

# JPEG2000 小波变换器的 VLSI 结构设计

刘雷波<sup>1</sup>, 王学进<sup>2</sup>, 孟鸿鹰<sup>2</sup>, 王志华<sup>2</sup>, 陈弘毅<sup>1</sup>, 夏宇闻<sup>3</sup>

(1. 清华大学微电子学研究所, 北京 100084; 2. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 3. 北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘要:** 新一代静止图像压缩标准 JPEG2000 将离散小波变换(DWT)作为其核心变换技术, 并推荐采用推举体制(lifting)快速算法来实现. 空间组合推举体制算法(SCLA)大大降低了 lifting 的运算量. 当选用 9/7 小波滤波器时, SCLA 的乘法运算量只有 lifting 的 7/12. 本文提出了一种实现 SCLA 算法的 VLSI 结构, 降低了基于 lifting 实现的运算量, 加快了变换的速度, 减小了电路的规模. 本文的二维正反小波变换器已经作为单独的 IP 核应用于我们目前正在开发的 JPEG2000 图像编解码芯片中.

**关键词:** 离散小波变换; JPEG2000; lifting; 空间组合推举体制算法

**中图分类号:** TN406 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)11-1609-04

## A VLSI Architecture of DWT for JPEG2000

LIU Lei bo<sup>1</sup>, WANG Xue jin<sup>2</sup>, MENG Hong ying<sup>2</sup>, WANG Zhi hua<sup>2</sup>, CHEN Hong yi<sup>1</sup>, XIA Yu wen<sup>3</sup>

(1. Institute of Microelectronics, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China; 2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China; 3. Department of Electronic Engineering, BUAA, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The new still image compression standard JPEG2000 adopted Discrete Wavelet Transform(DWT) as the key transform technology and recommended to implement it with lifting algorithm. Spatial Combinative Lifting Algorithm (SCLA) based 2-D DWT with 9/7 filter requires 7/12 amount of computation the conventional lifting based implementation. This paper proposes a novel VLSI architecture to compute multilevel SCLA based 2-D DWT with 9/7 filter, which greatly speeds up the transform process and achieves higher hardware utilization. This architecture can be used as a compact and efficient core for JPEG2000 VLSI implementation and various real-time image/ video applications.

**Key words:** discrete wavelet transform(DWT); JPEG2000; lifting; spatial combinative lifting algorithm(SCLA)

### 1 引言

基于 DWT 的图像压缩方法在编码效率和复原图像质量上均优于传统的离散余弦变换(DCT)的编码方法, 目前已经被广泛的应用于许多图像压缩领域, 如 JPEG2000<sup>[1]</sup>, MPEG-4 等. JPEG2000 标准推荐采用 lifting<sup>[2]</sup>快速算法来实现 DWT. 小波变换的 lifting 算法是一种完全基于空间的小波构造方法, 主要用来构造第二代小波变换, 即本质上不能通过伸缩和平移来得到小波基序列的小波变换. 它提供的小波变换快速实现方法比传统的卷积实现算法的乘法运算量将近减少一半, 是一种快速实用的小波变换实现算法. 由本文作者之一的孟鸿鹰博士提出的 SCLA<sup>[3]</sup>是一种建立在小波变换 lifting 算法上的一种更有效的快速算法. 它在 lifting 的框架下, 从离散小波变换操作数的矩阵表示出发, 将二维小波变换的水平和垂直方向运算结合在一起考虑, 和标准的 lifting 比较, 完成双正交二维小波变换所需的乘法运算量减小了 5/12.

