

二代小波消噪在数字信号处理器中的实时实现

盖广洪, 屈梁生, 李崇晟

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 以数字信号处理器(DSP)为开发平台,提出了基于二代小波的一种新的信号消噪算法.它只需把信号分解一层,然后把分解后的高频系数和低频系数同时进行软阈值量化处理,再进行小波重构,就可以有效地消除信号中的噪声.相对于传统的一代小波,该算法计算简单,可有效节约内存,因此非常适合于 DSP 的实时实现.同时,为了提高计算效率,对程序的处理流程进行了并行优化,用仿真信号对该算法进行了验证,并应用于对实测信号的消噪中.研究结果表明,该算法可以有效地提高信噪比,降低原始信号中所含有的噪声.

关键词: 二代小波;信号消噪;数字信号处理器;实时实现

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 0253 - 987X(2004)03 - 0278 - 04

Real-Time Implementation of Signal Denoising Based on Second Generation Wavelet Using Digital Signal Processors Chip

Gai Guanghong, Qu Liangsheng, Li Chongsheng

(School of Mechanical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: A novel 1D signals denoising method based on the second generation wavelet was presented in digital signal processors(DSP) chip. The signals are only decomposed into one multiresolution level, and then the detail coefficients and the approximation coefficients are modified via soft thresholding and inversely synthesized. The advantages of the method are lower computational complexity and reduced memory requirement, so it is suitable to the real-time implementation using DSP chip. Moreover, in order to reduce the execution time, the program structure was optimized by parallel operations. The implementation was verified by the simulation signals. Applied to measured signals from laboratory it can reduce the white noise from signals effectively. Results obtained show that this method is a feasible DSP solution.

Key words: second generation wavelet; signal denoising; digital signal processors; real-time implementation

在测试信号的过程中,由于各种干扰因素的影响,因此在采样信号中不可避免地存在着噪声,如何减小噪声,在信号处理领域中已成为主要问题之一.在过去的小波变换消噪中,大部分采用的是传统的一代小波,本文提出了一种新的消噪算法,即基于二代小波^[1](提升模型)来减小信号中的噪声.该算法只需把信号分解一层,然后把分解后的高频和低频系数同时进行软阈值量化处理,再进行小波重构,就可以有效地消除信号中的噪声.算法的实现在数字信号处理器(DSP)芯片中完成,选择美国 Texas In-

struments(TI)公司的新一代浮点型 DSP 器件 TMS320C6711,整个系统的实现由 A/D 转换模块、时序控制电路、DSP 信号处理模块和上位机的通信模块等组成.本文重点讨论 DSP 信号处理模块算法的实现.

1 二代小波的基本原理及其优点

Sweldens 提出了一种新的构造小波的方法——提升模型,被称为二代小波.由提升算法构成的二代小波变换分为 3 个步骤:分裂、预测和更新,具体内

收稿日期: 2003 - 04 - 24. 作者简介: 盖广洪(1973~),男,博士生;屈梁生(联系人),男,教授,博士生导师,中国工程院院士.

容如下所述.

(1) 分裂:将原始信号 x_n 分裂为 2 个互不相交的子集,通常的做法是将一个数列分为偶数序列 x_e 和奇数序列 x_o ,即

$$x_e[n] = x[2n], x_o[n] = x[2n + 1] \quad (1)$$

(2) 预测:用预测算子 P 产生小波系数 $d[n]$,即为用 $x_e[n]$ 去预测 $x_o[n]$ 产生的误差,其表达式为

$$d[n] = x_o[n] - P(x_e[n]) \quad (2)$$

(3) 更新:通过算子 U 产生一个更好的子数据集 $c[n]$,使之保持原有数据集 $x_e[n]$ 的一些特性.更新过程的表达式为

$$c[n] = x_e[n] + u(d[n]) \quad (3)$$

重构公式和分解公式基本相同,区别仅在于把计算次序颠倒,同时把公式内正号变为负号,负号变为正号.图 1 为二代小波分解与重构的示意图,二代小波具有的优点有以下几个方面:

(1) 由二代小波的结构分解可知,它可进行同址运算,在当前位置即可完成小波变换,因此有效降低了对内存的需求量,便于在 DSP 芯片上实现,如图 2 所示,二代小波对内存的占有量只是传统一代小波的一半;

(2) 不依赖傅里叶变换,直接在时域内完成小波构造;

(3) 算法简单,适合并行处理.

