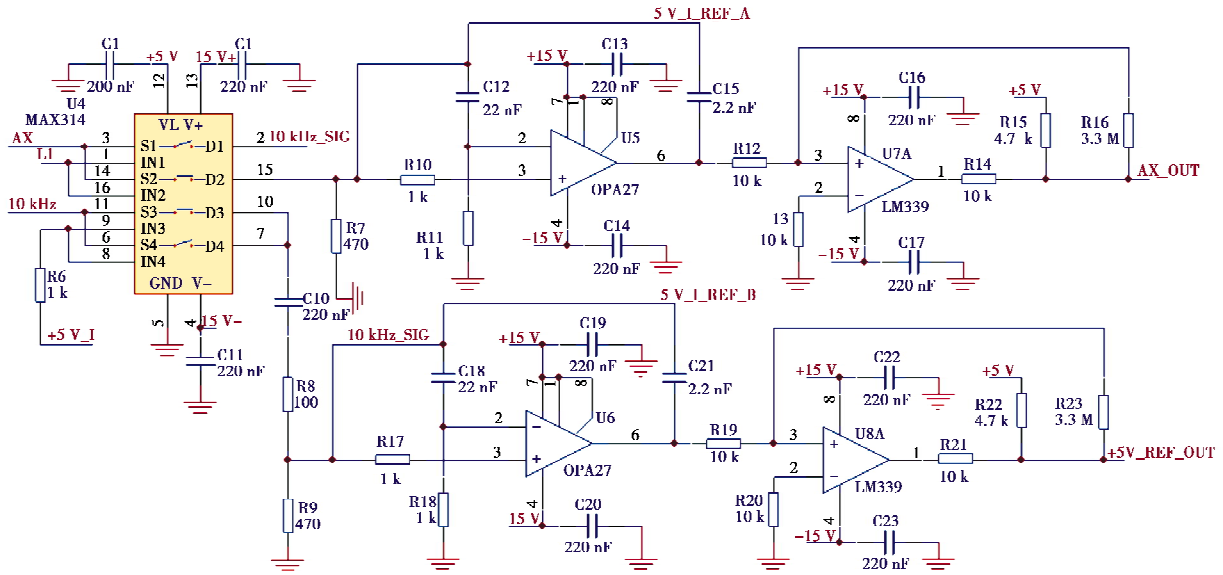


图3 I/F 积分电路图

Fig.3 Schematic of I/F integrator circuit

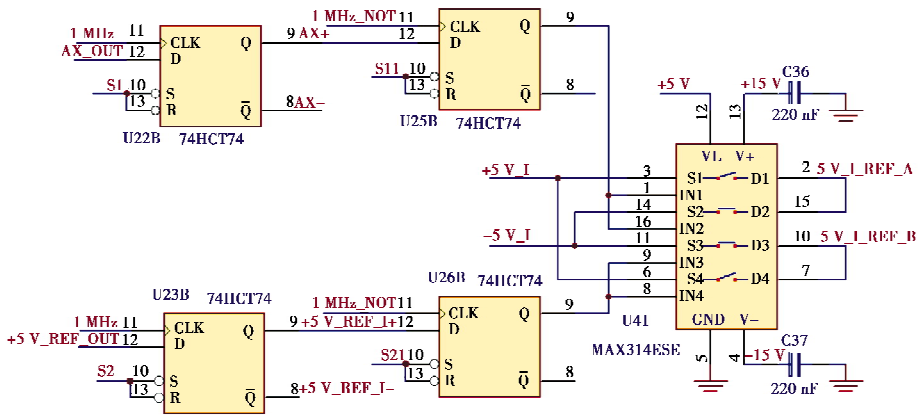


图4 同步器和选通开关电路图

Fig.4 Schematic of synchronizer and strobe switch circuit

### 3 软件设计

#### 3.1 FIR 滤波器设计

激光陀螺输出信号包含转动角速度信号、抖动偏频和随机干扰噪声信号,可以通过 FIR 低通滤波器滤除抖动偏频和随机噪声信号。本文设计的 FIR 滤波器为 64 阶,采样率为 10 kHz,截止频率为 100 Hz,通带内纹波抖动为 1 dB,阻带下降 60 dB,滤波器系数由 Matlab 的 FDATool 工具产生<sup>[7-9]</sup>。FIR 低通滤波器部分 C 语言代码如下所示。

```

for(n=0;n<CoefNum;n++) //CoefNum 为滤波的阶数
{for(i=0;i<CoefNum-1;i++)
{x[i+1]=x[i];}
x[0]=data[n]; //抽头数据
FilterData=FilterFun(x);} //FilterData 为滤波结果
double FilterFun(double x[]) //乘累加函数
{int n;double sum;double y[CoefNum]={0};

```

```

sum=0;
for(n=0;n<CoefNum;n++)
{y[n]=h[n]*x[CoefNum-n];sum+=y[n];} //乘累加
sum+=h[n]*x[CoefNum-n]
return sum;}