本文用一种新颖的 VLSI 结构, 于世界上首次完成了基于 SCLA 的二维多阶离散小波变换的 VLSI 设计. 其中, DWT 滤波器采用 JPEG2000 标准推荐的 9/7 有损小波滤波器, 分解结构采用 5 层 Mallat<sup>[4]</sup>分解结构, 边界延拓采用对称延拓方式, 变换方式采用基于行的变换方式<sup>[5]</sup>. 正变换时, 图像数据逐行从外部读入, 在整个变换过程只需读入一次. 变换后得到的小波系数直接输出给后续的编码部分. 本文的设计使用了少量的

存储器(6 行缓存)作为中间数据存储. 这部分存储器将在芯片内部用一读一写的双口同步 SRAM 实现, 无需附加任何额外的外部存储; 运算部分仅使用一个小波滤波器完成全部层的分解操作, 各分解层的操作交替进行. 本文所设计的电路与前级的图像输入部分和后级的 EBCOT 编码<sup>[6]</sup>结合在一起, 可以用 VLSI 的方式实现对图像数据进行符合 JPEG2000 标准的压缩.

### 2 SLCA 算法介绍

根据[3], 对于二维图像  $M = \{m(i, j) | i, j = 0, 1, \dots, N-1\}$ , 用 9/7 滤波器实现一层小波变换分解的表示式为:  
 $T_{N \times N} \times M \times T_{N \times N}^t = E(D(C(B(A \times M \times A^t)B^t)C^t)D^t)E^t$  (1)  
其中,  $A, B, C, D, E$  分别为相应的操作数矩阵. SCLA 从上式的中间开始向两边计算, 依次对矩阵  $A, B, C, D, E$  进行乘法计算. 对矩阵  $A, B$  运算的说明如图 1(a), (b)所示.

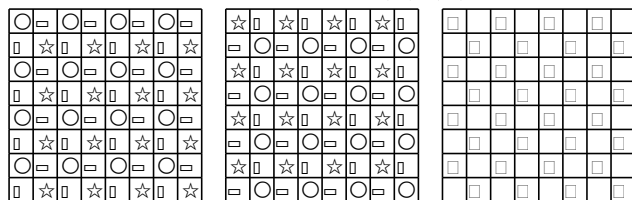


图 1 矩阵 A, B, C, D, E 运算的图标说明  
(a) 矩阵 A, C 的运算; (b) 矩阵 B, D 的运算; (c) 矩阵 E 的运算示意

在图 1(a)和(b)中,符号○处的元素值在变换前后保持不变;符号□处的元素新值由水平相邻的元素相加后乘以参数(A乘以 $\alpha$ , B乘以 $\beta$ ),再和该元素的旧值相加得到;符号□处的元素新值由竖直相邻的元素相加后乘以参数,再和该元素的旧值相加得到;符号☆处的元素新值由水平相邻元素的旧值和竖直相邻元素的新值相加后乘以参数,再和该元素的旧值相加得到.矩阵 C, D 的运算与 A, B 的相似,只是将所乘的参数  $\alpha$  和  $\beta$  分别替换为  $\gamma$  和  $\delta$ . 矩阵 E 的运算如图 1(c)所示,其中符号□表示该元素的新值等于其旧值乘以  $\eta$ , 符号□表示该元素的新值等于其旧值乘以  $1/\eta$ . 参数的具体数值可以参考[3].

至此,就完成了对二维图像 M 的一层小波分解,重排运算结果,将小波系数划分为 4 个子带 LL, HL, LH, HH, 然后,算法可以对 LL 子带继续进行下一层的分解.

当选用 9/7 滤波器,用标准 lifting 和 SCLA 对二维图像 M (大小为  $N \times N$ ) 进行 1 层和 J 层小波分解所需的乘法次数如表 1 所示.

