

基于FPGA的激光陀螺自适应抖动剔除

蔡刚刚, 谢元平, 樊振方

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:去除激光陀螺输出信号中的抖动信号是机械抖动偏频激光陀螺信号处理电路的主要工作之一。为了满足机械抖动偏频激光陀螺在快速跟踪中的应用要求, 基于现场可编程芯片(FPGA)实现了激光陀螺自适应抖动剔除的软硬件设计, 其次在静态条件下对系统抖动剔除效果和剔除后的激光陀螺零偏进行测试, 最后进行动态试验, 给出了LMS自适应抖动剔除的动态响应曲线, 验证了LMS自适应抖动剔除的零延时性。实验结果表明, 系统能有效去除陀螺输出信号中的抖动成分, 其相位延迟几乎为0, 完全可应用于需要实时输出角速率信息的场合。

关键词:激光陀螺; 抖动剔除; 自适应滤波; 跟踪

中图分类号: TN249; V241.5

文献标识码: A

Adaptive Dither Stripper for Mechanical Dithered Ring Laser Gyro Based on FPGA

CAI Ganggang, XIE Yuanping, FAN Zhenfang

(School of Photoelectrical Science & Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The dither signal removal is one of the important works of mechanical dithered ring laser gyro signal processing. To meet the requirements of the fast tracking community, the hardware and software design of the adaptive dither stripper has been carried out based on FPGA. Then, the dither-stripping effect and gyro's null drift stability tests have been performed under the static condition. Finally, the dynamic response property of dither stripper has been tested, and the dynamic response curves are presented. The zero-latency feature of LMS adaptive dither stripper has been verified. The results showed that most of the dither signal has been removed by the dither stripper with almost no phase latency, and the dither stripper can be used for real-time angular rate measurement.

Key words: ring laser gyro; dither stripping; adaptive filtering; tracking

0 引言

目前, 激光陀螺在导航计算、惯性测量等领域的应用已开展了大量的研究工作, 并取得了许多成果, 但关于激光陀螺在控制、跟踪方面的应用研究报道较少。在飞行控制、平台稳定等快速跟踪的场合, 要求控制系统实时输出角速率信息^[1]。机械抖动偏频激光陀螺是最早进入实用, 也是目前使用最广泛的激光陀螺。对于机械抖动偏频激光陀螺, 其输出信号既包含陀螺敏感到的载体角运动信息, 也包含机械抖动角运动。为得到载体角运动信息, 必须对陀螺输出信号进行解调。典型的解调方案主要有整周期采样技术、高速采样低通滤波和抖动剔除等方法, 其中抖动剔除具有零延时的特点, 可实时输出角速率信息, 适合稳定控制等快速跟踪场合。

抖动剔除技术利用陀螺输出信号中的抖动成分与抖动反馈信号的相关性, 通过一定的算法对抖动反馈信号进行幅度和相位矫正后与陀螺输出信号相减得到载体角运动信息^[2-6]。随着自适应滤波技术

和微电子技术的发展, 自适应滤波法越来越多地应用于激光陀螺抖动剔除^[7-18]。

目前, 抖动剔除主要采用单片机或数字信号处理器(DSP)来实现, 软硬件设计相对较复杂, 而现场可编程逻辑芯片(FPGA)具有资源丰富, 开发周期短, 可反复修改等特点, 其中Altera公司开发的FPGA可植入可定制、可裁剪的Nios II处理器, 且方便将应用程序固化到芯片中。陀螺信号处理系统中需多种定制化的外设, 一般器件无法满足这种要求, 因此FPGA是处理激光陀螺信号的理想选择。本文基于FPGA进行了激光陀螺自适应抖动剔除的软硬件设计, 给出了激光陀螺抖动剔除的静态性能和动态响应实验结果。

