

基于虚拟仪器的光泵磁力仪测控系统设计

柯超凡¹, 彭翔², 徐盛晨¹, 喻松¹

(1. 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876;
2. 北京大学 信息科学技术学院, 北京 100876)

摘要: 为了降低激光泵浦磁力仪的噪声, 首次将虚拟仪器技术应用到了光泵磁力仪的测控系统中。采用 Labview 编程工具和基于 PXIe 总线的工控系统, 完成了数据采集、信号处理和信号发生三个模块的一体化设计。在分析各个模块实现的基础上, 重点研究了数字信号处理算法的设计。通过改进 FIR 结构低通滤波器解决了噪声水平和系统带宽的矛盾, 采用梯形积分增量式 PID 控制算法, 提高了系统的抗干扰能力和鲁棒性, 使得控制系统的噪声水平达到了 $0.01 \mu\text{V}$ 的量级。结合激光稳频技术和稳功率技术, 有效地消除了激光的频率漂移和功率抖动所引入的噪声, 将磁力仪的噪声降低到了 $0.7 \text{ pT/Hz}^{0.5}@1 \text{ Hz}$ 。

关键词: 虚拟仪器; 光泵磁力仪; PXIe 总线; Labview 编程

中图分类号: TP391.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3315-05

Design of detection module in laser pumping system based on virtual instrument

Ke Chaofan¹, Peng Xiang², Xu Shengchen¹, Yu Song¹

(1. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to reduce noise in the laser-pumped magnetometer, the virtual instrument technology was applied to the detection module for the first time. With Labview programming tools and the PXIe-bus based control system, the integrated design of the data acquiring module, the signal processing module and the signal generating module was completed. Analysis of the three modules was performed with emphasis on the digital signal processing algorithm. By improving the structure of the low-pass filter, the conflict between bandwidth and noise level was resolved. By using trapezoidal integration incremental PID control algorithm, the system's robustness and anti-interference ability were greatly improved. The control system noise level reached the magnitude of the $0.01 \mu\text{V}$. Combined with laser frequency and power stabilization technique, the noise introduced by the the laser frequency drift and power jitter was effectively eliminated. The magnetometer noise was reduced to $0.7 \text{ pT/Hz}^{0.5}@1 \text{ Hz}$.

Key words: virtual instrument; optical pumping magnetometer; PXIe bus; labview programming

收稿日期: 2013-04-10; 修订日期: 2013-05-13

基金项目: 国家杰出青年基金(61101081)

作者简介: 柯超凡(1989-), 男, 硕士生, 主要从事数字信号处理方面的研究。Email: robin31415@163.com

导师简介: 喻松(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光通信方面的研究。Email: yusong@bupt.edu.cn

0 引言

光泵磁力仪^[1]广泛应用于油田勘查、空间探测等场合,是当前航空探测领域的研究热点。如何降低磁力仪的噪声,提高系统灵敏度具有十分重要的实际意义。

目前提高光泵磁力仪灵敏度的方法主要有两种:一是采用激光器作为泵浦源,利用激光的单色性好、相干性高等优异性能^[2]和先进的激光稳频技术以及稳功率技术降低泵浦光频率漂移和功率抖动;二是采用先进的数字信号检测技术对光泵系统进行检测和反馈控制。国内的磁力仪在信号检测和处理模块通常采用模拟电路的方案,由于模拟电路的一些固有缺陷,磁力仪灵敏度难以提高^[1,3]。

文中从第二个方面入手,首次提出了基于虚拟仪器技术设计的光泵检测系统,并对系统性能进行了评估和分析。文中首先介绍检测系统的主体——信号检测模块的设计,主要是锁相放大器的实现;然后介绍了整个检测控制系统设计方案和工作参数设置;最后给出实验结果并进行了分析。

1 锁相放大器设计

1.1 原理

光泵磁力仪控制系统首先要检测光电探测器输出的微弱信号,检测模块的性能对整个控制系统具有决定意义,通常选用锁相放大器^[4]结构。锁相放大器利用相敏检测(PSD)技术来检测参考频率点信号的幅度和相位。基本工作原理是将输入信号与参考信号相乘,结果会出现输入信号与参考信号的差频项以及和频项,经过低通滤波器滤除高频成分后,输出的直流信号与输入信号的参考频率分量幅值成正比。