表 1 lifting 和 SCLA 的乘法次数比较

算法	分解一层时的乘法次数	分解 J 层的乘法次数
lifting	$(N/2 \times 4 + N) \times 2N = 6N \times N$	$2 \times (4 - 4^{-J+1}) \times N \times N$
SCLA	$3N \times N + N \times N/2 = 3.5N \times N$	$7/6 \times (4 - 4^{-J+1}) \times N \times N$

### 3 基于 SCLA 的正反小波变换器的 VLSI 结构

本文的小波变换采用了 9/7 小波滤波器,该滤波器在较低比特率下具有最佳的性能,是 JPEG2000 标准推荐的有损压缩小波滤波器.小波分解采用 5 层 Mallat 分解的结构,该方式是最常用的分解方式,也是 JPEG2000 标准缺省的分解方式.边界延拓部分采用对称方式.用通常的方式进行二维小波变换需要存储整帧图像,而整帧图像数据量比较大,通常只能存储于片外,这是我们所不希望的.针对这个问题,本文将基于行的变换方式同 SCLA 算法有效的结合起来,这样,只需要在片内缓存 6 行数据就可以完成对整帧图像全部层的分解运算.基于 SCLA 的 DWT 的系统结构如图 2 所示.

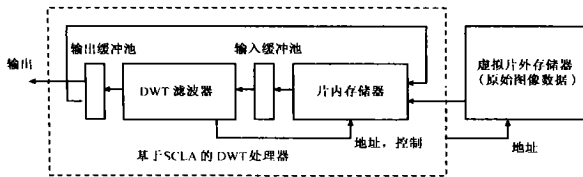


图 2 基于 SCLA 的 DWT 系统结构框图

处理器主要由 DWT 滤波器,输入,输出缓冲池以及片内存储器四部分组成.其中,DWT 滤波器用于完成所有层的分解操作;片内存储器由 8 片一读写的双口同步 SRAM 组成,用于 6 行数据的存储;输入,输出缓冲池分别由 12 个寄存器组成,用于缓冲在滤波器和内存之间流动的数据.为了表述方便,我们画出用于存储原始图像的片外内存,它并不是属于处理器的一部分.在我们的实际设计里,原始数据可以从图像采集设备以行的方式直接送入处理器,不需要在片外开辟任何额外的缓存.

### 3.1 DWT 滤波器设计

根据公式(1),采用 9/7 滤波器实现 SCLA 时,二维小波变换被分解成为和矩阵 A, B, C, D, E 的乘法运算.可以把这些矩阵乘法运算划分成如图 3(a)所示的  $2 \times 2$  运算单元(图中阴影部).由于对每个运算单元进行操作时,还需要用到左边一列和上边一行的数据,因此,此运算单元实际上包含了一个  $3 \times 3$  的工作区域.

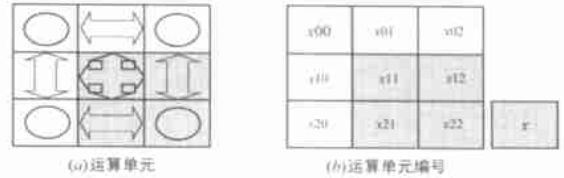


图 3 A, B, C, D 矩阵的  $3 \times 3$  运算单元及其编号

对矩阵 A, B, C, D 的  $3 \times 3$  工作区域按照图 3(b)所示的方式编号,其中 X 代表矩阵 A, B, C 或 D, x 用于存储  $x_{10}$  的旧值.记  $\lambda$  为当前运算所使用的常数值,即  $\lambda = \alpha, \beta, \gamma$  或  $\delta$ , 为完成对当前运算单元的操作,依次进行公式(2)的 3 步运算

$$\begin{cases}
 (1) x_{21}' = x_{21} + \lambda \times (x_{20} + x_{22}) \\
 \text{(其中, } x_{21}' \text{ 代表 } x_{21} \text{ 的新值)} \\
 (2) x_{11}' = x_{11} + \lambda \times (x + x_{12} + x_{01}' + x_{21}') \\
 \text{(其中, } x \text{ 已经存储了 } x_{10} \text{ 元素的旧值;} \\
 x_{11}', x_{01}', x_{21}' \text{ 分别代表了 } x_{11}, x_{01}, x_{21} \text{ 的新值)} \\
 (3) x' = x_{12}, x_{12}' = x_{12} + \lambda \times (x_{02} + x_{22}) \\
 \text{(其中, } x' \text{ 用于存储 } x_{12} \text{ 的旧值;} x_{12}' \text{ 代表 } x_{12} \text{ 的新值)}
 \end{cases} \quad (2)$$