1 系统整体结构

图1为系统的结构框图, 图中虚线框中的功能均在FPGA中实现。整个系统主要包括抖动反馈

收稿日期: 2011-06-22

作者简介: 蔡刚刚(1986-), 男, 甘肃宁县人, 硕士生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: cgg870405@163.com。谢元平(1971-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光电信号检测和光学陀螺方面的研究。E-mail: wuyalizi@yahoo.cn。

信号采集、陀螺信号的鉴相计数和 Nios II 软核处理器等部分。

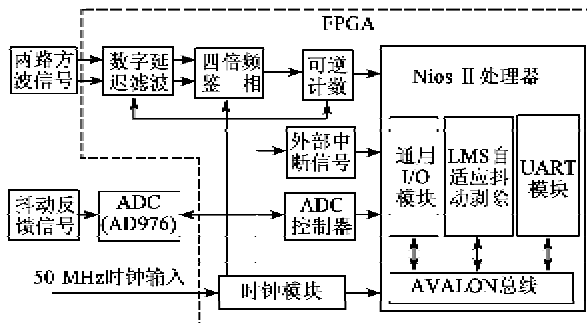


图1 基于FPGA实现抖动剔除的结构框图

两路正交的陀螺方波信号经数字延迟滤波和4倍频鉴相计数模块,得到陀螺计数脉冲。抖动反馈信号由模数转换器转换为数字信号。陀螺计数信号和抖动反馈信号读取及自适应算法的实现均在Nios II软核处理器中进行。

2 硬件设计

FPGA选用Altera公司Cyclone III系列中的EP3C25Q240C8N芯片,它具有低功耗,低成本及容量大的特点。系统选用快速型Nios II处理器,工作时钟为100 MHz,并添加了浮点运算模块。

硬件电路的设计主要包括时钟模块的设计,两路正交方波信号的数字延迟滤波、4倍频鉴相和计数,抖动反馈信号的采集及Nios II软核处理器系统设计。

时钟模块产生各模块的工作时钟和Nios II处理器的外部中断信号。数字延迟滤波和鉴相计数部分及A/D转换控制器采用VHDL语言编程来实现,抖动反馈信号的采集选用16位并行模数转换器AD976来实现。使用两片SN74LVC4245将AD976输出的5 V数字信号转换为FPGA的3.3 V接口电平。Nios II处理器系统通过Avalon总线进行数据交换,在Nios II处理器中完成数据的采集、LMS自适应滤波算法的实现及处理器与上位机的通信。通用I/O模块完成与FPGA硬件逻辑的握手,实现对数据的读取和对其他功能模块的控制。

3 软件设计

软件部分由主程序和中断服务子程序组成,主要完成数据的读取、自适应滤波算法的实现及Nios II软核处理器与上位机的通信。其中Nios II处理器与计算机的通信在主程序中进行,中断服务子程

序主要完成数据的读取和自适应滤波算法的实现。

常用的自适应算法有LMS和RLS两种。RLS算法的精度和收敛速度要优于LMS算法,但其运算量较大,实现起来较复杂。LMS算法的离散性和收敛速度较差,但由于计算量小,易实现等优点,已在多种场合应用。因此,本文采用LMS自适应算法。该算法^[11]为

$$\begin{cases} \Delta N(k) = N(k) - N(k-1) \\ \Delta \alpha_1(k) = \alpha_1(k) - \alpha_1(k-1) \\ \Delta \alpha_2(k) = \Delta \alpha_1(k-1) \\ \Delta \hat{N}_d(k) = W_1(k) \cdot \Delta \alpha_1(k) + W_2(k) \cdot \Delta \alpha_2(k) \\ \Delta N_{net}(k) = \Delta N(k) - \Delta \hat{N}_d(k) \\ \epsilon(k) = \Delta N_{net}(k) - \Delta N_{net}(k-1) \\ W_1(k+1) = W_1(k) + 2\mu \cdot \Delta \alpha_1(k) \cdot \epsilon(k) \\ W_2(k+1) = W_2(k) + 2\mu \cdot \Delta \alpha_2(k) \cdot \epsilon(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta N(k)$, $\Delta \alpha_1(k)$ 分别为陀螺计数增量和A/D转换增量; $\Delta \hat{N}_d(k)$, $\Delta N_{net}(k)$ 分别为抖动估计信号和陀螺净输出; $W_1(k)$, $W_2(k)$ 为滤波器权向量; $\epsilon(k)$ 为误差信号; μ 为步长因子。