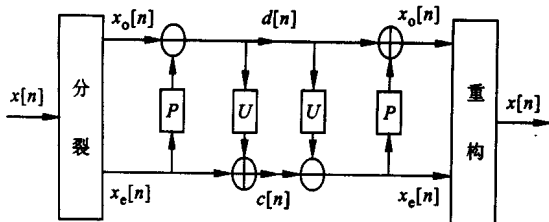
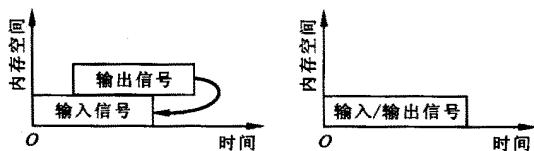


图 1 二代小波分解与重构示意图



(a) Mallat 算法 (b) Sweldens 算法

图 2 2 种算法对内存需求的比较

2 消噪算法在 DSP 中的实现

2.1 小波变换

2.1.1 小波基的选取 考虑到实时性及其消噪的需要,选用 2 阶 Db(Daubechies)小波,因为其滤波器

长度较小,所以运算量有大地降低.在一般情况下,2 阶 Db 小波可以满足我们对信号消噪的要求.如果原始信号消噪需要更高阶的原点矩,则应相应地增加 Db 小波的阶数,但这样会增加运算量,所以还要考虑系统实时性的要求.

Daubechies 和 Sweldens 证明了任意有限长滤波器的离散小波变换,都可以通过对它的多相矩阵进行因式分解,把它化为有限的提升步骤来解决^[2].对 2 阶 Db 小波进行分析,采用多相矩阵进行因式分解得到

$$P(z) = \begin{bmatrix} \frac{3^{1/2}-1}{2^{1/2}} & 0 \\ 0 & \frac{3^{1/2}+1}{2^{1/2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{3^{1/2}}{4} & \frac{3^{1/2}-2}{4}z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 3^{1/2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在内嵌式测试系统的开发中,系统应能够实时相应任务的要求,同时系统在满足性能的情况下,应尽量减少硬件的使用.这样,不仅可以使系统更加紧凑,减小体积,而且节约了硬件开支,降低了系统的成本.

DSP 器件的运算处理能力非常强大,C6711 可以在 150 MHz 的主频下工作,再加上强大的优化工具的支持,因此能够充分发挥 DSP 器件的并行操作.但是,这些优势是建立在所有操作均使用片内存储器基础之上的,实践证明,访问片内扩展存储器的速度要明显小于访问片外存储器的速度,其速度的时间比大约为 1:20.因此,在选用算法时,应考虑到以上因素的影响.本文在消噪算法的实现上选用了二代小波.由于 C6711 的内部随机存储器(RAM)只有 64 kB 字节,如果选用一代小波的 Mallat 进行消噪处理,数据类型为浮点型,在不增加外部 RAM 的情况下,运算的数据量最大只能到 4 000 个点.选用二代小波消噪时,则可以把运算的数据量增加到 8 000 个点,因此有效地降低了对 RAM 的需求.

2.1.2 流程处理的优化^[3] 为了使系统满足实时性的要求,我们对程序的流程进行了优化,设计了一种数据搬移和小波分解的并行处理方式.假定一次处理的数据量为 2 000 个点,数据的类型为浮点型,首先在片内 RAM 中预留 32 kB 的空间作为数据缓冲区,并采用 DMA 通道来实现数据的搬运.在 C6711 中有 16 个 EDMA 通道,当搬运大量数据时,使用 DMA 通道比直接读写省时得多(访问速度的

时间比大约为 1/10),而且使用 DMA 方式搬运数据不占系统时钟,即在数据搬移的过程中,CPU 可以继续运行自己的指令而不受影响。

将 32 kB 的数据缓冲区分为 2 个部分,每个为 16 kB,分别记为缓冲 0 和缓冲 1,A/D 转换后的数据被依次搬进 2 个缓冲区,其流程处理的结构如图 3 所示.在向缓冲 1 搬移数据的同时,可以对缓冲 0 中的数据进行小波分解运算;缓冲 0 的计算结果搬到片外的同时,开始处理缓冲 1 中的数据,并在缓冲 0 中的计算结果搬出结束后,将下一块数据向缓冲 0 搬移,依此,只要安排合理,精确控制时间就可以实现数据搬移和小波运算的并行操作,有效地缩短处理时间。