数字锁相放大器的典型结构如图 1 所示,它包含信号输入通道、参考输入通道、数字低通滤波器、数字相敏检波器,输出通道等。输入通道中,线性陷波器是用来滤除工频及其二次谐波干扰的;交流放大保证输入模拟信号转换为数字信号时具有足够大的幅值;抗混叠滤波器把信号在不失真的前提下将其上限频率限制在采样频率的一半以下,避免 ADC 的信号中出现虚假信号。被转换后的数字信号在处理器中完成相敏检波功能,再通过低通滤波器获取

拍频后的直流信号。参考通道具有内部和外部参考两种模式,在外参考模式下输入的模拟信号通过一个数字相位锁相环测量其频率,并据此产生 PSD 的参考信号;在内部参考模式下,只需直接提供参考频率值就可以在所选定的频率上产生 PSD 所需要的相位信号,不需要时间锁相。使用 n 倍频器使得锁相放大器不仅可以在与参考信号相同的频率上进行锁相,而且还可以在参考信号的 n 倍频上进行锁相检测。

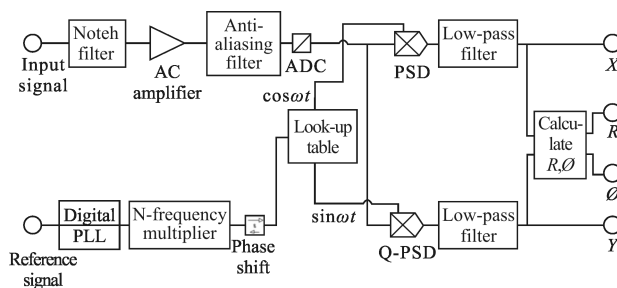


图 1 数字锁相放大器的典型结构

Fig.1 Typical structure of digital lock-in amplifier

1.2 硬件设计

硬件系统采用基于 PXIe 总线的工控机, PXIe 是从 PXI^[5]的基础上发展而来的。将 PCIe 整合到原来的 PXI 标准中形成了全新 PXIe 架构, PXIe 具有高达 132 Mbyte/s~8 Gbyte/s 的传输性能,能够满足更高的应用需求。

锁相放大器系统硬件架构如图 2 所示,主要由机箱、数据采集卡和处理器(CPU)3 个模块构成。机箱采用 3U 8 槽 PXI Express 机箱,它提供 4 个混合插槽, 3 个 PXI Express 插槽, 1 个 PXI Express 系统定时插槽, 每插槽拥有高达 1 GB/s 的专用带宽和 7 GB/s 的系统带宽,支持 PXI 与 PXI Express 模块和内置定时与同步特性,可满足各种高性能测试和测量应用的需求。CPU 采用基于 Intel Core i7-3610QE 的高性能嵌入式控制器,结合 2.3 GHz 基频、3.3 GHz 四核处理器和双通道 1 600 MHz DDR3 内存,该控制器非常适合用于处理器密集型模块化仪器和数据采集应用;处理器模块还提供 2 个超高速 USB 端口、4 个高速 USB 端口、2 个千兆以太网端口、 GPIB、串口和其他外设。鉴于锁相放大器对数据采集模块的特殊要求,采集卡采用商用的高精度数据采集模块,包含可变增益放大器、软件可配置的 AC/DC 耦合、IEPE 调理以及可变抗混叠滤波器等模拟信号前端调理模

块,可以同步采集 4 路模拟信号,模块使用动态范围高达 118 dB 的 24 位模数转换器。

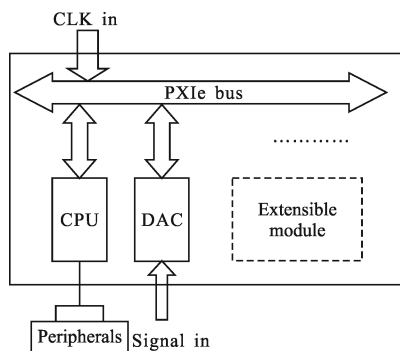


图 2 硬件架构

Fig.2 Hardware architecture

1.3 软件设计

选用 Labview 作为编程工具,Labview 是一种用图标代替普通文本进行程序编辑的语言,有一个可完成任何编程任务的庞大函数库。Labview 的函数库中包括了数据采集、GPIB、串口控制、数据分析、数