为了消除载体转动直流量影响环路的性能,滤波器权向量的更新不是直接采用自适应算法输出,而是将其经过差分或高通滤波器先去除其中的直流量^[11]。

中断服务子程序程序流程图如图2所示。系统采样时钟频率为4 kHz,由FPGA时钟模块通过分

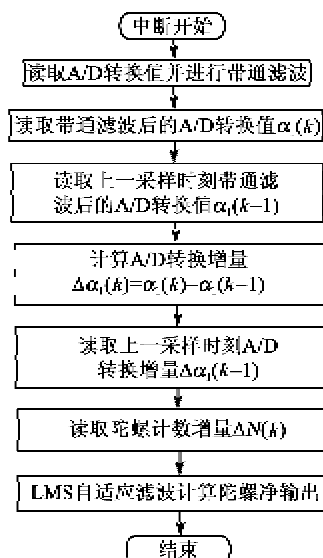


图2 中断服务子程序流程图

频电路产生。采样时钟在实现陀螺计数信号和抖动

反馈信号寄存时触发 Nios II 处理器外部中断,在外部中端中实现数据的读取、A/D 转换结果的带通滤波及 LMS 自适应算法,程序最终返回抖动剔除后剩余脉冲数。

4 实验结果

基于以上设计系统,对一激光陀螺进行了测试,采样频率为 4 kHz。

4.1 剔除效果测试

图 3 为静态条件下采样间隔内陀螺输出脉冲数的增量及其频谱。图 4 为抖动剔除后剩余脉冲数增量及其频谱。由图 4 可知,经抖动剔除后抖动基频信号已由原来的 50 dB 衰减至 -45 dB。由于陀螺抖动中加有随机调制,并不是理想的正弦信号,同时作为参考信号的抖动反馈信号也存在着非线性、噪声等误差因素,因此抖动剔除并不能完全去除抖动偏频量。根据应用场合不同,对剔除后的数据再进行低阶 FIR 滤波以滤除剩余的抖动偏频量和高频噪声,进一步提高去噪效果^[14]。由抖动剔除与低阶 FIR 滤波器引入的总延时应满足不同场合的需要^[1]。本文设计了理论延时为 1.25 ms 的十一阶 FIR 低通滤波器。滤波器的设计采用矩形窗函数设计法,截止频率 $F_c = 200$ Hz。该滤波器在 100 Hz 处引入的相移为 45° ,幅度响应为 0.895。图 5 为抖动剔除加十一阶 FIR 低通滤波后剩余脉冲数增量

