

文章编号 1004-924X(2004)02-0195-05

# 基于提升方法的整数小波在 DSP 上的实现

王丽荣<sup>1,2</sup>, 申铨国<sup>1</sup>, 王延杰<sup>3</sup>

(1. 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130025;

2. 长春大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 在理论上探讨了基于提升框架的整数小波变换(IWT)及其硬件实现问题,并在TI公司的TMS320C6000DSP上实现了图像处理中两种常用滤波器LEGall(5,3),Sweldens(13,7)提升结构的整数小波变换,同时在DSP上对上述滤波器实现了滤波器组(FBS)方法的离散小波变换(DWT)。将提升方法的IWT同FBS方法的DWT在硬件上的运行时间作了比较。结果表明,IWT的运行速度比DWT的运行速度快。本结果可用于评价DSP在图像编码中的运行情况,也可估计出采用此种算法每秒能处理的图像数目。理论和实验均表明,基于提升方法的整数小波变换是一种运行速度快,易于硬件实现,并能实现图像无损压缩的算法。

**关键词:** 图像处理;提升框架;整数小波变换;数字信号处理器(DSP)

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A

## Implementation of integer wavelet transform based on lifting scheme on DSP

WANG Lirong<sup>1,2</sup>, SHEN Xuan guo<sup>1</sup>, WANG Yanyjie<sup>3</sup>

(1. *Communication Engineering College of Jilin University, Changchun 130022, China;*

2. *Electronics and Information Engineering College of Changchun University, Changchun 130022, China;*

3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

**Abstract:** Integer wavelet transform based on lifting scheme and its implementation on hardware are discussed in theory, and IWT of filters LEGall(5,3) and Sweldens(13,7) usually used in image coding are implemented on TI TMS320c6000DSP, and then the discrete wavelet transform based on filter bank scheme is implemented on DSP. The comparison of IWT with DWT in hardware operating time shows that IWT is always faster than DWT. The results reported on the graphs can be used to estimate the number of images processed by these algorithms per second and to assess the performance of DSP in fulfilling image coding tasks. So the IWT based on lifting scheme is an algorithm with higher execution speed and it is easier to implement on hardware, and it can be used to achieve compression of image without loss.

**Key words:** image processing; lifting scheme; integer wavelet transform; DSP

收稿日期:2003-12-16;修订日期:2004-02-15.

基金项目:空军重点科研项目(GJ360)

## 1 引言

小波、小波包变换有着广泛的应用,包括在图像压缩中的应用<sup>[1]</sup>。最常用的快速算法是滤波器组方法,但在大多数情况下,所使用的滤波器有浮点系数,计算相对复杂,假设输入数据包含一系列整数(如图像),经过滤波后不再包含整数。在编码中更令人感兴趣的是输出数据完全是整数,尤其在要求完全重构的图像无损压缩应用中<sup>[2]</sup>。较早使用的整数小波变换有正交的 Harr 小波变换,现在有两类比较常用的整数小波变换,一种是由 Laroia, Tretter 和 Farvardin (LTF) 等人首先提出的,用于解决受到内部信号干扰和高斯噪声干扰的通道传输问题<sup>[3]</sup>;另一类是用于信号和图像处理中的整数小波变换。作者感兴趣的是用于图像无损压缩中的整数小波变换,并重点讨论了构造整数小波的方法。现在的研究热点是利用 Sweldens 等人提出的提升方法(Lifting Scheme),用此方法很容易实现整数到整数的小波变换。提升方法小波变换(第 2 代小波变换)同传统的小波变换相比有很多优点,最重要的优点是计算复杂度低,同较长滤波器相比,操作次数减少近一半,尤其是完全可逆的特点使整数到整数(非线性)的小波变换很容易实现<sup>[4]</sup>。

小波变换在普通的个人计算机上较容易实现,很明显接下来人们要寻求的是结构紧凑,质量轻和功耗少的计算设备。近年来,由于数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)和可编程器件(FPGA)的迅速发展<sup>[5-7]</sup>,使这种设想得以实现。DSP 和 FPGA 也常用于图像和视频处理,很多文献的应用实例说明在 DSP 上实现小波变换核是非常重要的,而且有很高的应用和研究价值<sup>[8-9]</sup>。本文探讨的就是用于无损图像编码的整数小波变换核在 DSP 上的实现问题,并简要分析了 DSP 结构对算法运行速度的可能影响。

