

# FPGA 和 DSP 平台惯性传感器信号小波处理

褚福刚<sup>1</sup>, 蒋行国<sup>1</sup>, 章启兵<sup>2</sup>, 吴琼雁<sup>3</sup>

(1. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学理学院, 广西 桂林 541004;

3. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要:** 为了满足光电跟踪系统对激光陀螺信号去噪处理提出的高实时性要求, 对小波阈值消噪算法的特点进行分析, 提出一种基于 FPGA 和 DSP 的硬件平台实现此滤波算法, 达到了高实时滤波的要求, 且滤波效果明显。实验结果表明, 设计的硬件系统对单频率和多频率噪声都具有去噪功能, 并将输出延时降低在 15  $\mu\text{s}$  以内。

**关键词:** FPGA; DSP; 激光陀螺; 小波变换

**中图分类号:** TN911.72    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.014

## Wavelet processing for signal of inertial sensor based on FPGA and DSP

CHU Fu-gang<sup>1</sup>, JIANG Xing-guo<sup>1</sup>, ZHANG Qi-bing<sup>2</sup>, WU Qiong-yan<sup>3</sup>

(1. Information & Communication College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. College of Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

**Abstract:** To meet the high speed processing requirement of laser gyro signals in electro-optical tracking system, wavelet transform algorithm is designed and analyzed. It is carried out on a hardware platform of FPGA and DSP. The filter achieves real-time and good filtering result. The experiment results verify that the system can filter both unifrequency noise and multi-frequency noise and the output delay time is within 15  $\mu\text{s}$ .

**Key words:** FPGA; DSP; laser gyro; wavelet transform

### 1 引言

惯性传感器包括陀螺仪和角速率传感器, 是光电跟踪系统中非常关键的组成部分, 负责测量系统的各个惯性姿态角, 为其他系统如指挥系统、火力系统等提供精确的方位信息和水平信息。影响惯性传感器输出信号精度的主要因素是随机噪声, 包括高斯白噪声和  $1/f^\gamma$  分形噪声。传统的去噪方法不能将惯性传感器有用信号的高频部分和由  $1/f^\gamma$  噪声引起的高频干扰进行有效的区分。而小波变换因其具有良好的时频局部化分析能力, 能够很好地保存有用信号的尖峰和突变部分, 故根据小波信号处理原理来对传感器输出信号进行去噪可以达到较好的效果<sup>[1-3]</sup>。然而小波处理算法的大运算量使传感器信号的实时处理成为一个难题<sup>[4]</sup>。

为了满足光电跟踪系统对惯性传感器信号滤波

处理提出的高实时性要求, 本文分析了小波阈值消噪算法<sup>[3]</sup>的特点, 将其分为阈值算法和信号小波处理算法两部分, 根据不同算法部分的特点和系统提出的要求分别采用 DSP 和 FPGA 两个芯片实现, 改善了信号的滤波效果, 并提高了每个采样点的小波滤波速度, 目前已用于对某平台激光陀螺信号进行连续、稳定的高实时滤波处理。

### 2 小波阈值消噪算法

设激光陀螺输出含噪信号  $f(t) = x(t) + n(t)$ , 其中  $x(t)$  为有用信号,  $n(t)$  为噪声信号。对  $f(t)$  进行小波变换得  $Wf = Wx + Wn$ , 其中  $Wx$  为有用信号的

基金项目: “863” 相关项目子课题 (No. CD09032X) 资助。

作者简介: 褚福刚 (1983 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为小波信号处理。E-mail: chufg123@tom.com

收稿日期: 2011-07-17; 修订日期: 2011-08-10

小波变换,  $Wn$  为噪声信号的小波变换, 则滤波的目的是将  $Wx$  和  $Wn$  分离, 并最大精度的还原出  $x(t)$ 。小波阈值消噪算法实现框图如图 1 所示, 该算法阈值计算和信号的小波处理同时进行, 计算出各尺度下的阈值后便传送给相应尺度分解的信号做阈值处理, 最终经过小波重构后输出滤波结果。

