

一种新的高速二维离散小波变换器结构

曹 辉, 卢 强, 黄士坦

(西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710075)

摘 要: 提出了一种应用于 JPEG2000 静态图像编码系统的二维离散小波变换(2D-DWT)单元的 FPGA 实现. 分析了 2D-DWT 算法的特点, 提出了一种直接进行二维小波变换的高速算法, 克服了传统二维小波变换算法对存储器的频繁访问的缺点. 同时, 硬件结构具有较高的并行度和吞吐率; 运用流水线技术, 进一步提高了系统性能, 每个时钟能输出 4 个小波系数. 该结构对于 $N \times N$ 的图像, 处理速度仅需要 $(N/2)^2$ 个时钟周期. 设计经过 FPGA 验证, 可用于实时图像压缩系统中.

关键词: JPEG2000; 图像压缩; 小波变换; 并行; 流水线

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)12-0057-05

A New Architecture for High-speed 2-Dimension Discrete Wavelet Transform

CAO Hui, LU Qiang, HUANG Shi-tan

(Xi'an Microelectronic Technology Institute, Xi'an 710075, China)

Abstract: A new architecture of the 2-dimension discrete wavelet transform(2D-DWT) is implemented on the FPGA for the JPEG2000 still image coding system. The feature of the 2D-DWT has been analyzed and a straightforward 2-dimension transform algorithm is employed to built the architecture reducing the frequency of the memory read/write in traditional implementation. Meanwhile, the structure got the high through-put, four wavelet coefficients per clock, high parallelism and great performance improvement by the pipeline. Only $(N/2)^2$ clock periods will be needed when processing a $N \times N$ image. Experimental result shows that the proposed architecture is suitable for the real-time image compression application.

Key words: JPEG2000; image compression; wavelet transform; parallel; pipeline; FPGA

1 引言

JPEG2000 静态图像压缩标准是由 ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG1 联合提出的新一代静态图像压缩标准, 用于对二值图像、灰度图像、彩色图像和多分量图像的压缩^[1], 支持无损压缩和有损压缩两种模式. JPEG2000 作为新一代的图像压缩标准, 采用了一系列先进的编码算法达到整体较高的压缩性能. 其中核心的技术有二维离散小波变换、嵌入式截断编码、自适应算术编码等^[1].

二维小波变换(2-D DWT)作为 JPEG2000 的核心技术, 能对整个图像进行多分辨率分析, 去除图像

像素间的信息冗余^[2]. 取代传统图像压缩标准 JPEG 中的块为单位的离散余弦变换(DCT)变换, 而 DCT 变换在较低码率下会产生分块效应, 导致图像失真较大.

二维小波变换通过分别对行(列)、列(行)顺序进行一维小波变换来实现. 一维小波变换由卷积算法实现^[3]. Wim. Sweldens 等人提出了一种提升算法, 任何离散小波变换都可以分解成为一系列的提升步骤.

传统的二维小波变换有两种实现结构^[4]: (1)串行结构. 即先进行行(列)变换, 再进行列(行)变换; (2)并行结构. 先进行行(列)变换, 待列(行)变换需

要的相关数据足够后,立即启动列(行)变换.串行结构优点是控制逻辑简单,但是需要大量的中间缓存,对于资源有限的器件,缓存需要由外部存储器实现,降低了处理速度,且需要读写两次缓存,增加了系统功耗,硬件利用率只有 50%.并行结构能减少缓存的使用,并行处理提高了计算速度.但是对于每个缓存块都要有读写逻辑控制,造成控制单元设计复杂,且并行结构不易组织成流水线.以上两种结构将二维的小波变换分成连续的两个一维小波变换实现,限制了性能的提升.

本文设计从二维小波变换运算整体考虑,提出了一种能直接进行二维小波变换的结构,由于内部采用 9 条并行计算通道,每个时钟能输出 4 个数据,具有较高的吞吐率,优于已有的二维小波变换结构.

2 算法设计

对 JPEG2000 中推荐的(5,3)小波,探讨了该算法和结构的实现方式.

5/3 小波的分解滤波器组为 $h = \left(-\frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}, -\frac{1}{8}\right)$, $g = \left(-\frac{1}{2}, 1, -\frac{1}{2}\right)^{[4]}$. 用提升算法的多项式分解矩阵为

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

其中,前一个矩阵为更新矩阵,后一个矩阵为预测矩阵.时域表示为

$$(1) y_{2i+1} = x_{2i+1} + \alpha(x_{2i} + x_{2i+2}) \cdots \cdots \text{预测};$$

$$(2) y_{2i} = x_{2i} + \beta(y_{2i+1} + y_{2i+3}) \cdots \cdots \text{更新}, \alpha = -1/2, \beta = 1/4.$$

对于图像 M (大小为 $n \times n$),表示为一个行向量 $M = (X_0^T, X_1^T, X_2^T, \cdots, X_{n-1}^T)$, X_i^T 为图像的每一列数据组成的行向量.对 M 的二维离散小波变换,可以按以下算法步骤实现.