## 2 提升方法的整数小波变换

提升方法是在时(空)域分析问题,通过分裂(Split),预测(Predict)和更新(Update)3个步骤来完成<sup>[4,10]</sup>。

(1) 分裂(懒惰小波变换):此过程是把信号  $s_j$

分解成偶数采样点  $s_{j,2l}$  和奇数采样点  $s_{j,2h-1}$ ,也就是所谓的懒惰小波变换(Lazy Wavelet Transform),是将一个数列分为偶数序列和奇数序列,即

$$s_{j,2l} = \text{even}(s_j), \quad (1)$$

$$s_{j,2h-1} = \text{odd}(s_j). \quad (2)$$

(2) 预测:由于数据之间存在一定的相关性,可以从  $s_{j,2l}$  预测  $s_{j,2h-1}$ ,预测值和实际的差值为细节分量即  $d_j$ ,因此可采用一个与数据结构无关的预测算法。首先将  $p$  滤波器作用于偶信号上得到奇信号的预测值  $P(s_{j,2l})$ ,再将该预测值与原信号  $s_{j,2h-1}$  相减得到奇信号的预测误差  $d_{j-1}$ 。

将奇信号的预测值  $P$  与原信号相减得到奇信号的预测误差,表达式如下:

$$d_{j-1} = s_{j,2h-1} - p(s_{j,2l}), \quad (3)$$

(3) 更新(修正):

由  $s_{j,2l}$  预测  $s_{j,2h-1}$  或者说用  $s_{j,2l}$  作为原始信号的粗略表示,如果信号之间的相关性很大,那么预测效果会很好,不会丢失很多信息。但是,这种表示形式可能会丢失信号的某些特征,为了恢复这些特征,引入了另外一种操作更新,利用更新算子  $U$  通过对  $s_{j,2l}$  作预测生成新的数据集以保证  $s_j$  的一些特征。 $s_{j-1}$  的定义如下:

$$s_{j-1} = s_{j,2l} + U(d_{j-1}), \quad (4)$$

基于提升模型的整数小波变换的基本公式:

$$d_{j-1} = s_{j,2l} - |P(s_{j,2l})|, \quad (5)$$

$$s_{j-1} = s_{j,2l} + |U(d_{j-1})|. \quad (6)$$

公式中  $|$  表示取整。

提升方法的框图如图 1 所示。

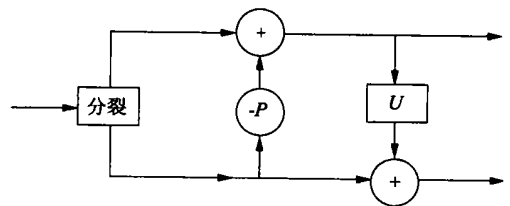


图 1 提升方法的小波变换

Fig. 1 Lifting scheme wavelet transform

进一步的分解是将  $s_{j-1}$  再做预测更新,得到下一层的小波分解系数。根据具体情况选择合适的分解层数。提升方法的小波逆变换和正变换的

顺序一样, 有着完全相同的计算复杂程度<sup>[10]</sup>。

2 种典型的 IWT 变换 LEG(5, 3) 和 SWE(13, 7) 算法如下:

$$d[n] = dq[n] - \lfloor \frac{1}{2}(so[n] + so[n + 1]) \rfloor, \quad (7)$$

$$s[n] = so[n] + \lfloor \frac{1}{4}(d[n - 1] + d[n] + \frac{1}{2}) \rfloor, \quad (8)$$

$$d[n] = dq[n] - \lfloor \frac{1}{16}\{9(so[n] + so[n + 1]) - (so[n - 1] + so[n + 2])\} + \frac{1}{2} \rfloor, \quad (9)$$

$$s[n] = so[n] + \lfloor \frac{1}{32}\{9(d[n - 1] + d[n]) - (d[n - 2] + d[n + 1]) + \frac{1}{2}\} \rfloor. \quad (10)$$

其中  $d[n]$  与  $s[n]$  分别表示本级高频子带与低频子带的系数幅值;  $dq[n]$  表示上 1 级低频子带奇数序列的系数幅值;  $so[n]$  表示上 1 级低频子带偶数序列的系数幅值<sup>[2]</sup>。