矩阵 E 的运算单元比矩阵 A, B, C, D 的要简单许多,它只包括一个  $2 \times 2$  的工作区域,如图 4(a)所示.并且,由于 E 的运算是将矩阵中的数据与常数相乘,并将得到的结果仍放在当前位置上,因此可以原地进行,无需特别的考虑.采用图 4(b)所示的编号方式,矩阵 E 的运算可以用公式(3)来表示.

$$\begin{cases}
 (1) e_{00} = e_{00} \times \eta \\
 (2) e_{11} = e_{11} \times 1/\eta
 \end{cases} \quad (3)$$

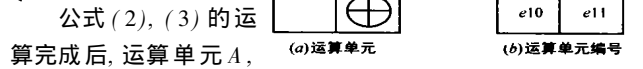


图 4 矩阵 E 的运算单元及其编号

公式(2), (3)的运算完成后,运算单元 A, B, C, D, E 和输入,输出缓冲池里的数据会被同时左移两列,以继续当前行下 2 列数据的操作.这个过程一直持续到当前行的操作结束之后,再开始下一行的操作.

### 3.2 DWT 滤波器控制

为完成全部层的 SCLA 运算,作为核心控制单元的 DWT 滤波器必须有效的组织起对片内存储器以及输入,输出缓冲池的访问时序.如前所述,片内存储器用于存储层分解过程中的 6 行中间数据,而缓冲池则在滤波器和片内存储器之间起重要的接口的作用.DWT 滤波器对存储器和缓冲池的主要控制过程如图 5 所示.

DWT 滤波器由 5 个核心运算单元组成.其中矩阵 A, B, C, D 运算单元工作区域的大小均为  $3 \times 3$ .它们在滤波器中的位置不同,运算方法完全相同,如公式(2)所示;矩阵 E 运算

单元的大小为  $2 \times 2$ , 运算方法如公式(3)所示. 数据在这 5 个运算单元里运算流动时, 就好象这 5 个方框在滤波器里有顺序的滑动. 输入, 输出缓冲池分别由 12 个寄存器组成(图 5 中的每个小方格代表一个寄存器), 如果小波系数的实现精度为  $Y$  比特, 则这 24 个寄存器均为  $Y$  比特.

片内存储器由 8 片一读写的双口同步 SRAM 组成, 用于 6 行数据的存储. 其中 Line0~ Line3 用于存储 level4~ level0 (level4 代表最顶层分解级, level3~ level0 代表的分解级依次递减) 分解过程中的 4 行中间数据, Line4<sub>LL</sub> 和 Line5<sub>LL</sub> 用于存储 level3~ level0 分解所需的 LL 数据, Line4\_Level4 和 Line5\_Level4 仅用于存储 level4 分解过程中的 LL 数据, 即原始图像数据. 由于对这些 SRAM 采用了基于行的组织方式, 因此很容易根据当前处理行号和分解层号来寻址. 设图像块的大小为  $N \times M \times W$  比特, 小波系数实现精度为  $Y$  比特, 分解级数为  $L$ , 则 DWT 内部 SRAM 存储的总比特数如式(4).

$$(8 - 2^{-L+3})NY + (2 - 2^{-L+2})NY + 2NW$$

$$= (10 - 2^{-L+2} - 2^{-L+3})NY + 2NW \quad (4)$$

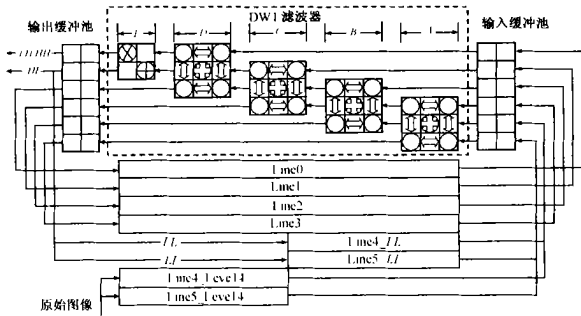


图 5 DWT 滤波器对片内存储器和缓冲池的主要控制过程  
为完成全部层的 SCLA 分解, 作为核心控制单元的 DWT 滤波器必须有效的组织起对片内存储器以及输入, 输出缓冲