第一步:对图像的每一列,提升算法的一维小波变换表示为: $Y_i^T = BAX_i^T$, Y_i^T 为按列的一维小波变换的结果.

图像 M 经过按列的一维小波变换,得到的中间结果为

$$\begin{aligned} M' &= (Y_0^T, Y_1^T, Y_2^T, \cdots, Y_{n-1}^T) \\ &= (BAX_0^T, BAX_1^T, BAX_2^T, \cdots, BAX_{n-1}^T) \\ &= BA(BAX_0^T, BAX_1^T, BAX_2^T, \cdots, BAX_{n-1}^T) \\ &= BAM \end{aligned}$$

第二步:对 M' 按行进行一维小波变换.用矩阵

表示为

$$N = BAM'^T = BA(BAM)^T = BAM^T A^T B^T$$

式中, N 为变换后的小波系数矩阵. B 和 A 矩阵分别是包含了镜像延拓过程的更新和提升矩阵

对图像 M 先行后列的变换和先列后行的变换结果是一致的.所以 $N = BAMA^T B^T$.对矩阵计算的次序调整: $N = B(AMA^T)B^T$,将对图像 M 进行基于提升的二维离散小波变换分解成两个步骤:

(1) 对图像的二维提升过程 AMA^T ;

(2) 对中间结果的二维更新过程 $BM_{\text{temp}}B^T$, ($M_{\text{temp}} = AMA^T$).

直接用硬件实现大规模的矩阵运算复杂度高,而且消耗大量的硬件资源.将矩阵 B 和 A 按如下图的形式划分成小的矩阵块,降低计算复杂度.每个矩阵块有相同的格式,可以用相同的硬件重用,减少资源的消耗:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & & & \\ \alpha & 1 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & 1 & \alpha \\ & & & \alpha & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 2\beta & & & \\ & 1 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & 1 & \beta \\ & & & \beta & 1 \end{bmatrix}$$

将 2×2 的分块矩阵块扩展为 3×3 的矩阵块,仅考虑矩阵中的非零矩阵块,可以得到如下的四种矩阵块:

$$p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha & 1 & \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, p_{\text{special}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2\alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \beta & 1 & \beta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, u_{\text{special}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2\beta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, p 和 u 分别为预测和更新矩阵, p_{special} 和 u_{special} 分别对应于边界延拓情况时的特殊处理.对矩阵 B 和 A 的分别分块,有一行和一列的错位.所以计算窗口如图 1 所示.

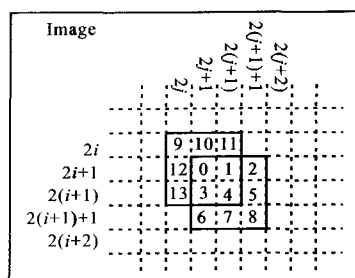


图 1 二维小波变换计算窗口

计算过程分成两步: (1) 预测运算过程 pmp^T —— 3×3 的粗线矩阵窗口; (2) 更新运算过程

u_{nu}^T —— 3×3 的细线矩阵窗口. 计算完成后,可以同时得到4个子带系数. 完成一次计算需要14个数据. 将计算过程中的数据缓存后续计算,将位置2,5的计算结果缓存用于下一次窗口位置12,13的计算,即 $(2,5)_{i-1} \rightarrow (12,13)_i$, i 表示当前计算,同样 $(6,7,8)_{j-1} \rightarrow (9,10,11)_j$, j 表示下两行运算. 这样计算过程中只需要4个外部数据输入.

计算过程按行扫描数据,以2行2列为单元,对图像Z字形扫描计算. 完成当前窗口计算后,计算窗口向右滑动两列,直到处理完当前两行数据后,从连续的后两行自左向右扫描计算.

处理一幅 $N \times N$ 的图像,仅需要 $(N/2)^2$ 个时钟周期. 本文提出的算法同样适用于长宽不等的图像的二维小波变换.

3 硬件实现

本设计实现一个能连续进行1~5层二维离散小波变换的结构. 设计划分成控制单元设计和数据通路设计,整体结构如图2所示.