### 3 整数小波变换在 DSP 上的实现

DSP 芯片专门用于完成各种实时数字信息处理, 其速度比普通 CPU 快 10~50 倍。TI(Texas Instruments) 公司是世界上较大的 DSP 生产厂商之一。本文的整数小波变换就是在 TI 公司的 TMS320C6711DSP 上实现的, TMS320C6711DSP 包含一个 150 MHz 浮点处理器; 两个存储区, 即片内存储器区和片外存储器区, 且片内存储器分为 2 个高速缓冲存储器 ( $L_1, L_2$ ); 1 个直接存储器存取控制器(DMA) 及一些外部接口。CPU 内核包括 2 个寄存器堆(A 寄存器堆、B 寄存器堆), 各包含 16 个寄存器, 还有算术单元和逻辑单元<sup>[11]</sup>。TMS320C6711 框图见图 2。流水线作用是 DSP 实现高速度、高效率的关键技术之一, 它的每个周期能传送 8 个平行指令, 在每个流水线状态, 平行指令能同时被处理, 因此不同指令之间用一个固定相关的状态来处理一系列指令。但是, 跳转指令则不属于流水线问题, 所以流水线每次运行时必须清空和重装。在短滤波器情况下, 流水线内

容需要频繁更新, 这意味着长滤波器的卷积比几个短滤波器的卷积更容易优化。

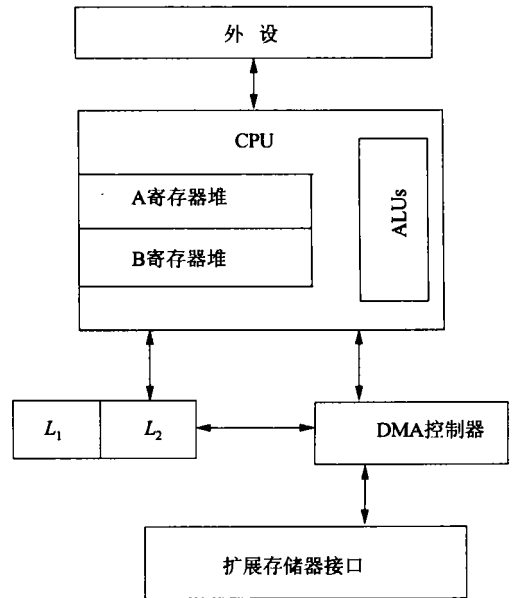


图 2 DSP 结构框图

Fig. 2 Block diagram of the DSP architecture

算法实现采用 C 语言进行编程, 因为 C 编译器能有效地对集合代码进行优化。在特殊情况下, 可采用汇编语言进行优化<sup>[11]</sup>。实验中可选用在图像处理中典型应用的滤波器: LEGall(5, 3) (LEG(5, 3)); Sweldens(13, 7) (SWE(13, 7), 算法为 2 中提到的滤波器提升结构的整数小波变换。在 CCS 编译环境下编程, 程序优化后, 加载到 DSP 工作平台上。

### 4 实验结果

对一幅图像的行列分别用 LEG(5, 3) 和 SWE(13, 7) 方法进行一层整数小波变换<sup>[12]</sup>, 将变换时间以图像的采样数为参数绘成曲线, 见图 3, 图 4。当像素点增多时, 相应的变换时间增大。当然对一幅图像的变换还包括列向, 但是实验发现列向变换时间和行向变换时间相同, 这是因为 DSP 中有高速缓冲存储器能对数据进行有效的存取。另外, 为了对提升方法的整数小波变换的运行情况有所比较, 将 FBS 的 DWT 的算法在 DSP 上实现。