```

#### 3.2 FPGA 程序设计

本设计采用 Xilinx 公司的 VIRTEX-5 系列 XC5VLX110T 可编程逻辑器件 FPGA 作为核心信号处理器。利用 VHDL 语言和 EDK 嵌入软核技术对 FPGA 进行逻辑功能设计,FPGA 内部程序主要由鉴相倍频模块、可逆计数器模块和 EDK 软核组成,其中,EDK 内核模块包括 FIR 滤波器模块、激光陀螺角速度解算模块、加速度值解算模块、零偏修正模块、正交标定模块、温度补偿模块和平滑滤波模块。在时钟 CLK 上升沿的作用下,FPGA 采集激光陀螺信号进行鉴相、可逆计数、将含有高频信号的计数值输入到 EDK 内核中调用 FIR 滤波器滤除高频信号,再通过频率值解算出相应的角速度、经过误差补

偿等与加速度计输出信号打包发送到导航计算机进行姿态角解算。采集的加速度计信号也需要进行可逆计数转换为频率才可以得到相应的加速度值<sup>[10]</sup>。

### 4 试验验证

针对本系统的激光惯性仪表数据采集电路,设计中采用 T50 型激光陀螺,加速度计采用石英挠性加速度计,并将激光陀螺惯性仪表组件与数据采集电路组装成一个激光惯导 IMU 放置于水平转台上进行静态测试和以 60 (°)/s 转速旋转的动态测试。在测试中,对 Z 轴激光陀螺和 Z 轴加速度计进行 1 h 的数据采集和数据处理,其采集和处理的数据经过打包通过串口发到上位机,上位机读取 Z 轴激光陀螺和加速度计 Z 轴的数据值,并利用 Matlab 画出测量值与采集时间的关系曲线,其静态测试结果如图 5 和图 6 所示,动态测试结果如图 7 和图 8 所示。

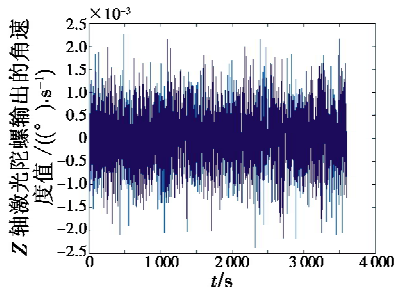


图 5 静态测试激光陀螺信号输出值

Fig. 5 Laser gyro signal output of static test

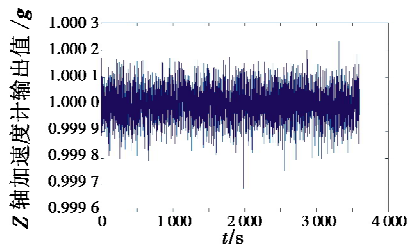


图 6 静态测试加速度计输出的值

Fig. 6 Accelerometer output of static test

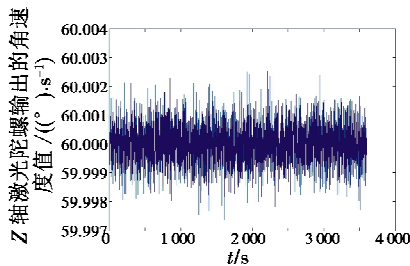


图 7 60 (°)/s 转速下测试激光陀螺信号输出值

Fig. 7 Laser gyro signal output at speed of the 60 (°)/s

激光陀螺的波动范围小于 0.002 5 (°)/s,零偏稳定性小于 0.001 (°)/h;加速度计波动范围小于 0.000 3 mg,零偏稳定性小于 1 mg。静态测试和动态测试结果

存在一些误差,该误差是由于正交标定参数存在误差造成的,在组合导航算法中可以减小该误差,可见电路具有较高的测量精度,满足设计要求。

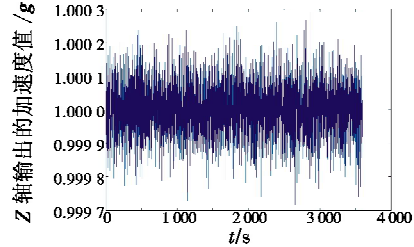


图 8 60 (°)/s 转速下测试加速度计输出值

Fig. 8 Accelerometer output at the speed of 60 (°)/s

分别利用 FPGA 和 DSP 对激光惯导仪表进行数据采集和滤波,结果如表 1 所示。

表 1 FPGA 和 DSP 静态试验下滤波结果对比

Table 1 Filtering results of FPGA and DSP static tests

FIR 滤波方式	Z 轴陀螺的输出均值/Hz	Z 轴陀螺输出的角速度/(°)·s <sup>-1</sup>
FPGA 软核滤波	3.253 7	0.001 2
FPGA IP 硬核滤波	3.987 5	0.002 1
DSP 滤波	3.258 2	0.001 3