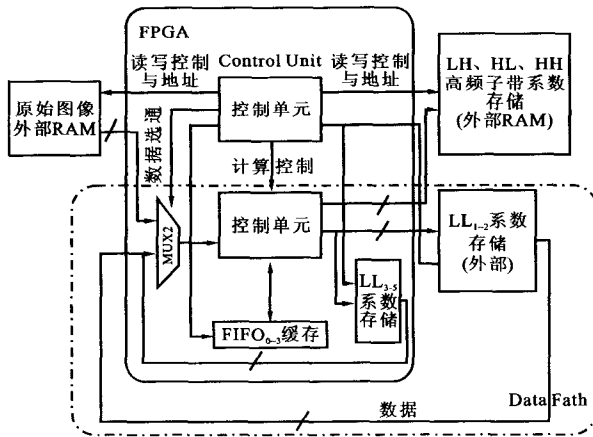


图2 二维小波变换系统设计框图

3.1 控制单元

控制单元由两层状态机控制实现. 分别为主控状态机和从控制状态机,如图3所示.

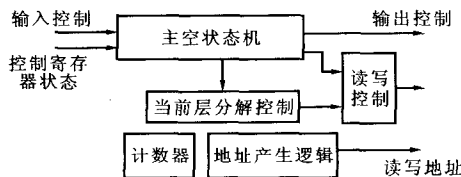


图3 控制单元框图

主控状态机(图4)实现1~5层连续小波变换的状态切换,实现小波变换的多级分解.

从控制状态机(图5)完成对一层离散小波分解的控制. 产生状态转移控制、数据选择信号、系数缓

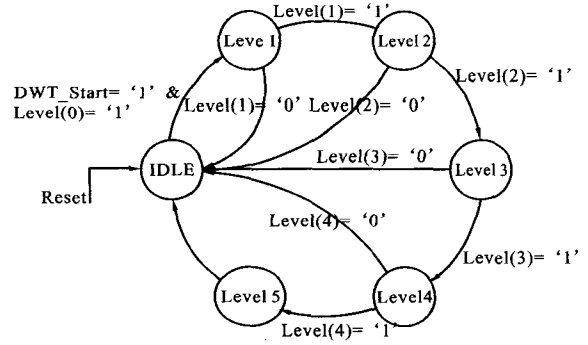


图4 主控状态机

存读写使能信号和地址信号. 从控制机有4个状态. 系统初始化复位或结束当前层变换后,处于空闲状态. 当主控状态机启动当前层分解后,控制从外部原始图像RAM中(Level 1变换)或者 $LL_{Level-j}$ 系数缓存中($Level_j, 2 \leq j \leq 5$)读入一行数据到内部FIFO中. 初始化完成后进行连续的小波变化,每一个时钟从外部原始图像RAM中或内部 $LL_{Level-j}$ 系数缓存中读入四个数据,从内部FIFO0~3中读出四个缓存数据,同上一个时钟计算窗口中缓存的6个数据组成新的计算窗口,计算出4个小波系数,并缓存相关数据用于下一次计算. 小波变换结束后进入Delay状态,等待主控状态机结束当前层变换,复位内部逻辑,启动下一层分解.

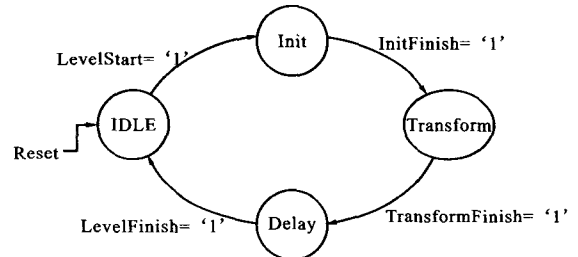


图5 从控制状态机

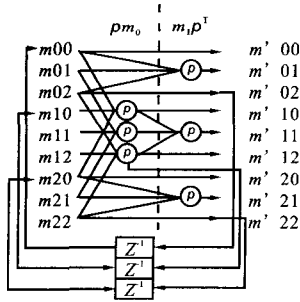
3.2 数据路径

数据路径完成小波变换的系数计算和系数存储. 分成计算单元和存储两部分. 完成图像数据的1~5层连续小波变换和小波系数的存取.

计算单元实现滤波窗口计算. 计算过程中的乘法运算可以通过移位逻辑实现. 考虑到边界处理时的特殊情况 $p_{special}$ 和 $u_{special}$,通过多路选择器选择输出结果.

pmp^T 计算单元的结构如图6所示.

