

# 基于 FPGA 的小波图像实时处理方法

季云松, 郭成志, 范璐璐, 赵毅  
(华光光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**基于小波变换的滤波方法应用于红外图像处理中可以在降低噪声的同时提升图像细节,有效改善图像画质。介绍了一种采用 FPGA 的小波图像处理方法及其硬件处理架构。通过合理有效地进行算法硬件设计,在单片 FPGA 芯片上实现了图像的实时处理,有利于红外机芯的小型化。

**关键词:**小波变换;图像处理;红外图像滤波;FPGA

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A

## Realtime image processing method of wavelet based on FPGA

Ji Yun-song, Guo Cheng-zhi, Fan Lu-lu, Zhao Yi  
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:**In IR image processing, applying wavelet filtering is effective on noise reduction and image detail enhancement. In this article, we are introducing a wavelet image processing method based on FPGA, and its hardware processing structure. After making the hardware designation of the arithmetic properly and effectively, we have achieved the real-time processing of it on a single FPGA chip, and is an advantage on small IR device.

**Key words:**wavelet;image processing;IR image filtering;FPGA

### 1 引言

在非制冷红外探测器芯片中,由于光电感应器件所处的环境温度高,电路噪声较大,伴随而使图像噪声也较大。为减小图像噪声,提高显示的图像画质,在图像采集后,通常需要进行具有优良效果的图像噪声滤波。常见的图像滤波算法有:模板平滑滤波算法、频域滤波算法、小波滤波算法等。模板平滑滤波算法由于处理后图像边缘模糊,损失细节分辨能力,一般在观测系统中应用较窄。频域滤波算法在频谱变换域中针对噪声特点进行滤波处理,效果较好<sup>[1]</sup>,但由于需要进行 FFT 和 IFFT 处理,运算量过大,存储参数过多,不宜应用在实时显示设备中。

小波处理算法由于具有图像滤波效果好、图像细节损失少的优点,引起广泛关注<sup>[2-4]</sup>。由于其运算量大,实时图像滤波一直是个难题。我们在设计新型高性能机芯中,为得到清晰的图像画质,在依赖不断发展的硬件数字信号处理技术基础上,开展基

于小波处理的高性能机芯硬件研制工作,通过对小波正反变换相似性的研究和模块优化,实现了一种具备实时处理能力、逻辑资源占用少的硬件小波图像处理器。

### 2 算法分析

小波滤波的原理<sup>[5-6]</sup>如下:

$$W_{\psi}^i(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \psi_{j, m, n}^i(x, y),$$
$$i = \{H, V, D\} \quad (1)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_m \sum_n W_{\varphi}(j_0, m, n) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) +$$
$$\frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{i=H, V, D} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_m \sum_n W_{\psi}^i(j, m, n) \psi_{j, m, n}^i(x, y) \quad (2)$$

**作者简介:**季云松(1976-),男,硕士,工程师,主要从事电子设计和图像处理相关的工作。E-mail:yunsong263@126.com

**收稿日期:**2009-08-14

其中,  $x, y$  为图像空间坐标;  $m, n$  为变换后空间坐标;  $j$  为分解层数;  $W$  为小波变换后由高频分解系数和剩余系数组成的集合;  $f$  为逆变换后图像;  $\phi$  为正变换滤波数组;  $\psi$  为逆变换滤波数组。

