

# 小波变换器的改进及其在红外图像压缩中的应用<sup>\*</sup>

刘晓明 黄智勇 史剑锋  
(重庆大学通信工程学院 重庆400044)

**摘要** 本文提出了一种改进型的小波变换器结构,与标准的 JPEG2000小波变换器相比,节省1/2的乘法器和1/3的存储器,并介绍了该变换器在红外图像压缩系统中的应用。

**关键词** 离散小波变换 图像压缩 红外线 JPEG2000 FPGA

## An Improved Architecture of DWT and the Application in Infrared-Image Compression

LIU Xiao-Ming SHI Jian-Feng HUANG Zhi-Yong  
(School of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract** In this paper, a new architecture of DWT is brought forward, which can reduce multiplication by 1/2 and reduce memory by 1/3, meanwhile, its application in infrared-image compression system is introduced.

**Keywords** Discrete wavelet transform, Image compression, Infrared, JPEG2000, FPGA

### 1 引言

红外成像仪可以将人眼不可见的温度分布图(红外波段0.9~14微米)通过光电转换成人眼熟悉的灰度图像或者是人工彩色图像,这一个光电转换过程扩大了人眼的光谱相应波段,增加了人获取信息的能力。另外,红外波段具有较强的穿透烟雾的能力,因此在烟雾弥漫的火灾现场红外成像仪可以发挥其独特的作用。扩频无线通信具有抗干扰性和保密性等优点,将红外成像与扩频通信技术有机结合而成的远程红外监视器能广泛应用于消防预警、火灾现场的远程指挥以及军队夜间指挥等领域。系统框图如图1所示。

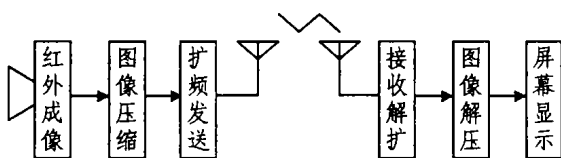


图1 远程红外监视器系统图

图像信息数据量大无法在容量相对较小的无线信道中实时传输,图像信息存在较大的数据冗余,可以采用图像压缩技术减少数据量,节省无线信道的带宽开销。传统的图像压缩技术几乎都是基于离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)算法来进行的,其优点是算法简单容易实现,但压缩比不高,当比特率较低时会出现方格效应。为了更有效提高压缩比,本项目的红外图像压缩采用离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)作为核心变换器,它能有效提高图像的压缩比,特别是低比特率时仍有较好的图像质量而不出现方格效应。目前最新静态图像压缩标准 JPEG2000也采用 DWT 作为其核心变换器,并推荐使用基于提升(lifting)的小波变换结构,对本项目的研究具有一定的借鉴作用。

DWT 算法运算量大,一般的应用可以采用存储后再进行 DWT 处理的方法来压缩图像,但要采用 DWT 算法进行实时图像压缩和传输就必须提高 DWT 处理器的处理速度并尽量减少硬件资源开销。文[1,2]分别提出了一种 DWT 变换器结构,文[1]采用并行结构,偏向于提高处理速度,文[2]采用各级小波变换交错执行的结构,比较侧重节省硬件开销,而提高处理速度与减少硬件开销往往是矛盾的,实际中的系统一般都采用两者的折中。

本文结合实时红外图像压缩系统的具体要求讨论了 lifting 小波变换算法的进一步改进,在满足系统要求的处理速度的前提下有效降低了 DWT 处理器的硬件实现复杂度,并针对小波分解的多分辨率特性设计了四级流水线结构,进一步减少了所需存储空间(EABs)和逻辑单元(LEs)。该 DWT 处理器已经用 FPGA(EP1K100QC208-3)实现,完全满足预定要求。

### 2 基本小波变换器的结构及其不足

JPEG2000标准的有损压缩采用不可逆转的 Daubechies 9/7小波变换和基于提升的小波变换,提升过程如图2所示,提升小波变换过程就是把原始信号分为奇数(黑色)和偶数(白色)部分,奇数更新为相邻两个偶数之和乘以一个系数再加上该奇数本身(第一步和第三步),偶数更新为相邻两个奇数之和乘以一个系数再加上该偶数本身(第二步和第四步),最后把奇数和偶数分别乘以一个缩放系数,因为缩放步骤与相邻数值无关,逻辑比较简单,故图中省略了缩放步骤。