池的访问时序. DWT 滤波器的主状态机共分为 3 个状态. 状态 1 和状态 2 同时完成了以下 3 种操作:

(1) DWT 滤波器从片内存储器读出 2 列新数(每个时钟读出 1 列, 每列 6 个新数, 共 12 个新数), 并写入输入缓冲池缓存;

(2) DWT 滤波器对滤波器里的旧数进行运算单元 A, B, C, D, Eq 所对应的 SCLA 运算;

(3) DWT 滤波器从输出缓冲池写出 2 列结果(每个时钟写出 1 列, 每列 6 个数据, 共 12 个数据). 其中, 8 个数据属于当前层分解过程的中间数据, 它们被上移 2 行之后写回片内存储器, 用于当前层下一行的分解运算; 剩余的 4 个数据由 LL, HL, LH 和 HH 组成, 其中, LL 被写回片内存储器 Line4<sub>LL</sub> 或 Line5<sub>LL</sub>, 用于下一层的分解操作, 而 HL, LH 和 HH 则被直接输出给 EBCOT.

在状态 3, 完成如下操作:

(4) 将运算单元和输入, 输出寄存器里的所有数据同时左移 2 列, 转入状态 1; 在进行以上 4 步运算的同时, 原始数据被不断的串行送入 Line4\_Level4 或 Line5\_Level4.

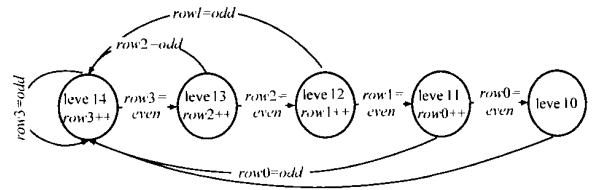


图 6 层分解的过程

由于 DWT 采用了基于行的变换结构, 且只用一个滤波器完成所有层的分解, 因此各层分解只能穿插进行, 每层分解需要有各自的 6 行缓存结构. 层分解过程如图 6 所示, 其中, 变量 row 4~ row 0 依次记录 level4~ level0 个分解层所处理的当前行号, 初始值均为 0.

□ □ □ □ □ □

收件人地址:

收件人姓名:

《电子学报》编辑部  
北京 165 信箱 邮编: 100036

### 4 性能

选用台湾联华电子公司(UMC) 0.25 $\mu$ m 工艺库, 在SYNOPTIC 工具中对正反变换合并后的 Verilog HDL 代码进行综合, 得到核心逻辑面积(不包括片内存储器)约为 27000 个等效门(标准 2 输入与非门), 关键路径延迟为 7.76n. 采用 CANNONCE 工具进行自动布局布线, 得到核心逻辑的芯片面积大约为 0.78mm<sup>2</sup>. 用 20MHz 的系统主时钟和 Lena 图像(512 $\times$  512 $\times$  8 比特)对综合的结果做门级后仿真(9/7 滤波器, 5 层 Mallat 分解), 15.59ms 可以完成一帧图像的正变换, 16.01ms 可以完成一帧图像的反变换. 仿真的结果与软件模拟的结果相吻合. 根据这个仿真结果, 如果将系统主时钟提高到 100MHz, 本设计每秒可以处理 28 帧大小为 1800 $\times$  1600 $\times$  24 比特的彩色图像. 目前, 本设计已经通过了 FPGA 验证, 准备 2002 年中旬流片.