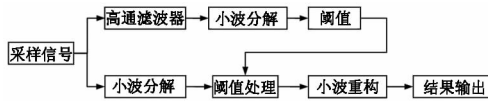


图 1 算法结构

### 2.1 阈值分析

由于有用信号在时间域上有一定的连续性, 因此在小波域, 有用信号产生的小波系数幅值往往较大。而噪声在时间域上没有连续性, 因此在小波域上噪声信号产生的小波系数仍然有很强的随机性。所以经小波分解后, 有用信号对应的小波系数较大, 而噪声信号对应的小波系数较小, 依此原理可以设定阈值对噪声进行滤除而保留有用信号。采用阈值去除噪声时, 软阈值法可以避免小波系数在小波域上产生突变, 从而有效避免滤波结果局部抖动现象, 使重构后的信号较为平滑。软阈值法首先将小波系数和阈值进行比较, 低于阈值的小波系数全部置为零, 而高于阈值的小波系数则进行相应的收缩处理, 具体算法如下:

$$\omega' = \begin{cases} \text{sgn}(\omega) (\omega - T) & |\omega| \geq T \\ 0 & |\omega| < T \end{cases} \quad (1)$$

$$T = \sigma \sqrt{2 \log N} \quad (2)$$

式中,  $\omega'$  和  $\omega$  分别为去噪后和去噪前小波系数;  $T$  为阈值;  $\sigma$  为噪声的标准方差;  $N$  为信号的长度。

### 2.2 小波分解与重构

根据 Mallat 算法得离散小波变换的分解公式<sup>[5-6]</sup>:

$$c_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n \in Z} h_n c_{j+1, n+2k} \quad (3)$$

$$d_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n \in Z} g_n c_{j+1, n+2k} \quad (4)$$

只要确定  $V_j$  空间的初始序列  $\{C_{j,k}\} k \in Z$ , 就可以算出任意空间  $V_j (j < J)$  的所有尺度系数和小波系数。因此由公式(3)、式(4)可以分解出各尺度下的小波系数, 以对其进行阈值去噪。再由 Mallat 算法得小波变换重构公式可以从  $V_j (j < J)$  空间恢复为  $V_j$  空间小波系数:

$$c_{j+1, n} = \langle f(t), \varphi_{j+1, n} \rangle = \frac{1}{2} \sum_{k \in Z} h_{n-2k} c_{j,k} + \frac{1}{2} \sum_{k \in Z} g_{n-2k} d_{j,k} \quad (5)$$

根据以上分解原理, 对分解后的各尺度小波系

数进行阈值处理, 然后再根据重构原理将阈值去噪后的小波系数恢复为原空间的小波系数, 进而得到滤波后信号。

### 3 硬件系统设计

硬件设计采用的主要器件及互相连接图如图 2 所示。FPGA 和 DSP 实现小波阈值消噪算法主要涉及到三部分的设计: DSP 与 FPGA 之间的数据通信、FPGA 实现小波处理算法和 DSP 实现阈值计算。

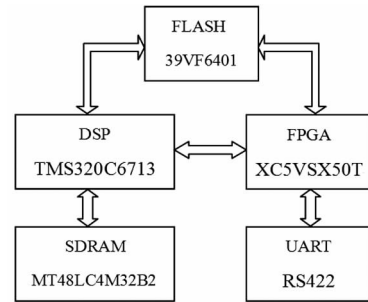


图 2 硬件系统图

#### 3.1 DSP 与 FPGA 数据通信

本文 DSP 主要通过外部存储器接口 (EMIF) 与外部存储器件进行通信。EMIF 共由四个存储空间组成: CE0, CE1, CE2 和 CE3, 每个存储空间寻址范围为 256 M 字节, 其中 CE0 空间配置  $1M \times 32 \times 4$ banks 共 128 Mbits 的 SDRAM, 用于存储外部采集数据。CE1 空间配置  $4M \times 16$  bit 的 FLASH, 用于存储 DSP 和 FPGA 运行代码。DSP 与 FPGA 交互数据时, 将 FPGA 配置为 EMIF 的 CE2 空间, 具体连线如图 3 所示。其中数据总线宽度为 32 bit, 地址总线宽度为 20 bit, 由于 EMIF 将第 2 位至第 21 位地址传