为 $m' = pmp^T$ 过程中的计算节点,因为有 p 和 $p_{special}$ 两种情况,需要用二选一路选择器选择输出结果. 为减少加法和移位单元的硬件资源消耗,在数据输入端加入多路选择器,将计算的结果输出,电路

图6 pmp^T 计算单元结构

减少为2个加法器、1个移位单元和1个二选一多路选择器。硬件结构如图7所示。

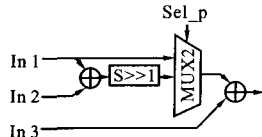


图7 硬件结构

$um'u^T$ 计算单元的结构和 pmp^T 计算单元的结构相同,只是计算节点有差异, $um'u^T$ 过程中的计算节点,硬件结构如图8所示。

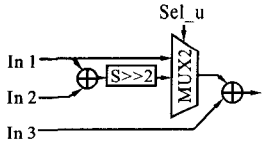


图8 硬件结构

计算单元的整体结构如图9所示。

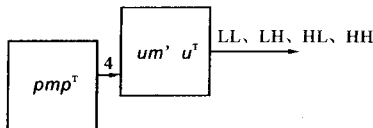


图9 计算单元整体结构

由于要进行连续的五层小波分解,需要用缓存将中间的LL低频子带结果存储,以便连续进行下一层的小波变换。

同时,每层变换产生的3个高频子带系数LH、HL和HH也要存储起来,以便于和后级嵌入式截断编码集成。对每个高频子带分配一个存储块,每个存储块按每一次层变换后的子带数据量,分成5个页面,分别由页标记位实现定位。

3.3 流水线设计

本设计中关键路径的长度为

$T = T_{LL_i} (0 \leq i \leq 5)_{\text{read}} + T_{\text{MUX2}} + T_{pmp^T} + T_{um'u^T}, T_{LL_i} (0 \leq i \leq 5)_{\text{read}}$ 为数据读取时间, T_{MUX2} 为二选一多路选择器延迟, T_{pmp^T} 为 pmp^T 预测单元计算时延, $T_{um'u^T}$ 为 $um'u^T$ 更新单元计算时延。将

pmp^T 单元进一步划分为 $m_1 = pm_0$ 和 $m_2 = m_1 p^T$ 两步运算, $T_{pmp^T} = T_{pm_0} + T_{m_1 p^T}$, T_{pm_0} , $T_{m_1 p^T}$ 的时延分别是一个10位加法器和一个二选一选择器的时延;同样将 $um'u^T$ 计算划分为 $m_3 = um_2$ 和 $m_4 = m_3 u^T$ 两步运算。通过插入五级流水线,关键路径缩短为 $T' = \text{Max}\{T_{LL_i} (0 \leq i \leq 5)_{\text{read}}\} + T_{\text{MUX2}}, T_{pm_0}, T_{m_1 p^T}, T_{um_2}, T_{m_3 u^T}$ 。

将控制单元和数据路径集成,能够实现五级流水线的连续小波变换的整体设计结构如图10所示。

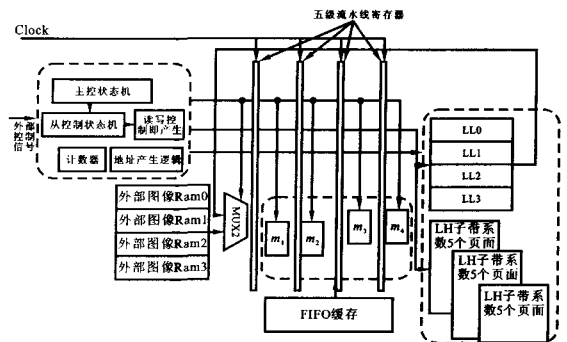


图10 五级流水线设计系统结构

4 仿真结果及分析

用VHDL语言描述了本设计的硬件实现。用Matlab编写小波重建程序,对仿真结果进行验证,能完全重建出原始图像。采用 $512 \times 512 \times 8$ bit 的标准灰度Lena图像,使用Spartan3 xc3s1000 FPGA实验平台进行验证,用ISE 9.2完成综合、编译和布局布线。资源使用结果如表1所示。

表1 小波变换单元资源使用

Device Utilization Summary			
Logic Utilization	Uses	Aviliable	Utilization/%
Number of Slices Flip Flop	730	15 360	4
Number of 4 input LUTs	920	15 360	5
Number of FIFO16/RAMB16s	8	24	33
Number of Occupied Slices	679	7 680	8