据显示及数据存储等等,应用 Labview 可以方便地完成锁相放大器系统的软件设计。

软件设计从功能上可以分为数据采集和数据处理两部分。数据采集部分既完成对采集卡的工作模式配置,包括采样率、耦合方式、接线方式以及信号输入范围等参数的设置,同时还将采集到的数据送到处理器内存中以便做后续的数据处理。

数据处理部分程序框图如图 3 所示。与传统锁相放大器中的数字锁相环结构不同,文中对参考信号的处理是首先对其做 FFT 变换,从变换结果中提取出最大频率分量的频率值和和相位信息,这种做法最大程度地利用了 CPU 的高性能,只需要一个信号周期就可以提取出参考信号信息,频率和相位准确度比传统的数字锁相环更高,减小了相位噪声并且提高了锁相放大器的响应速度。然后利用相位信息生成标准的正弦波作为 PSD 的参考信号,正弦波作参考信号可以有效地避免谐波响应的干扰。

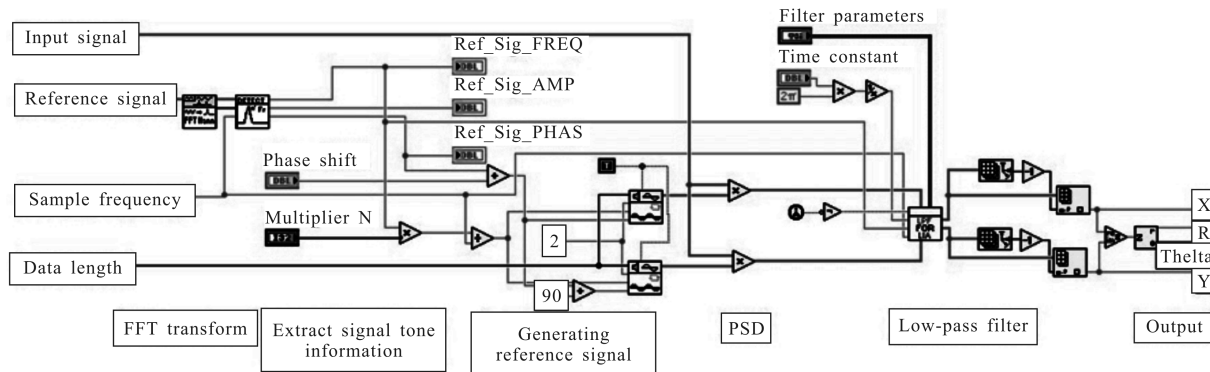


图 3 锁相放大器的程序框图

Fig.3 Program of the lock-in amplifier

传统锁相放大器一般选用巴特沃斯结构的低通滤波器^[6],这种结构的滤波器设计简单,具有平坦的通带频率响应,因此得到了广泛应用,但是这种滤波器具有过渡带衰减缓慢、上升时间长等缺点。

笔者利用 Labview 编程为锁相放大器添加了多种滤波器结构供选择,包括切比雪夫 I 型滤波器、切比雪夫 II 型滤波器和 FIR 滤波器,每种滤波器都可以单独设置其截止频率、阶次以及级联级数。不同结构滤波器有各自的优缺点:切比雪夫 I 型滤波器具有很快的响应速度,但是由于其通带不平坦,输出结

果的静态噪声较大;巴特沃斯滤波器的静态噪声小,但是响应时间太长,不适用于信号快速变化的场合;FIR 滤波器综合性能最好,过渡时间较短同时静态噪声也很小,但是对处理器的运算速度有要求,因为它一次迭代输出需要完成许多次乘法操作。图 4 是在相同的滤波器参数设置下,不同结构滤波器的响应曲线,从图中可以看出:切比雪夫 I 型滤波器响应最快,巴特沃斯结构响应最慢;但是如果从静态噪声分析,巴特沃斯结构的低通滤波器却要优于前者,如表 1 所示。

