

基于小波图像编码的远程监控系统的设计与实现¹

乔世杰 智贵连* 王国裕**

(深圳中兴通讯新技术研究部 深圳 518057)

*(西安电力高等专科学校电力工程系 西安 710032)

** (西安交通大学电子科学与技术系 西安 710049)

摘 要 小波变换由于其多分辨率特性而特别适合图像编码。该文设计了一种基于小波图像编码的远程监控系统。整个系统由本地监控端和远程主控端组成。本地监控端包括图像采集、小波变换图像编码和发送 3 个模块。小波变换图像编码由二维小波变换和零树编码组成。设计了监控端各个模块的硬件结构,编写了其硬件结构的 Verilog HDL 模型,进行了仿真和逻辑综合,并用 FPGA 进行了验证。编写了主控端的远程接收、控制软件,成功实现了基于小波图像编码的远程监控系统。

关键词 远程监控,小波变换,零树编码,VLSI,Verilog HDL

中图分类号 TN432, TN919.8

1 引 言

基于公用电话网 (PSTN) 的远程监控系统是一种适用范围很广的新型监控系统。为了通过 PSTN 实现图像的远程传输,可以利用图像采集卡和两台计算机用纯软件方式实现^[1],但是带来的问题是高成本、高功耗和高维护费用,而且隐蔽性差。使用单片机 (MCU)^[2] 或数字信号处理器 (DSP)^[3] 可以降低成本,但易受 CPU 性能限制,无法实现高速的数字运算。此外,基于 PSTN 的远程监控系统大都采用基于 DCT 变换的图像编码系统^[1-3],在低码率情况下存在着明显的“方块效应”。

小波变换具有良好的时频局部特性而特别适合图像编码。小波变换是一种全局变换,完全没有 DCT 之类正交变换所具有的“方块效应”。本文提出了一种基于小波图像编码的远程监控系统。整个系统由本地监控端和远程主控端组成。本地监控端包括图像采集、小波变换图像编码和传输 3 个部分。小波图像编码由二维小波变换和快速零树编码组成。远程主控端则是一个带 MODEM 的 PC 机。

由于二维小波变换需要大量的数据操作,必须用专用的硬件来实现。文献 [4] 首先提出了一种没有乘法的二维小波变换的 VLSI 结构,但该结构是专门针对 Daubechies 4-tap 的小波滤波器设计的,并不适合其他的滤波器。文献 [5] 提出了一种二维小波变换的脉动-并行结构,但当变换级数增加时,其数据通路和控制结构的复杂性增加。本文设计了一种模块化的二维小波变换的硬件结构,该结构可以很容易地扩充到不同级别的二维小波变换。

在小波图像编码中,由 Shapiro 引入的嵌入式零树编码算法 (EZW)^[6] 是一种简单而有效的图像编码算法。在 EZW 基础上, Said 提出了一种改进的编码方案 SPIHT^[7]。但 SPIHT 中的 3 个列表必须用链表来实现,对硬件实现来说开销太大。文献 [8] 用标志阵列代替列表提出了没有链表的零树编码算法 (LZC),但是由于其表示零树的符号并不是很有效,而且使用一种递归的扫描方式,因此它并不适合硬件实现。本文在 SPIHT 算法的基础上,利用一种简单的顺序扫描方式和两个标志阵列,提出了一种适合硬件实现的快速零树编码算法,并设计了算法硬件实现的 VLSI 结构。

在二维小波变换和快速零树编码的硬件结构的基础上,我们设计了图像采集模块和传输模块的硬件结构,完成了本地监控端的硬件结构设计。编写了该硬件结构的 Verilog HDL 模型,

¹ 2002-04-03 收到, 2002-08-29 改回

并将其综合到 ALTERA 的 APEX20K 系列器件中。设计了远程监控端的接收、控制软件, 成功实现了基于小波图像编码的远程监控系统。

2 远程监控系统的结构

整个监控系统由本地监控端和远程主控端组成, 如图 1 所示。在监控端, 如果发现异常情况, 则通过 MODEM 呼叫远程控制端, 建立通信连接, 然后将电脑眼采集的图像数据经过小波图像编码以后, 由 MODEM 通过电话线传送到远程主控端。远程主控端是一个带 MODEM 的 PC 机, 它自动接收监控端传送过来的数据, 对数据进行解压缩, 并将重建图像显示在计算机的屏幕上。主控端还能主动拨通监控端, 请求监控端将现场图像传送过来。