由图2可知,完成一个数值的计算需要该数值两旁的8个数据,如图2实线连接的9个数据决定了一个数据,每个交点处需要一个乘法器,所以,直接型一维变换器需要12个乘法器(其中两个乘法器用于缩放步骤)。而每一级小波变换都需要完成图像的行和列两次变换,如果选择先进行完整的行变换

<sup>\*</sup>基金项目:红外图像的实时压缩与扩频传输(云南省省院省校科技合作计划资助编号:2003sabl00a044)。刘晓明 副教授,博士后,主要从事电子设计自动化,通信与测控系统软化/数字化/集成化/及光电检测,图像压缩等方面的研究;史剑锋 硕士研究生,主要从事电子设计自动化,图像压缩等方面的研究;黄智勇 硕士研究生,主要从事电子设计自动化,图像压缩等方面的研究。

再进行列变换的方法,将需要大量的存储空间( $M \times N \times R$  比特)并且需要更多的时钟周期,因此必须采用行变换和列变换同时进行的形式。行变换器和列变换器结构完全相同,同时完成行变换和列变换需要24个乘法器。首先,图像数据按行输入

到行缓冲器,经移位、锁存后并行输入到行变换器。行变换的结果被存储到列变换缓冲器进行列变换。由于列变换器需要9个数值参加运算,因此需要9行数据。

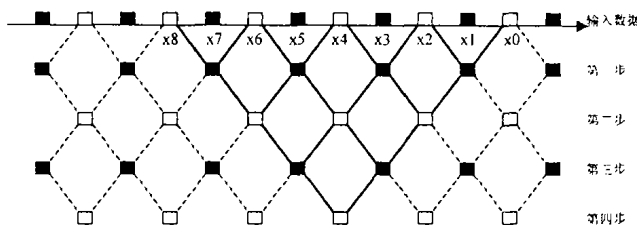


图2 JPEG2000推荐的提升小波变换结构

文[1]提出的一种结构在一定程度上减少了计算量,并把片内所需存储空间从  $M \times N \times R$  比特降低到  $9 \times M \times R$  比特,但计算过程中仍有大量的运算冗余,为了进一步提高运算效率,减少 DWT 所需的存储空间,应该充分利用提升小波变换的特性尽量减少乘法器数量并盘活存储空间。

### 3 改进型 JPEG2000小波变换器的结构

图2实线所示的是一个并行实现的结构,该结构的特点是没有反馈线路,逻辑比较明朗,但没有充分利用电路中的乘法器资源,而且必须等待至少9个数值被输入到电路中才能开始运算,增加了系统延时。

通过对提升小波变换的原理的分析可知,图2中每个交叉点的运算逻辑完全相同,提升小波变换器是由若干个图3所示的逻辑单元构成,(a)为逻辑单元结构,(b)为逻辑单元的表示符号,该逻辑单元完成的运算为  $y_n = x_n + \lambda(x_{n-1} + x_{n+1})$ 。

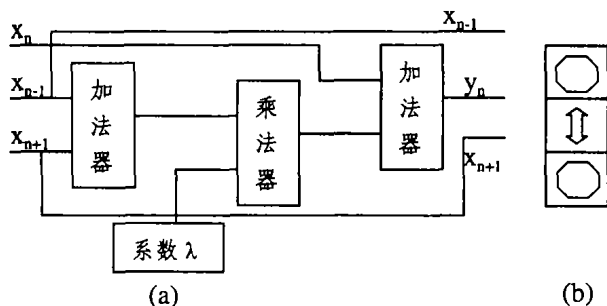


图3 提升小波为换器逻辑单元

这种逻辑单元只有三个输入端,只要3个数值输入到电路中就可以启动运算,大大减少了系统延时,为了把这些逻辑单元组织起来进行小波变换必须对图2所示的结构进行改造。图2中的运算过程本来可由该逻辑单元并行处理来完成,但这种并行结构不能充分利用逻辑单元,完成一维小波变换需要10个逻辑单元。观察图2中的第一步,  $x_0, x_1, x_2$  使用第一个逻辑单元后,该逻辑单元不再使用,完全可以用来计算  $x_2, x_3, x_4$ , 以此类推,第一步只要一个逻辑单元就足够了。同理,第二,三,四步分别使用一个逻辑单元,这样一来完成一维小波变换只需要4个逻辑单元,结构如图4所示。