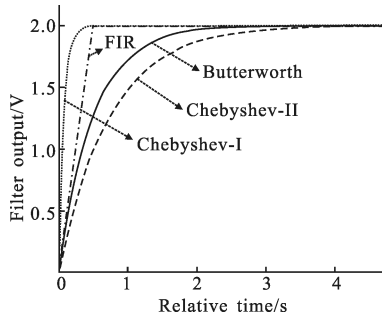


图 4 不同滤波器的响应曲线
Fig.4 Response curves of different filters

表 1 不同滤波器的噪声性能

Tab.1 Noise performance of different filters

Filter structure	Input SNR	Output SNR	SNR improvement
Butterworth	4.900 62	3 182.7	649.448
Chebyshev-1	4.898 65	1 235.32	252.176
Chebyshev-II	4.900 11	4 054.14	827.359
FIR	4.897 86	2 562.52	523.192

2 控制系统设计

光泵磁力仪是以原子能级的塞曼效应为基础,利用光泵作用和磁共振作用实现磁场测量的一种高精度、高灵敏度的磁测设备。与其他种类磁力仪相比,光泵磁力仪在地磁场测量领域有着显著的优势,它具有无零点漂移、可连续测量、无需严格定向等优

点^[7]。基于锁相放大器模块,添加一个 FPGA 模块作为数字信号源,构成了光泵磁力仪的数字检测系统,可以完成对磁共振信号的检测并反馈控制信号源以实现对外磁场的锁定^[8]。

根据锁相放大器对磁共振信号的检测结果,调整信号源,改变其载波频率,使得检测到的磁共振信号幅度始终维持最小状态,此时外磁场值与载波频率值满足一定的数学关系,通过换算即可得到磁场值。利用 NI 公司的 Flex-Rio FPGA 模块和相应的适配器作为控制系统的受控数字信号源。FPGA 模块直接插到机箱的空闲插槽上即可使用,系统的硬件构造如图 5 所示。软件设计上,利用 Labview FPGA 模块完成对 FPGA 的编程和调试,使其能同时输出调频信号和参考信号,主程序中添加一个 PID 控制模块,根据锁相放大器的输出结果,完成 PID 计算并反馈调节 FPGA 的载波频率,软件流程图如图 6 所示。