3 本地监控端的 VLSI 实现

本地监控端由图像采集、小波图像编码和数据发送 3 个模块组成。其中小波图像编码模块由小波变换和零树编码两部分组成。本地监控端硬件的总体结构如图 2 所示。

电脑眼采集的图像数据被存储到图像缓存中, 小波变换模块从图像缓存中读取图像数据并进行小波变换, 小波系数被存储在小波系数缓存中。零树编码模块从小波系数缓存中读 沛幌瓮 (13) 顾酰口缓岳口(7) 湍? 样口偷皆程主控端。全局控制模块则负责协调图像的采集、变换和编码。

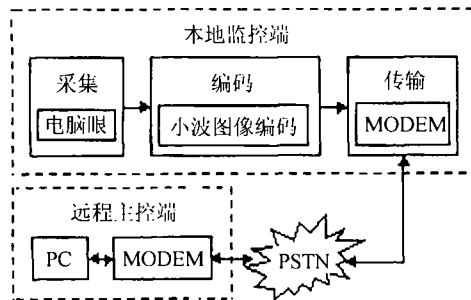


图 1 远程监控系统的结构

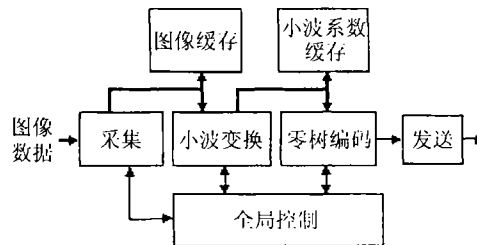


图 2 监控端硬件的总体结构

3.1 采集、发送和全局控制模块的硬件实现

电脑眼是一种以 CMOS 摄像芯片^[9]为核心的数字图像输出设备。它通过标准的 DB25(针形)连接器与其他设备接口。图像采集模块利用电脑眼的像素同步信号作为地址发生器的时钟信号, 产生图像缓存的地址信号。同时, 直接利用像素同步信号作为图像缓存的写信号。这样就可以实时地将电脑眼的数据存储到缓存中。

发送模块完成零树编码与 MODEM 之间的接口。为了使其与 MODEM 的接口简单, 我们采用了一种具有并行接口的 MODEM。工作时, 首先初始化 MODEM 中的控制寄存器, 然后向 MODEM 发送 AT 命令, MODEM 拨号并连接到远端的计算机。一旦连接成功, MODEM 就处于数据发送状态。发送模块不断从零树编码的输出缓冲 FIFO 中读取压缩数据并发送。利用这种方法可以实现压缩和传送的并行化。对 MODEM 的控制则由一个有限状态机完成。

全局控制模块协调图像的采集、变换和编码, 其依次产生各个功能模块的使能信号, 控制编码过程在各个模块之间切换。全局控制模块也用一个简单的有限状态机实现。

3.2 二维离散小波变换的 VLSI 实现

二维离散小波变换可以用可分离的一维小波变换来实现。首先对图像沿着行方向进行变换, 然后再沿着列方向进行变换, 得到代表原图不同频率特性和方向特性的 4 个子带图像, 表示为 LL, HL, LH 和 HH。LL 子带还可进一步分解为 4 个子带, 从而完成多级二维小波变换。