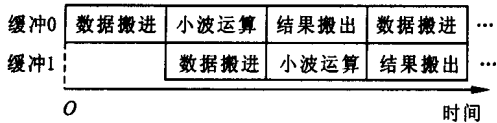


图 3 实现数据搬移和小波运算并行的流程处理结构

2.2 消噪中的系数域值量化

在实际工程应用中,有用的信号一般为低频信号,而噪声则为高频信号,小波对信号 $x[n]$ 消噪的目的就是抑制信号中的噪声成分,从而在 x 中恢复出真实信号。

传统一代小波的消噪过程为:首先把信号分解到 N 层;其次对小波分解高频系数的阈值进行量化处理;最后是根据小波分解的第 N 层的低频系数和经过量化处理后的第 1 层到第 N 层的高频系数,进行信号的小波重构.一般情况下,采样信号的点数越多,需要分解的层数就越多,只有这样才能更好地降噪.在实际实现时,2 000 点需要分解到 4 层,降噪效果才比较好,但需要分解的层数越多,计算量就越大。

本文提出了一种基于二代小波的软域值^[4]消噪算法.假设原始信号中已含有加性白噪声,用前面介绍的 2 阶 Db 小波对信号进行分解,首先把原始信号分解一层,然后用软域值消噪.软域值的表达式为

$$s(n) = g(s(n))(|s(n)| - \lambda)_+ = \begin{cases} 0, & |s(n)| \leq \lambda \\ s(n) - \lambda, & |s(n)| > \lambda \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\lambda = (2 \ln(m))^{1/2}, \quad m = \frac{1}{0.6745} M(|s(n)|) \quad (6)$$

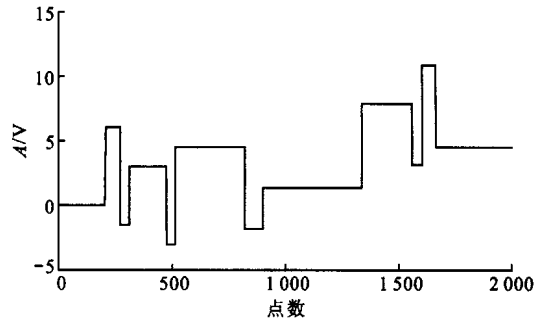
式中: g 表示符号函数; $s(n)$ 表示要量化的信号; $|s(n)|$ 表示量化后的信号; M 表示计算后的域值; λ 为噪声标准偏

差估计; m 为细节信号的个数; M 表示中值函数。

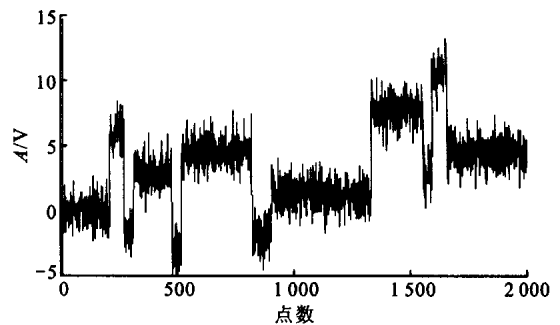
把小波变换后的高频和低频系数同时量化,高频系数采用的域值为式(6)中的 λ ,低频系数为 λ/c ,一般把常数 c 取为 3,依据信号的不同,对 c 的取值稍有差异,然后把量化后的系数进行小波重构,即能达到比较好的消噪效果。

3 试验结果

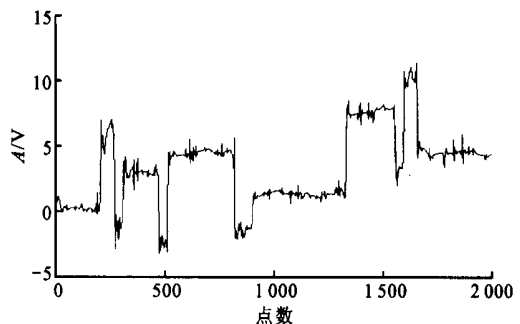
选取两组数据作为试验对象,一组是计算机产生的信号(见图 4),另一组是实际测到的信号,信号的幅值用 A 表示,每组数据的个数为 2 000.由于要满足实时性的要求,因此时间指标很重要.编程采用的是 TI 公司在集成开发环境 CCS2.0 下的 C 语言,所需时间在程序优化前约为 0.54 s,在程序优化后