从表 1 可以看出,采用 DSP 滤波与采用 FPGA 软核技术滤波效果基本一致,在此试验中 DSP 滤波与 FIR 滤波的系数、阶数与代码基本一致,而采用 FPGA 硬核滤波方式却有较大的误差,这个误差来源主要是 FPGA 硬件 IP 核结构差异和滤波系数取整量化造成的。分别将 FPGA 软核滤波电路采集板和 DSP + FPGA 组合电路采集板同时固定在转台上并接上激光陀螺,在同一时刻开始采集激光陀螺数据,转台从静止开始加速到转速 60 (°)/s。在分析数据过程中将采集到的数据对齐,可以看到 FPGA 软核滤波采集电路板首先输出 60 (°)/s 的角速度,比 DSP + FPGA 快出一个数据点。因此,采用 FPGA 软核进行 FIR 滤波具有其他两种方式不具备的体积小、精度高的优势。

### 5 结语

试验结果表明,采用 FPGA 软核对激光陀螺输出信号进行 FIR 滤波具有精度高、体积小的优点,而利用 L/F 电路在提高石英挠性加速度计精度方面具有较大的优势,加速度计的高精度对后期的导航解算优化具有非常重要的促进作用,该采集电路对于激光惯导的设计具有重要的参考意义,可应用于激光惯导设计领域。

### 参考文献

[1] 张岩. 激光陀螺捷联惯导系统数据采集电路的分析与

- 设计[D].长沙:国防科学技术大学,2005. (ZHANG Y. The analysis and design of laser gyro SINS data acquisition circuit [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. )
- [2] 虞露,李傲,冯兴光. 大规模可编程逻辑器件(FPGA)开发系统电源设计研究[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007:125-164. (YU L, LI J, FENG X G. Large-scale programmable press logic device (FPGA) development system power supply design study [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2007:125-164. )
- [3] 章燕申. 激光陀螺抖动偏频研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1990, 11(3):15-20. (ZHANG Y S. The study laser gyro dithered [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1990, 11(3):15-20. )
- [4] 谢绪焜. 激光陀螺捷联惯导组件数据采集电路设计与实现[D]. 太原:中北大学,2011. (XIE X Y. The laser gyro SINS component data acquisition circuit design and implementation [D]. Taiyuan: North University of China, 2011. )
- [5] 任晨纲. 基于FPGA的激光陀螺捷联惯导系统信号检测与处理[D]. 长沙:国防科学技术大学,2009. (REN C G. The laser gyro SINS FPGA-based signal detection and processing [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. )
- [6] 孟俊芳. 弹载惯导系统中的加速度计L/F变换电路[J]. 航空兵器, 1998, 21(1):35-38. (MENG J F. On-board accelerometer inertial navigation system L/F converter circuit [J]. Air Weapons, 1998, 21(1):35-38. )
- [7] 李文刚. 基于FPGA的高速高阶FIR滤波器设计[D]. 成都:电子科技大学,2005. (LI W G. The high-speed high-order FIR filter design based on FPGA [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005. )
- [8] LUTOVAC M D, TOSIC D V, EVANS B L. 信号处理滤波器设计——基于Matlab和Mathematica的设计方法[M]. 朱义胜,董辉,译. 北京:电子工业出版社,2004. (LUTOVAC M D, TOSIC D V, EVANS B L. Filter design for signal processing using Matlab and Mathematica [M]. Translated by ZHU Y S, DONG H. Beijing: Electronic Industry Press, 2004. )
- [9] 丛玉良,王宏志,赵晓明. 数字信号处理原理[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2009:34-45. (CONG Y L, WANG H Z, ZHAO X M. The digital signal processing theory [M]. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2009:34-45. )
- [10] 李国辉. 惯性器件的温度漂移及补偿技术研究[D]. 西安:航天第十六研究所,2003. (LI G H. Inertial drift and temperature compensation device technology research [D]. Xi'an: The Sixteenth Institute of Aerospace, 2003. )
- (上接第53页)
- get detection algorithm for sensor network based on Monte-Carlo localization boxed [J]. Computer Science, 2012, 39(8):223-228. )
- [10] 孙利民. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005. (SUN L M. Wireless sensor network [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. )
- [11] 季莹. 基于粒子滤波的无线传感器网络目标跟踪[D]. 北京:北京交通大学,2007. (JI Y. Target tracking for wireless sensor network based on particle filter [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. )
- [12] 林瑞仲. 面向目标跟踪的无线传感器网络研究[D]. 杭州:浙江大学,2005. (LIN R Z. Research on wireless sensor network for target tracking [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. )
- [13] 冯钧,黄成,徐志良,等. 多节点协作的WSN监测目标和定位算法研究[J]. 河南理工大学学报, 2014, 33(2):211-215. (FENG J, HUANG C, XU Z L, et al. Research on multi-node cooperative monitoring target and positioning algorithm for wireless sensor network [J]. Journal of Henan University of Science and Technology, 2014, 33(2):211-215. )



请扫描二维码  
关注我刊