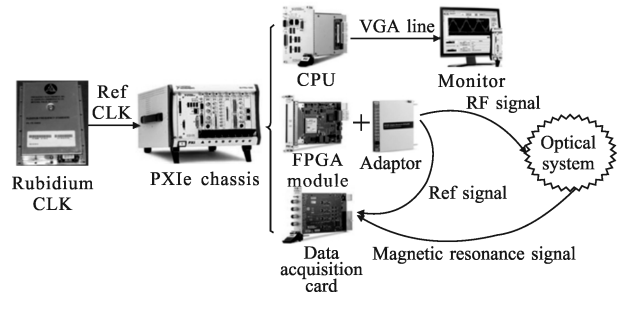


图 5 磁力仪检测系统硬件结构

Fig.5 Hardware structure of magnetometer detecting system

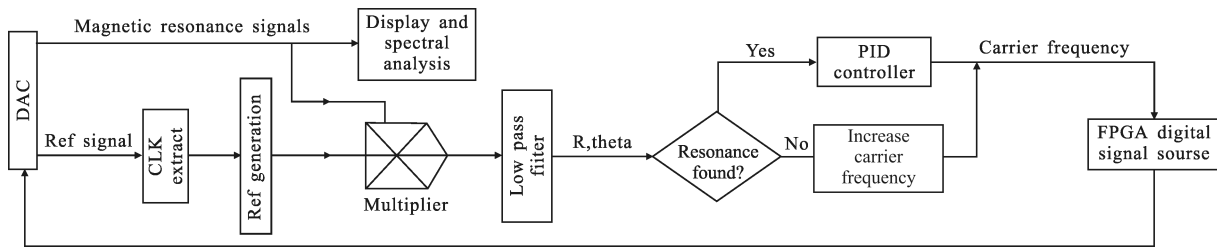


图 6 磁力仪检测系统软件流程图

Fig.6 Flow chart of magnetometer detecting system

PID 模块^[9]的设计对控制系统的带宽和鲁棒性有很大影响,为了提高系统带宽和鲁棒性,采用梯形积分策略和增量式的 PID 算法。

锁相放大器输出结果的噪声大小对磁场测量的灵敏度有着直接的影响,因此需要选择静态噪声小的滤波器结构。但是磁力仪检测系统是一个反馈控

制系统,如果锁相放大器的响应时间太长,会降低整个系统的闭环带宽。综合考虑后,选择 FIR 结构的低通滤波器,并根据实验结果调整滤波器的工作参数,滤波器参数的设置对噪声有着显著影响。由于光泵磁力仪是根据磁共振时的载波信号频率来计算外磁场值的,系统晶振的稳定度会对性能有很大影响。为

此选定铷钟作为系统的参考时钟,使整个系统都工作在一个恒稳的时钟下,降低了频率不稳定对系统性能的影响。

3 实验结果

在弱磁环境下对磁力仪性能进行了检测,记录了 10 min 的磁场输出数据,其谱分析结果如图 7,从图中可以看出磁力仪噪声谱密度为 $0.7 \text{ pT/Hz}^{0.5}@1 \text{ Hz}$,跟国际先进水平相当^[1]。

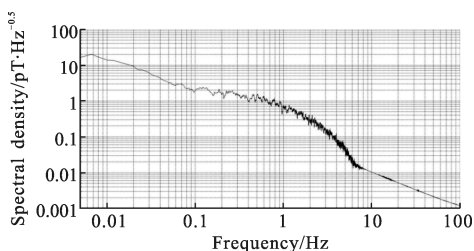


图 7 噪声谱密度

Fig.7 Noise spectral density

4 结论

光泵磁力仪在油田勘查、地磁场测量和空间探测等领域有广泛的应用。文中致力于研究光泵磁力仪的测控系统设计,首次提出了基于虚拟仪器技术的测控系统,优化了检测模块和控制模块的算法以及硬件性能,使得系统的灵敏度达到了国际一流水平。今后将在现有工作基础上进一步拓展虚拟仪器测控系统的应用,提高磁力仪的灵敏度和带宽等综合性能指标。

参考文献:

[1] Dmitry B, Michael R. Optical magnetometry [J]. *Nature Physics*, 2007(3): 227–234.
 [2] Meng Xianfeng, Lu Chunhua, Ni Yaru, et al. Application and protection of laser technology [J]. *Infrared and Laser*

Engineering, 2005, 34(2): 136–141. (in Chinese)

孟献丰, 陆春华, 倪亚茹, 等. 激光技术的应用和防护[J]. *红外和激光工程*, 2005, 34(2): 136–141.

- [3] Gilles H, Hamel J, Cheron B. Laser pumped ^4He magnetometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(5): 2253–2260.
 [4] Sonnaillon M O, Bonetto F J. A low-cost, high-performance, digital signal processor-based lock-in amplifier capable of measuring multiple frequency sweeps simultaneously [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(2): 24703–24707.
 [5] Barrera E, Ruiz M, Lopez S, et al. PXI-based architecture for real-time data acquisition and distributed dynamic data processing [J]. *Nuclear Science IEEE Transactions*, 2006, 53(3): 923–926.
 [6] Ren Libing, Wei Haoyun, Li Yan. Digital filter method of oversampling Fourier transform infrared spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1438–1441. (in Chinese)
 任利兵, 尉昊贇, 李岩. 过采样型傅里叶红外光谱仪的数字滤波方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1438–1441.
 [7] Evgeny B Alexandrov, Victor A Bonch-Bruевич. Optically pumped atomic magnetometers after three decades[J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(4): 711–717.
 [8] Zhang Zhenyu, Cheng Defu, Lian Mingchang, et al. Analysis and detection of He optically pumped magnetometer signal [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(12): 2656–2661. (in Chinese)
 张振宇, 程德福, 连明昌, 等. 氦光泵磁力仪信号的分析及检测[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(12): 2656–2661.
 [9] Ma Dongxi, Zhang Wenbo, Fan Dapeng. Satisfactory control for E-O tracking system based on multi-rate input algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2484–2491. (in Chinese)
 马东玺, 张文博, 范大鹏. 光电跟踪伺服系统的输入多采样率满意控制 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2484–2491.