(a) 原始信号



(b) 加噪信号 ($R_{SN} = 13$ dB)



(c) 本算法消噪后的信号 ($R_{SN} = 19$ dB)

图 4 仿真信号的消噪比较图

约为 0.025 s. 为了比较消噪的效果, 定义统一信噪比为

$$R_{SN} = 10 \lg \left(\frac{x_i^2}{(x_i - \hat{x}_i)^2} \right) \quad (7)$$

图 4 为 Matlab 生成的 Blocks 型数据, 可以看出, 消噪后信号的信噪比有了较大的提高. 从图 5 中可以看出, 通过本文的消噪算法, 比较好地消除了原始信号中的噪声, 为提取发动机故障信号打下了基础.

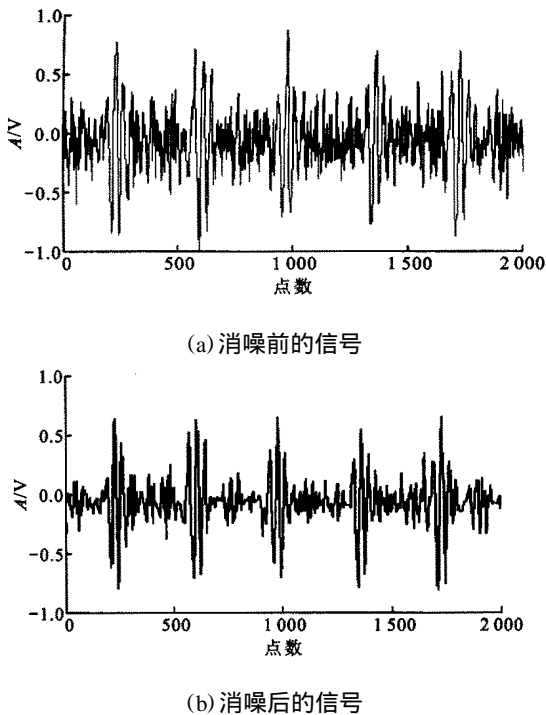


图 5 发动机活塞销故障消噪前后图

4 结 论

本文以 TI 公司的 TMS320C6711 DSP 为开发平台, 实现了基于二代小波变换的实时消噪, 并取得了较好的效果. 试验结果证明, 这是一种有效的 DSP 解决方案. 这一方案的实现对于在线检测仪表的开发具有借鉴意义.

参考文献:

- [1] Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets [J]. SIAM J Math Anal, 1997, 29(2): 511 ~ 546.
- [2] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. J Fourier Anal Appl, 1998, 4(3): 247 ~ 269.
- [3] 孙 勇, 胡广书, 张 辉. 小波零树图像编码算法在 DSP 上的实时实现 [J]. 清华大学学报, 2001, 41(9): 63 ~ 66.
- [4] Donoho D L. De-noising via soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613 ~ 627.

(编辑 管咏梅)

陶文铨教授担任 2 个国际期刊的中国区副主编

受国际传热传质权威期刊《International Journal of Heat and Mass Transfer》及《International Communications in Heat and Mass Transfer》的执行主编、美国伊利诺斯大学机械系 Minkowycz 教授与 Hartnett 教授以及 Pergamon 出版社的委托, 从 2004 年 1 月起, 香港科技大学/上海交通大学郑平教授 (Zheng Ping) 担任以上 2 种期刊负责中国事务的主编, 陶文铨教授为副主编, 处理我国作者稿件的评审与接受工作. 这是我校陶文铨教授继去年担任国际著名传热传质期刊之一《Numerical Heat Transfer》顾问编委之后, 在国际传热传质界获得的又一殊荣. 这也表明由陶文铨教授所领导的课题组所进行的传热学研究将得到国际学术界的认可.