### 5 结论

本文以应用于 JPEG2000 图像压缩的二维离散正反小波变换的 VLSI 的结构设计和实现为研究对象, 依据二维离散小波变换的 SCLA 算法和基于行的小波变换思想, 采用 9/7 小波滤波器和 5 层 Mallat 分解方式, 首次完成了基于该算法的正反小波变换的 VLSI 结构设计. 由于 SCLA 的乘法运算量只有传统的 lifting 算法的 7/12, 因此, 用 VLSI 实现时可以大大减小硬件资源的开销, 加快处理的速度. 如果采用 100MHz 的系统时钟, 本设计可以每秒处理 28 帧大小为 1800 $\times$  1600 $\times$  24 比特的彩色图像.

由于采用了 JPEG2000 标准推荐的 9/7 有损压缩小波滤波器和标准的 Mallat 分解方式, 若将本文实现的正反小波变换与后续的 EBCOT 编解码部分结合起来, 可以用 VLSI 实现

像数据的符合 JPEG2000 标准的压缩和解压缩. 除此之外, 作为高层设计的软 IP 核, 本设计具有很强的可扩展性, 可以应用在许多需要实时图像处理的领域, 如视频会议, 远程监控, 数码相机等.

### 参考文献:

[ 1 ] ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N1646R, 16, March 2000. JPEG2000 part 1 final committee draft version 1.0[ S].  
 [ 2 ] I Daubechies, W Sweldens. Factoring wavelet transforms into lifting schemes [ J]. The J. of Fourier Analysis and Applications, 1998, 4: 247 - 269.  
 [ 3 ] H Meng, Z Wang. Fast spatial combinative lifting algorithm of wavelet transform using the 9/7 filter for image block compression [ J]. Electronics Letters, 2000, 36 (21): 1766- 1767.  
 [ 4 ] S Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [ J]. IEEE Trans. Pattern Anal. And Machine Intel, 1989, 11(7): 674- 693.  
 [ 5 ] C Chrysafis, A Ortega. Line based, reduced memory, wavelet image compression [ J]. IEEE Tran. On Image Processing. 2000, ( 3): 378- 389.  
 [ 6 ] D Taubman. High performance scalable image compression with EBCOT [ J]. IEEE Trans. Image Processing. 2000, 9( 7): 1158- 1170.

### 作者简介:



刘雷波 男, 1975 年 11 月出生于重庆, 1999 年在清华大学工程系获得无线电技术与信息系统的学士学位后, 继续在清华大学微电子所攻读集成电路设计专业博士学位. 研究方向包括小波变换, 视频压缩, 数字集成电路设计和信号处理等.

## 征 订 启 事

为了推动我国计算机软件和网络技术的发展, 更好地为迅猛发展的信息产业服务, 《电子学报》编辑部将于 2002 年底编辑出版《计算机软件和网络技术》专刊. 本专刊主要内容涉及计算机软件和网络理论与技术研究的诸多方面, 作者对许多国际、国内的热点问题发表了自己的观点和看法. 这对从事电子研究及教学的学者专家均有很高的参考价值. 每册定价 25 元. 凡中国电子学会会员或会员所在单位订阅价格为 20 元(包含邮资费), 欢迎广大会员订阅. 请订阅者填写订阅单和邮寄标签, 并速寄回《电子学报》编辑部王辉同志收. 同时将订刊款项由邮局汇至北京 165 信箱《电子学报》编辑部王辉同志收(邮编: 100036, 电话: 010- 68279116, 68285082). 发票和专刊一并寄回. 订阅日期到 2003 年 3 月 31 日止.

《电子学报》编辑部

### 《计算机软件与网络技术》专刊订阅单

年 月 日

订阅人/单位			
通信地址			
联系电话		邮编	
订阅数量	共	本	
订阅款项共	佰 拾 元整, 已于	年 月 日	从邮局汇款至北京 165 信箱《电子学报》编辑部 王辉同志收