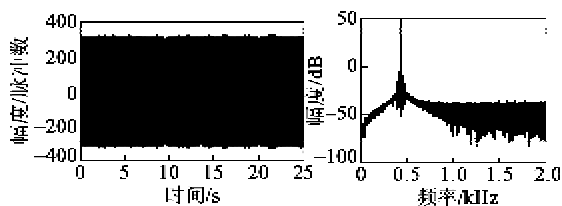


图3 陀螺计数脉冲增量及其频谱

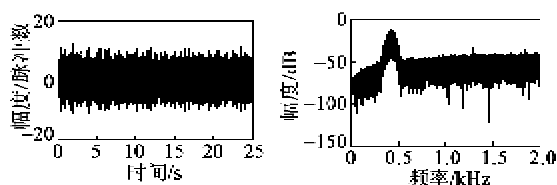


图4 LMS 自适应滤波后剩余脉冲数及其频谱

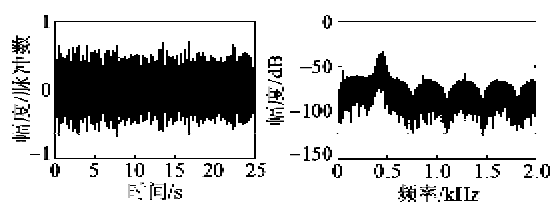


图5 LMS+十一阶 FIR 低通滤波剩余脉冲数及其频谱

及其频谱,由图 5 可看出,加低通滤波后,抖动基频由原来的 50 dB 衰减至 -75 dB。

4.2 激光陀螺抖动剔除静态性能实验

在室温条件下,将陀螺水平放置,进行陀螺零偏测试。测试时,将抖动剔除的 4 kHz 采样输出累积为 1 s 采样输出,每组测试 2 h,得到原始采样样本,再对这组数据每 100 个求平均,可得到一个样本,其均方差记为 $\sigma(100\text{ s})$ 。分别采用该系统和基于高速采样低通滤波的激光陀螺测试台对陀螺进行静态零偏测试,表 1 为 2 种方法测试得到的结果。二者均值接近,说明基于 FPGA 的抖动剔除软硬件工作正常。表中抖动剔除的均方差略大于测试台结果,这是由抖动剔除的带宽大于低通滤波方案决定的。

表1 陀螺零偏测试结果

测试方法	零偏均值/Hz	$\sigma(100\text{ s})/\text{Hz}$
LMS+十一阶 FIR	3.757 3	0.001 5
	3.757 4	0.001 4
	3.757 3	0.001 5
测试台	3.757 2	0.001 0
	3.757 3	0.000 9
	3.757 3	0.001 1

4.3 激光陀螺抖动剔除动态响应实验

激光陀螺应用于控制、跟踪时,其输入输出的幅频、相频响应曲线重要。文献[7-13]虽进行了自适应抖动剔除的研究,但并未给出抖动剔除动态响应实验结果。动态响应实验为将激光陀螺置于小型振动台上,逐次改变振动台的振动频率,并将陀螺抖动剔除输出与振动台实际运动比对即可得到幅频、相频响应曲线。振动台实际运动可由激光干涉仪或其他传感器(如放置在振动台上的四频激光陀螺)得到。限于振动台限制,只进行了 1~80 Hz 的振动实验(一般控制系统只需 100 Hz 以下的信息)。实验结果如图 6、7 所示。

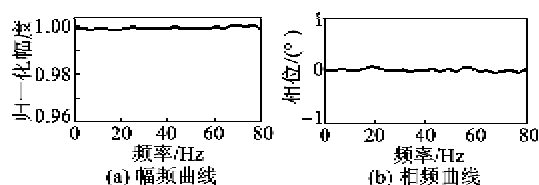


图6 LMS 自适应抖动剔除动态响应曲线

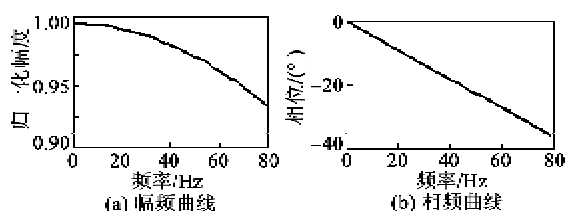


图7 LMS 加十一阶 FIR 低通滤波动态响应曲线

由图 6 可知,在 0~80 Hz 范围内,基于 FPGA 的激光陀螺 LMS 自适应抖动剔除系统的幅度响应为 1,相位延迟几乎为 0,这说明系统能很好地跟踪外界输入角速率的变化。

由图 7(a)可见,加了十一阶 FIR 低通滤波器后,幅度随频率上升而有所衰减,衰减幅度与所设计的十一阶 FIR 低通滤波器相同,故衰减是由滤波器导致的。由图 7(b)可计算得到 LMS 自适应抖动剔除加十一阶 FIR 低通滤波器的总延时为 1.252 ms。对于十一阶 FIR 低通滤波,其理论延时为 1.25 ms,这也说明 LMS 自适应抖动剔除的延时几乎为 0。