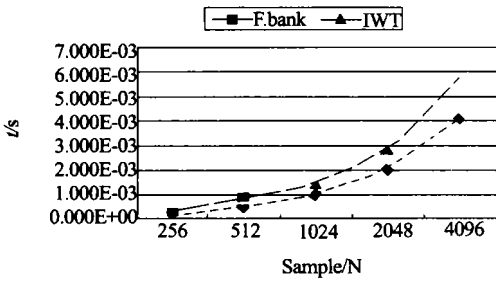


图 3 LEG(5, 3) 运行时间曲线

Fig. 3 LEG(5, 3) running time

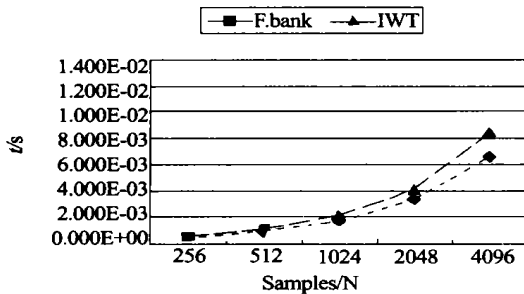


图 4 SWE(13, 7) 运行时间曲线

Fig. 4 SWE(13, 7) running time

从结果看出,对一幅 2D 的  $256 \times 256$  的灰度图像作一层分解,采用 LEG(5, 3) 滤波器并对边界

作对称延拓。IWT 算法的速率是每秒能处理 7~8 幅图像,而 FBS 方法的 DWT 每秒能处理 4~5 幅图像。IWT 的运行速度比理论上的速度慢了 10%~25%<sup>[8]</sup>,这是因为 C 编译器不能对滤波器的输出取整过程进行优化。从实验结果中可看出,不同滤波器的 IWT 在 DSP 上的运行速度不一样,这主要是受 DSP 的结构影响。因为 DSP 的最大优点是其内部的流水线结构,在短滤波器的情况下,流水线内容需要频繁更新,这意味着长滤波器的算法比短滤波器的算法更容易优化。

## 5 结 论

本文在理论上分析了基于提升方法的整数小波变换的结构及算法在硬件上的实现问题,并采用 TI 公司的 TMS320C6711 实现了这种变换核。从实验结果看到, IWT 算法比滤波器组方法的 DWT 算法在 DSP 上的运行速度快,表明 IWT 是一种运算速度快,易于硬件实现的小波变换方法。本实验结果的一项重要应用是可估计出采用整数小波变换方法时 DSP 每秒能处理图像的数量,并能评价 DSP 在图像编码中的运行情况。由于 DSP 的 C 编译器不能对取整操作进行优化,使整数小波变换在 DSP 上的运行速度比理论上预期的有所下降。下一步工作是采用 DMA 对 IWT 算法进行进一步的优化,使 IWT 在 DSP 上的运行速度有所提高。

## 参考文献:

- [1] LAZAR D, AVERBUCH A. Wavelet-based video coder via bit allocation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(7): 815-832.
- [2] VETTERLI M M, KOVAICEVIC J. *Wavelets and subband coding* [M]. Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- [3] 程正兴, 姚普选. 整数到整数小波分解与重构的现状[J]. *工程数学学报*, 2000, 17(增): 73-78.  
CHENG ZH X, YAO P X. Advances in wavelet decomposition and reconstruction that map integers to integers[J]. *Chinese Journal of Engineering Mathematics*, 2000, 17(增): 73-78. (in Chinese)
- [4] CALDERBANK A R, DAUBECHIES I, SWELDENS W, et al. *Transforms that map integers to integers* [R]. Technical Report, Department of Mathematics, Princeton University, 1996.
- [5] FIETHE B, RUFFER P, GLIEM F. Image processing for rosetta osiris[C]. *6<sup>th</sup> International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Applications, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*, Sept. 1998.
- [6] 许树新, 赵继, 王洪刚. 自由曲面数控加工中刀具破损的小波分析[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(4): 360-364.  
XU SH X, ZHAO J, WANG H G. Analysis of tool breakage in CNC manufacturing using wavelet transform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(4): 360-364. (in Chinese)
- [7] 苏绍景, 吕海宝, 李圣怡. 基于 DSP 的宽动态范围莫尔条纹计数与精密细分技术[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(2): 146-150.

- SU SH J, LU H B, LI SH Y. DSP based counting and ultra precision subdivision of Moire fringe with wide dynamic range[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2): 146-150. (in Chinese)
- [8] HAAPALA K, KOLINUMMI P, HAMALAINEN T, *et al.* Parallel DSP implementation of wavelet transform in image compression [C]. *Proc ISCAS 2000-IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Geneva, Switzerland.
- [9] YILIANG B, HOUNG JYH W, KUO G-C J, *et al.* Design of a memory scalable wavelet based image code [C]. *Proc of ICIP' 98-IEEE International Conference on Image Processing*.
- [10] DAUBECHIES I, SWELDENS W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. *J Fourier Anal Appl*, 1998, 4(3): 247-269.
- [11] Document SPRU189F.TMS320C6000 CPU and instructions set reference guide[Z]. 2000.
- [12] SWELDENS W. The lifting scheme: A customr design construction of second generation wavelet SIAM [J]. *Journal of Mathematical Analysis*, 1998, 29(2): 511-546.

作者简介: 王丽荣(1966-), 女, 辽宁沈阳人, 长春大学电子信息工程学院副教授, 吉林大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为图像处理、电视跟踪、目标识别等。E-mail: wlr661001@163.com