改进型一维小波变换器每个时钟周期依次读入两个数据  $x_{2n-1}, x_{2n}$  到缓存器,这两个数据与缓存器中的最后一个数据作为第一个单元的输入,计算结果作为第二个单元的输入,以

此类推,四个逻辑单元的参数依次为  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 。行数据在这四级流水线电路中“滚动”,最后一级流水线完成缩放操作,得到近似分量  $s$  和细节分量  $d$ 。至此,完成了一维小波的一层变换。列变换器的结构与行变换器基本相同,不同的是列变换器每次输入两行数据,且中间结果也必须存储一整行数据,所以列变换器总共需要6行中间数据存储空间。

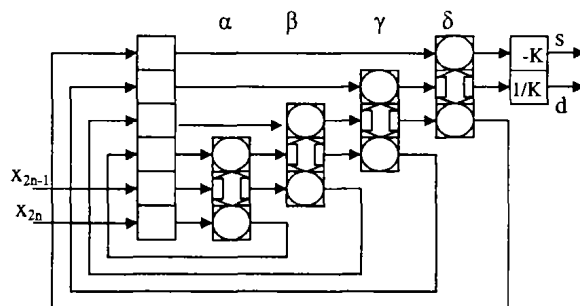


图4 改进型一维小波变换器

当对大小为  $M \times N$  的图像进行变换,且小波系数的位数为  $R$  时,一级二维小波变换的硬件开销比较如表1所示。

表1 一级小波变换的硬件开销比较

小波变换结构类型	卷积型 (mallat 塔式分解)	JPEG2000 推荐型	本文提出 的改进型
乘法器数量(个)	32	24	12
存储器位数(比特)	$2 \times M \times N \times R$	$9 \times M \times R$	$6 \times M \times R$

### 4 改进型小波变换器在实时红外图像压缩系统中的应用

红外图像一般都用灰度图表示,在进行图像压缩时只有一个颜色分量而不用考虑其他颜色分量。系统要求对像素大小为  $256 \times 256$ 、帧速为 25 帧/秒的红外视频序列进行实时压缩,其中包括小波变换、运动补偿和码流生成三部分,小波变换是运算量最大的一部分,是整个系统的关键。

为了提高 DWT 的处理速度,可以利用小波变换的多分辨率特性设计四级流水线结构的 DWT 处理器,流水线结构如图5所示。

每级变换后把细节分量(LH,HL,HH)直接输出而近似分量(LL)由下一级变换器进行进一步的分解。每一级小波变换都包含一次行变换和列变换,所以每级都需要各自的6行数

据缓冲器,ALTERA 公司的 EP1K100QC208 芯片内部包含 12 个 EABs,每个 EAB 最多能配置成 4096 比特的存储器,而且只能配置成一个存储器,就是两个或两个以上的存储器不能公用一个 EAB,当一个 EAB 的部分空间已经被占用,剩下的空间也不能重新分配出来。当图像进行小波变换时,每一级都要使用 6 个 FIFO 存储器,共占用 6 个 EABs,这样造成了片内存储空间的巨大浪费,导致片内存储空间只能进行两级小波变换。为了充分利用片内的存储空间,可以将片内所有 EABs 都分配给一个双口存储器,小波变换的 FIFO 操作由两个存储器控制器来完成,各级小波变换共用一个大容量双端口存储器,这样一片 EP1K100QC208 就能完成对大小为  $256 \times 256$  的图像进行四级小波变换。

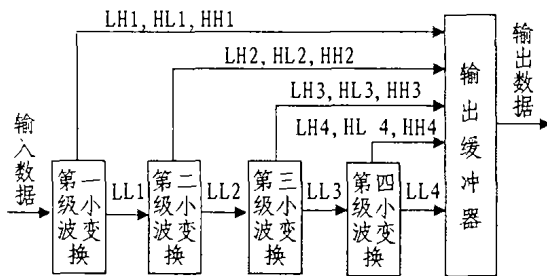


图5 DWT 的四级流水线结构

图6中,a 为一幅  $256 \times 256$  的夜间红外成像照片,b 为采用本文小波变换器处理后的小波域图像。当采用 40MHz 的时钟输入时,每幅图像的变换时间约为 30ms,完全能达到每秒 25 帧的要求。