理论上 LMS 自适应抖动剔除只需进行抖动反馈信号的比例缩放和从陀螺计数信号中减去抖动成分等相关运算,剔除后的陀螺信号输出几乎是实时的^[18],因此实验结果与理论分析吻合。

综上所述可知,LMS 自适应抖动剔除在不加低通滤波器和加低阶低通滤波器时,均具有良好的幅频和相频响应特性,可应用于稳定控制等需要实时输出角速率信息的场合。

5 结束语

基于 FPGA 实现了激光陀螺自适应抖动剔除的软硬件设计。实验结果表明,抖动剔除后陀螺输出信号中的抖动成分能得到很好的衰减,LMS 算法在所测频率范围内能很好地跟踪外界输入角速率的变化,且其相位延迟几乎为 0。加低阶低通滤波器后,仍具有好的幅频和相频特性,可应用于实时角速率输出的场合。

参考文献:

- [1] MAJURE R G. Demonstration of a ring laser gyro system for pointing and stabilization applications[J]. Position Location and Navigation Symposium, 1990: 528-536.
- [2] LJUNG BO H G, SCHRODER D F. Ring laser gyro dither pulse eliminator; U. S Patent, 4344706 [P]. 1982-08-17.
- [3] CALLAGHAN S P, KILLPATRICK J E. Dither signal remover for a dithered ring laser angular rate sensor; U. S Patent, 4826320 [P]. 1989-05-02.
- [4] FRITZE K R, KILLPATRICK J E, BERNDT D F. Ring laser gyro dither stripper; U. S Patent, 5249031 [P]. 1993-09-28.
- [5] TAZARTES D A, MARK J G, PASADENA. Apparatus for compensating for change in laser gyro dither pickoff scale factor; U. S Patent, 5325173 [P]. 1994-06-28.
- [6] KILLPATRICK J E, MINNEAPOLIS. Dither stripper with non-linearity correction; U. S Patent, 7088452 [P]. 2006-08-08.
- [7] 谢元平, 张广发. 抖动偏频激光陀螺抖动信号的自适应对消[J]. 应用激光, 2000, 20(3): 121-123.
XIE Yuanping, ZHANG Guangfa. Dither signal remover for a dithered ring laser gyroscope utilizing adaptive Noise canceling[J]. Applied Laser, 2000, 20(3): 121-123.
- [8] DOHENY D A. Adaptive filters for corrected Noise reduction in ring laser gyro inertial systems[D]. USA: University of South Florida, 2004.
- [9] 晁志超, 雷雯, 胡绍明, 等. 自适应陷波器在机抖激光陀螺信号处理中的应用[J]. 光学技术, 2006, 32: 334-336.
CHAO Zhichao, LEI Wen, HU Shaoming, et al. The design of adaptive notch filter used in the signal processing of the dithered RLG [J]. Optical Technique, 2006, 32: 334-336.
- [10] 任春华, 潘英俊, 李俊峰, 等. 激光陀螺的高频读出与自适应滤波方法的研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 576-579.
- [11] DOHENY D A, KOLLIG J L. Dither stripper having least-mean-squares adaptive updating of dither stripper gains; U. S Patent 7440109 [P]. 2008-10-21.
- [12] 樊锦, 吕航伟, 闫海峰. 自适应滤波器在激光陀螺抖动解调中的应用[J]. 电光与控制, 2009, 16(8): 56-59.
FAN Jin, LV Hangwei, YAN Haifeng. Application of adaptive filter in RLG dither stripping[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(8): 56-59.
- [13] 张庆华. 高集成度激光陀螺小型化电源与抖动剔除技术的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [14] BANERJEE K, DAM B, MAJUMDAR K, et al. An improved dither-stripping scheme for strapdown ring laser gyroscopes[J]. Tencon 2004 IEEE Region 10 Conference, 2004: 689-692.