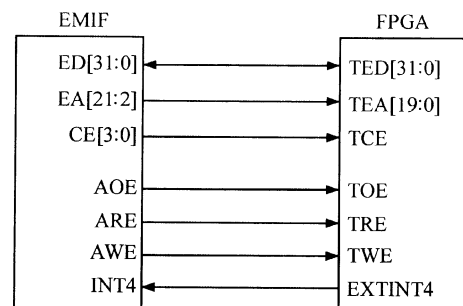


图 3 DSP 与 FPGA 通信连线图

送给 FPGA, 所以需要 EMIF 地址右移 2 位构成 FPGA 的读取地址。此外 AOE, ARE, AWE 和 INT4 作为信号线。

FPGA 读取 DSP 数据时, 首先检测 TCE 片选信号和 TWE 写信号是否有效, 以判断 DSP 是否处于发送数据状态, 然后根据地址 TEA 接收相关数据。由于本文只用于传送阈值, 因此只需设定一个地址便可实现准确接收。FPGA 发送数据到 DSP 时, 首先传送中断信号 EXTINT4, 触发 DSP 进入中断接收程序, 并使

能 TCE, TWE 以及对应的 TEA, FPGA 查询到这些信号后将数据写入数据总线, 完成一次数据传送。

### 3.2 FPGA 小波处理的实现

小波处理算法主要包括小波分解、重构和阈值处理等部分, 本系统设计中分解和重构层数为 5。

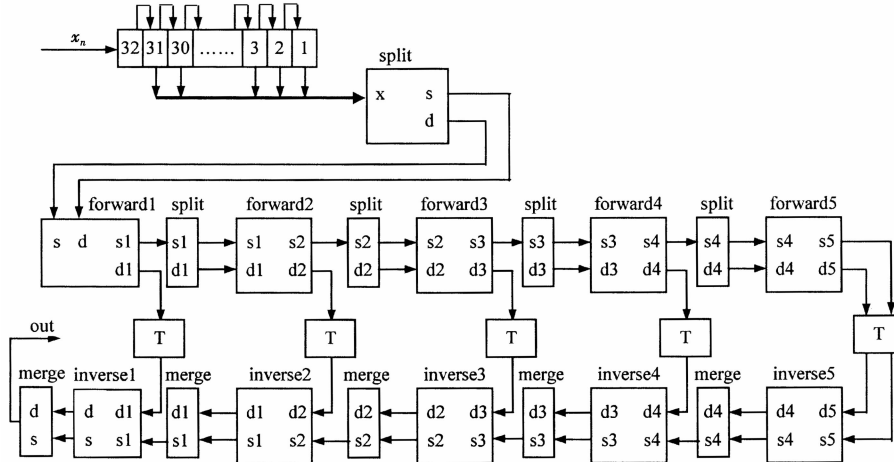


图 4 小波处理算法的 FPGA 结构

外部采集信号  $x_n$  依次进入可以存储 32 个数据的队列, 队列存满时系统每次读取其中的前 31 个数据进行处理, 同时队列中从第 2 个数据开始依次向前移动以供系统下次读取, 第 32 个存储单元接收新的采集数据。该队列由 RAM 设计实现, 因此只需操纵 RAM 地址便可完成上述功能。系统读取的数据进行延拓和分裂时充分利用 FPGA 的并行特点, 将数据存入寄存器, 通过改变寄存器读取顺序可以在一个时钟内完成这两个功能, 大大加快了处理速度。此后进行 5 层小波分解, 层与层之间需要对低频系数进行分裂, 对高频系数进行阈值处理和寄存。完成对第 5 层系数的阈值处理后便进行 5 层反向重构, 每层重构时低频系数为前一层系数的合并输出, 高频系数为相同层分解时的高频分量。经重构后输出 out 的中间数据为小波阈值消噪后信号。