分别选用 $512 \times 512 \times 8$ bit 的灰度Lena图像和 $1024 \times 1024 \times 8$ bit 的灰度Lena图像,系统工作频率50 MHz。对Lena图像连续五层小波分解后的结果正确。

本文提出的结构和基于传统设计方法处理速度比较如表2所示。

可见本文的设计完全能满足实时处理的要求,具有较高的处理性能。

表 2 处理速度对比

图像大小	结构	平台	时钟数	处理性能/ (幅/s)	处理时间/ ms	工作频率/ MHz
512×512×8 bit	串行结构 ^[5]	TMS320C6204 DSP	2 896 192	69	—	—
	本文结构	Spartan3 xc3s1000 FPGA	59 769	836	1.20	50
1024×1024×8 bit	并行结构 ^[6]	Altera SP1S25 FPGA	—	—	18.18	45
	本文结构	Spartan3 xc3s1000 FPGA	350 449	142	7.01	50

5 结束语

本文提出了一种新的二维离散小波变换结构,完成一层二维离散小波变换只需对存储器读写一次.算法兼顾速度和吞吐率的考虑,采用内部并行计算,相比传统二维小波变换,吞吐率提高了2倍,同时硬件利用率也达到了100%.算法结构灵活,可以配置成多级流水线.

提出的二维小波变换结构,可应用于嵌入式设备、移动设备等实时图像编码系统中,为实时压缩编码提供了有利条件.

参考文献:

[1] ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1. JPEG 2000 part I final committee draft version 1.0[S/OL]. [2009-09-01]. <http://www.jpeg.org/public/fcd15444-1.pdf>.
[2] 王向阳,崔永瑞,杨红颖,等.基于自适应小波变换的嵌入图像压缩算法[J].微电子学与计算机,2005(2):122-124.
[3] Stephane G, Mallat A. Theory for multiresolution signal

decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7):674-693.
[4] Tinku Acharya, Chaitali Chakrabarti. A survey on lifting-based discrete wavelet transform architectures[J]. Journal of VLSI Signal Processing, 2006, 42:321-339.
[5] 兰旭光,郑南宁,杨魁志,等. JPEG2000 并行阵列式小波滤波器的 VLSI 结构设计[J]. 电子学报, 2004, 32(11): 47-50.
[6] 孙少林,柴春领,张兆东,等.两种基于独立块的二维提升小波算法在 TMS320C6204 平台上的实现[J]. 军事通信技术, 2006, 27(4):45-48.

作者简介:

曹 辉 男,(1984-),硕士研究生.研究方向为数字图像处理, SOC 设计.
卢 强 男,工程师.研究方向为嵌入式计算机系统结构、数字图像处理、SOC 设计.
黄士坦 男,研究员,博士生导师.研究方向为嵌入式计算机系统结构、高性能计算、数字图像处理、SOC 设计.

(上接第 56 页)

层结构的索引有助于检索及浏览.但是传统凝聚算法的计算性复杂,资源消耗多.为了减少存储空间和计算时间量,本文提出了一种先利用神经网络的方法对数据进行预处理得出初始聚类结果,从而进行聚类,实验表明改进算法有效可行.

参考文献:

[1] Sambasivam S, Theodosopoulos N. Advanced data clustering methods of mining web documents[J]. Issues in Informing Science and Informaion Technology, 2006, 8 (3):563-579.
[2] 马晓春,高翔,高德远.聚类分析在入侵检测系统中的应用研究[J].微电子学与计算机,2005,22(4):134-136.
[3] 李朝健,李朝鹏,李肯立.基于最小生成树的并行分层聚类算法[J].微电子学与计算机,2008,25(9):196-198.
[4] 钱晓凌,王金梁.基于改进 ART2 算法的数据聚类方法

[J]. 兰州交通大学学报,2008,27(6):119-123.
[5] Carpenter G A, Grossberg S. ART2: stable self-organization of pattern recognition codes for analog input patterns[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Neural Networks, San Diego. New York: IEEE, 1987.
[6] Kantardzic M. Data mining concepts, models, methods and algorithms[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
[7] 李朝鹏,李肯立.基于分层聚类的并行数据预处理算法[J].微电子学与计算机,2007, 24(10):187-189.
[8] 段霞霞,刘彦明.基于 ART2 改进算法的故障聚类研究[J].计算机工程与应用,2008, 44(15):56-57.

作者简介:

史变霞 女,(1980-),硕士研究生.研究方向为数据挖掘、图像处理.
张明新 男,(1962-),博士,教授.研究方向为数据库与数据挖掘、视频图像检索、嵌入式.