通过公式(1)得到的小波变化系数进行软阈值滤波,再进行公式(2)表示的小波逆变换,得到滤波图像<sup>[7-8]</sup>。

图像的单级小波分解原理如图1所示。

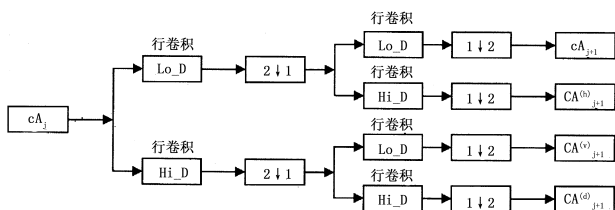


图1 图像的单级小波分解

图像的单级小波重构原理如图2所示。

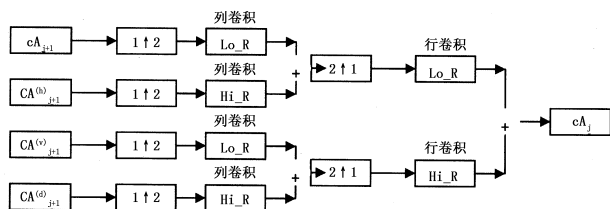


图2 图像的单级小波分解

其中,  $2 \downarrow 1$  表示列抽样,即保留所有偶数列;  $1 \downarrow 2$  表示行抽样,即保留所有偶数行;  $2 \uparrow 1$  表示列插样,即在奇数列插入 0 值;  $1 \uparrow 2$  表示行插样,即在奇数行插入 0 值。

### 3 硬件实现方案

对于红外图像每帧时间为 20 ms,需要处理的像素为 110592 个,则每个像素的处理时间  $\leq 180.8$  ns。

为实现  $320 \times 240$  dpi, 8 bit, 50 f/s 图像的实时小波处理,需要满足下列条件:

#### (1) 内存资源需求

最低数据存储需求为:

一块图像数据存储区 ( $320 \times 240 \times 8$  bit), 一块小波系数存储区 ( $320 \times 240 \times 16$  bit)。

#### (2) 算法计算量需求

理想状态的纯乘加计算量 (Mac) 为:  $320 \times 240 \times 50 \times (16 \times 2 + 2) = 130$  M Mac。

在并行实现模式中,原始图像的数据传输率为 4 MB/s。为满足多层图像的正变换、系数处理和逆变换,理想状态的时钟处理频率应为数据传输率的 8 倍以上 ( $> 31$  MHz)。

目前常用于高速实时信号处理的硬件芯片分为两大类:基于大规模可编程集成电路 FPGA 的纯硬件实现方案和基于高速通用 DSP 的软件实现方案。

采用 FPGA 的硬件实现方案硬件接口设计灵活,可以和任意数字外围电路直接使用,硬件设计简洁。目前得到应用的高端 FPGA 有 Altera 公司的 StratixII 和 Xilinx 公司的 Vertex-II Pro 等产品。

基于高速通用 DSP 的软件实现方案代码设计灵活,可以快速修改和调试信号处理程序。目前得到应用的高端 DSP 有 ADI 公司的 TigerSHARC 系列和 TI 公司的 TMS320C6000 系列。

考虑算法的计算量,采用纯 FPGA 实现方案以保证足够的并行处理速度。为保证足够多的高速内存空间,方案采用大容量的 EP2S60F484 芯片,利用片内的 Memory 存储图像和小波系数,用 FPGA 中的硬件 DSP 模块实现图像的卷积。FPGA 的功能模块框图如图 3 所示。

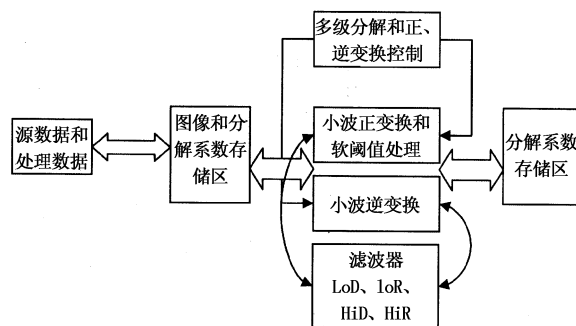


图3 小波变换模块的功能结构图

硬件实现的特点可归纳为:多并行图像数据处理简单模块在主进程(中心控制单元)的时序控制下,并行完成正、逆变换所需的高、低通滤波(并行处理单元),协调完成滤波数据的参数存取管理(动态存取单元),并实现外部数据的输入输出(外部数据接口单元)。

“多级分解和正、逆变换控制”(中心控制单元)模块由主模块中的两个进程构成。该部分控制模块顺序完成:多级分解滤波;多级重构。

“小波正、逆变换和软阈值处理”均由两个进程构成。其中,主进程完成算法处理,辅助进程完成启动控制。为提高算法的可重复使用性,降低逻辑资源的占用,小波正、逆变换均采用相同的实现方式,进在调用时对不同变换采用不同的参数和分解、重构处理流程。