### 3.3 DSP 阈值计算

DSP 实现阈值计算的框图如图 5 所示。首先需要完成三部分初始化, PLL 初始化通过设置 PLLM, PLLDIV<sub>x</sub>, OSCDIV1 等寄存器将 ECLKIN 的 39 M 时钟配置到 300 M 频率用于 CPU 的内核, 使 DSP 工作于更高频率。EMIF 管理 DSP 与外部存储器件的连接, 主要通过对 CE 和全局控制寄存器的设置完成其初始化工作。由于 DSP 读取 FPGA 数据时采用中断方式, 因此需要完成相应 IRQ 初始化工作。DSP 通过 TED 总线接收到采集信号后开始阈值算法的处理, 由文献[3]、[7]可知小波分解时各尺度下的系数方差可以作为相应尺度下噪声的方差, 直接带

入公式(2)即可得到对应尺度下的阈值。由于每层的分解算法相同, 且后一层是对前一层的小波系数进行分解, 因此每层分解采用相同的 FPGA 模块, 不同层之间设计为流水线结构。进行 5 层小波重构时采用与小波分解相同的设计方法。具体结构如图 4 所示。

入公式(2)即可得到对应尺度下的阈值。

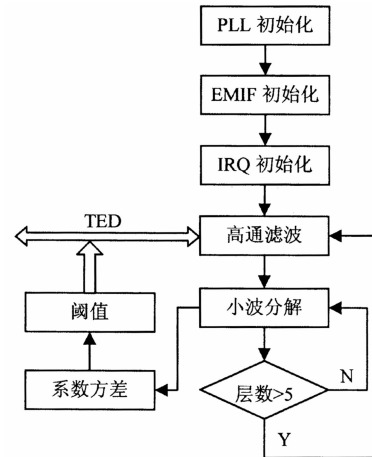


图 5 DSP 实现阈值计算结构

## 4 实验结果

本文设计采用 Verilog HDL 语言描述, 在 Xilinx 的 FPGA (XC5VSX50T) 和 TI 的 DSP (TMS320C6713) 上进行了实现。为充分测试本设计的性能, 分别在单一频率噪声和多频率噪声两种情况下对本文实现的设计进行测试。

噪声为单一频率波形下, AD 采样频率都为 2000 Hz, 信号为 sin 函数, 频率 0.5 Hz, 电压 0.9 V。采用的噪声为 sin 函数, 频率 200 Hz, 电压 0.2 V。滤波前和采用本设计滤波后信号波形如图 6 所示。从滤波图形可以看出, 在输入幅值 -4000 ~ +4000 范围内, 系统可以有效的滤除 sin 噪声, 且处理后的信号波形较为平滑。