**结论** 本文结合实时红外图像压缩系统的要求对 JPEG2000 推荐的 DWT 算法进行一系列的改进,使小波变换的硬件开销大幅度减少,并将该 DWT 处理器用 EP1K100QC208-3 进行了验证,经过设计、仿真和下载,各项

性能基本达到了预期的效果,整个系统的资源消耗如下:①使用逻辑单元(LEs)3148 个,占 63%;②使用嵌入式阵列块(EABs)12 个,49152 位,占 100%。

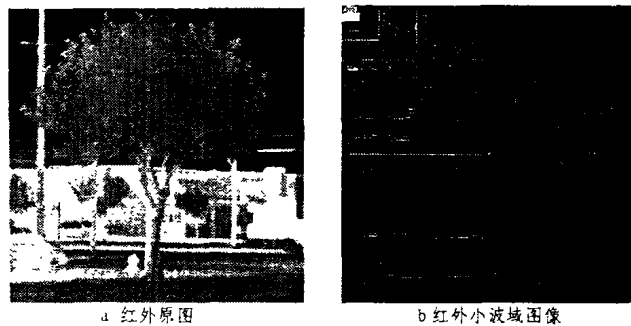


图6 红外图像的小波变换图

在设计过程中充分考虑了动态范围和截尾误差,经过四级小波变换后的重构图像失真度小,对图6的红外图像进行四级小波变换后的重构图像峰值信噪比(PSNR)为 237.3dB,这种失真用肉眼是无法察觉的。

**参考文献**

- 1 肖山竹. 高速图像小波分解算法与 FPGA 实现. 电子技术与应用, 2003(4)
- 2 刘雷波,等. JPEG2000小波变换器的 VLSI 结构设计. 电子学报, 2002(11)
- 3 A theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1989, 11(7)
- 4 Mallat. ISO/IEC 15444-1. Information technology-JPEG2000 image coding system. 2000
- 5 朱秀昌,等. 数字图像处理于图像通信. 北京邮电大学出版社, 2002

(上接第182页)

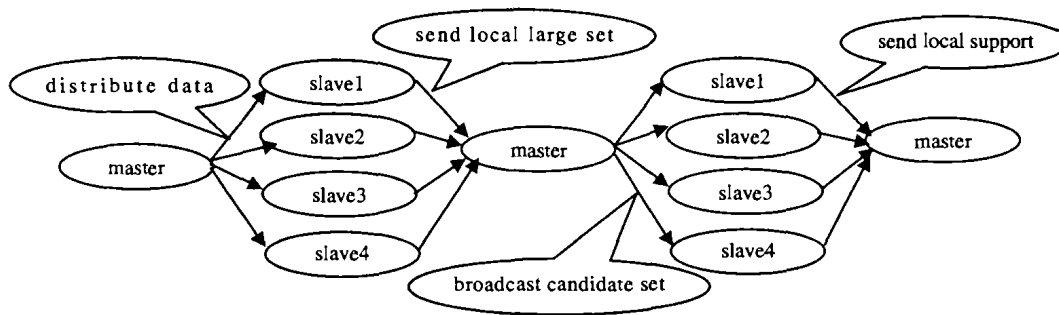


图3 并行运算结构模型

**参考文献**

- 1 Chen Y. An Efficient Parallel Algorithm For Mining Association Rules In Large Database. In: Proc. of the 10<sup>th</sup> Canadian Conf. on Computation Geometry, 1998
- 2 Agrawal R, Srikant R. Mining Sequential Patterns Research Report RJ 9910. IBM Almaden Research Center, Sanjose California, Oct. 1994
- 3 Agrawal R. Parallel Mining of Association Rules. IBM Almaden Research Center
- 4 Oates T, Paul R, Cohen. Parallel and Distribute Search for Structure In Multivariate Time Series, Machine Learning ECML-97berlin New York
- 5 Matthew D, Schmill, Oates T. A Distribute Approach To Finding Complex Dependencies In Data. Lederle Graduate Reseaech Center Computer Science Technical Report 98-3
- 6 Agrawal, Imielinski, et al. Mining Association Rules between Sets of Items in Large data. 1993
- 7 Fayyad U, Piatetsky-Shapiro G, Smyth P. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. AI Magazine, 1996, 17(3): 37~54