“图像和分解系数存储区”由 FPGA 片内双口 RAM 构成,用于输入、输出数据的存储和中间分解变量的存储。当对图像进行处理时,该部分空间被内核用于中间系数和处理结果的存取,直至 Busy 信号无效时。由于采用了地址转换,输入、输出外部接口表现为空间地址连续存储。

“分解系数存储区”由 FPGA 片内双口 RAM 构成,用于小波分解中的中间结果存储,无外部接口。

滤波器模块有 4 个滤波器构成,用于计算输入数据的小波分解、重构滤波结果。4 个滤波器为 LoD, LoR, HiD, HiR。当小波处理模块进行图像处理时,小波正变换、逆变换的处理在多个并行的滤波器模块间同时处理,以提高处理速度。

#### 4 测试结果

为测试本实现方案的有效性和实时性,采用 Altera 公司的 EP2S60F484 为算法处理芯片设计了硬件试验电路板,连接到红外采集硬件电路中进行实时处理。图 4 所示为我们设计的硬件试验电路板。

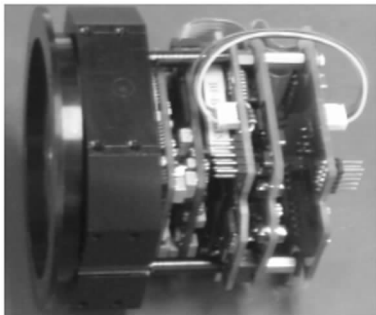


图 4 红外机芯进行小波处理的试验板

采用 Altera 公司的 FPGA 开发环境 QuartusII 对小波处理模块编译结果如图 5 所示。

Family	Stratix II
Device	EP2S60F484C5
Timing Models	Final
Met timing requirements	N/A
Logic utilization	5%
Combinational ALUTs	2, 139/48, 352 (4%)
Dedicated logic registers	465/48, 352 (<1%)
Total registers	465
Total pins	57/335 (17%)
Total virtual pins	0
Total block memory bits	1, 769, 472/2, 544, 192 (7~%)
DSP block 9-bit elements	16/288 (6%)

图 5 处理算法在 FPGA 开发环境中的编译结果

将本模块写入试验板中进行实时处理,对 50 Hz 的红外图像能够无延迟输出结果,实际处理图像时间小于 20 ms,达到实时处理的要求。图 6、图 7 为信号处理板的小波处理图像和原始图像的对比。



图 6 原始红外图像



图 7 经小波处理噪声降低了的红外图像

#### 5 结论

采用本文所用的简化型并行设计架构,利用 FPGA 的并行滤波结构提供了硬件处理的实时性。同时,基于小波正、逆变换的相似性,使本文设计中的逻辑资源占用很少,利于小波处理占用硬件资源的最简化。

经过仔细设计和调试,我们在单芯片无外围存储和辅助处理的 FPGA 实验版上验证了算法,并测试了其运行速度和图像质量,发现能实时处理出清晰的红外图像,处理速度达到 50 Hz。测试结果表明,采用该硬件实现方法,在改善图像效果的同时,达到硬件处理速度实时性高、设备集成化程度高的目标。

将来我们将开展进一步的工作,对小波硬件处理模块进行接口扩展,以适应不同的图像输出形式,提高其在不同产品中的适应性;同时,针对新的 640 × 480 大面阵探测器件,需要优化算法处理流程,提高并行处理能力。

#### 参考文献:

- [1] 杨丽娟,张白桦,叶旭桢.快速傅里叶变换 FFT 及其应用[J].光电工程,2004,31(z1):1-3.
- [2] 谢杰成,张大力,等.小波图象去噪综述[J].中国图像图形学报:A辑,2002,7(3):3-11.
- [3] 李迎春,孙继平,付兴建.基于小波变换的红外图像去噪[J].激光与红外,2006,36(10):988-991.
- [4] 周凤岐,遆小光,周军.基于平稳多小波变换的红外图像噪声抑制方法[J].红外与毫米波学报,2005,2:151-155.
- [5] 冈萨雷斯.数字图像处理[M].第2版.北京:电子工业出版社,2003.
- [6] 胡昌华,张军波,夏军,等.基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [7] 孙兆林. MATLAB 6. x 图像处理[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [8] 飞思科技产品研发中心.小波分析理论与 MATLAB7 实现[M].北京:电子工业出版社,2005.