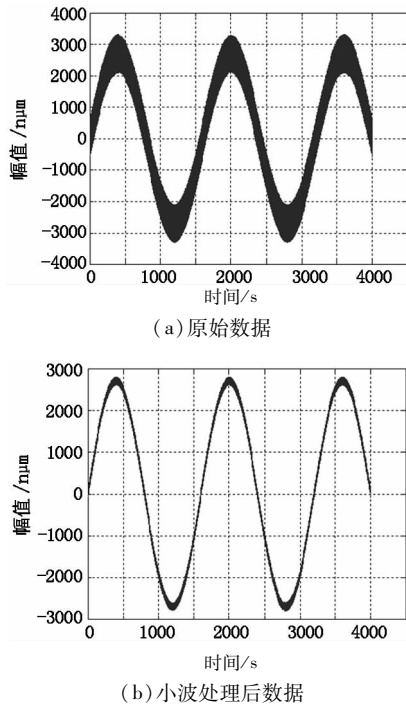


图6 单一频率噪声下滤波结果

噪声为多频率波形下,AD 采样频率都为 2000 Hz,信号为 sin 函数,频率 0.5 Hz,电压 0.9 V。采用的噪声是 pink 噪声,电压 0.2 V。图 7 显示了滤波前和采用本设计滤波后的信号波形。从滤波图形可以看出,在幅值为  $-5000 \sim +4000$  范围内,系统能够明显的去除多频率噪声,并且输出波形失真较小。此外经示波器测量显示,每一点小波数据处理延时约为  $14.9 \mu\text{s}$ ,与文献[3]在其他硬件上实现的延时约为  $50 \mu\text{s}$  相比,实时性效果更好,完全可以满足光电跟踪系统的高实时要求。

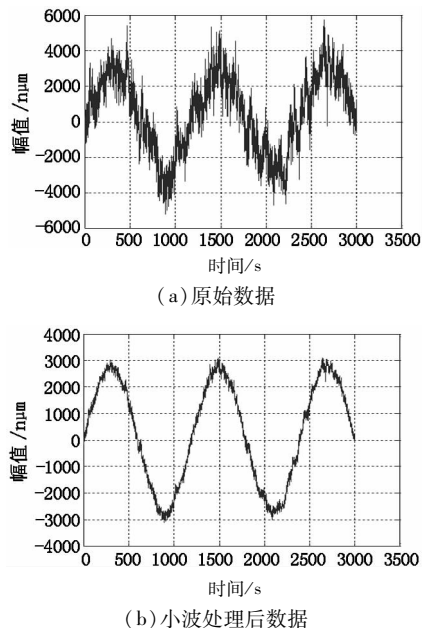


图7 多频率噪声下滤波结果

## 5 结论

为满足光电跟踪系统对激光陀螺信号去噪处理提出的高实时性要求,本文设计了一种基于 FPGA 和 DSP 硬件方案,对小波阈值消噪算法进行了实现。针对消噪算法的不同部分,采用不同的硬件实现方式,并完成了个硬件之间的数据传递。最后从多方面对实现的硬件系统进行了效果验证和实时性验证,结果表明滤波效果和实时性效果满足光电跟踪系统的实际要求。本设计现已应用于实际系统中,且工作稳定、效果明显。

## 参考文献:

- [1] Zhang Chuanbin, Deng Zhenglong. Study on wavelet filtering for signal of ring laser gyro[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(1): 125 - 127. (in Chinese)  
张传斌, 邓正隆. 激光陀螺信号的小波滤波方法研究[J]. 电子学报, 2004, 32(1): 125 - 127.
- [2] Yuan Ruiming, Sun Feng, Chen Hui. Wavelet filtering method in signal processing of fiber optic gyro[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(9): 1235 - 1238. (in Chinese)  
袁瑞铭, 孙枫, 陈慧. 光纤陀螺信号的小波滤波方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(9): 1235 - 1238.
- [3] Jiang Xingguo, Bao Qiliang, Yang Wenshu, et al. Real-time processing method based on wavelet for signals of inertial sensors [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(2): 12 - 102. (in Chinese)  
蒋行国, 包启亮, 杨文淑, 等. 基于小波分析的惯性传感器信号实时处理方法[J]. 光电工程, 2008, 35(2): 12 - 102.
- [4] Ji Yunsong, Guo Chengzhi, Fan Lulu, et al. Realtime image processing method of wavelet based on FPGA[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(10): 1112 - 1114. (in Chinese)  
季云松, 郭成志, 范璐璐, 等. 基于 FPGA 的小波图像实时处理方法[J]. 激光与红外. 2009, 39(10): 1112 - 1114.
- [5] Yao Tianren, Sun Hong. Modern digital signal processing [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1999. (in Chinese)  
姚天任, 孙洪. 现代数字信号处理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1999.
- [6] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. Fourier Analysis and Applications, 1998, 4(3): 247 - 269.
- [7] Wornell Gregory W, Oppenheim Alan V. Estimation of signals from noisy measurements using wavelets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(3): 611 - 623.