设计的二维小波变换的 VLSI 的结构如图 3 所示 (以两级为例)。这种结构是模块化的, 可以很容易地扩展到不同级别的二维小波变换。

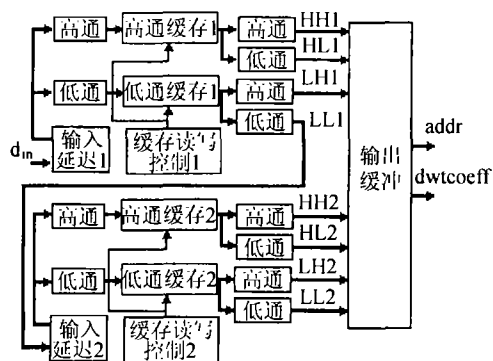


图 3 二维小波变换的 VLSI 结构

每一变换级包含 3 组并行的滤波器组, 其中一组完成水平方向的变换, 另两组完成垂直方向的变换, 每组的滤波器组结构都是相同的。输入图像数据 d_{in} 以扫描的方式进入第一变换级的输入延迟单元, 输入延迟单元模拟滤波器窗口沿输入数据的滑动。延迟单元的输出连接到水平并行低通滤波器和高通滤波器的输入端。水平滤波器的输出分别存储在低通缓存和高通缓存中, 以便在适当的时候参与垂直方向的计算。缓存的读写受缓存读写控制单元的控制。当水

平变换存储到缓存中的数据足以进行垂直变换时, 垂直变换就被启动, 与水平变换并行地执行。垂直变换输出中的 LH, HL, HH 和最后一级的 LL 都作为变换系数直接输出, 而其余各级的 LL 则都要连接到下一级的输入延迟单元, 以完成多级小波变换。

小波变换系数以行扫描的方式按子带顺序存储到外部缓存中。输出缓冲单元按照小波系数所在的变换级和子带位置, 产生相应的地址信号。

我们以 5-3 tap 滤波器的低通滤波器系数为: $-1/4\{-1, 2, 6, 2, -1\}$, 高通滤波器系数为: $1/2\{-1, 2, -1\}$ 。所有运算都采用整数运算, 并用右移实现除以 2 和除以 4 的运算。输入图像数据为 8 位无符号整数, 二维小波变换系数为 16 位有符号整数, 其最高位为符号位。仿真结果表明, 其仿真输出与 C 语言程序输出的结果完全相同。

所使用的 5-3 tap 滤波器的低通滤波器系数为: $-1/4\{-1, 2, 6, 2, -1\}$, 高通滤波器系数为: $1/2\{-1, 2, -1\}$ 。所有运算都采用整数运算, 并用右移实现除以 2 和除以 4 的运算。输入图像数据为 8 位无符号整数, 二维小波变换系数为 16 位有符号整数, 其最高位为符号位。仿真结果表明, 其仿真输出与 C 语言程序输出的结果完全相同。

使用 Mentor Graphics 公司的综合工具 Leonardo spectrum 将它们综合到 FPGA 中。选择 ALTERA 公司的 APEX20K 器件。APEX20K 器件含有大量的嵌入式系统单元 ESB, 特别适合于实现片上的水平输出缓存。选用的具体器件为 APEX20K300EQC240(约 30 万门), 综合后器件的资源利用情况如表 1 所示。综合结果表明, 小波变换的系统时钟可达 40.6MHz, 完全可以实时完成小波变换。

表 1 二维小波变换的综合结果

资源	已用资源	可用资源	利用率 (%)
输入输出引脚 (IOs)	47	152	30.92
逻辑单元 (LCs)	6634	11520	57.59
嵌入式系统单元 (ESBs)	72	72	100
存储单元 (Memory bits)	69120	147456	46.88

3.3 快速零树编码算法及其 VLSI 实现

3.3.1 快速零树编码算法 快速零树编码中的树结构与 EZW 中的相同, 而集合的定义则与 SPIHT 中相似, 如图 4(a) 所示。 $H(i, j)$ 为树根的集合; $O(i, j)$ 为节点 (i, j) 的子节点的集合; $D(i, j)$ 为节点 (i, j) 的所有子孙的集合; $L(i, j) = D(i, j) - O(i, j)$ 。

利用集合分割规则对集合进行分割^[6]。初始分割由集合 $\{(i, j)\}$ 及 $D(i, j)$ 组成, $(i, j) \in H$ 。在编码过程中, 若 $D(i, j)$ 是重要的, 则被分割为 $L(i, j)$ 和单像素集合 $\{(k, l)\}$, $(k, l) \in O(i, j)$; 而若 $L(i, j)$ 是重要的, 则被分割为子集合 $\{D(k, l)\}$, $(k, l) \in O(i, j)$ 。对于给定的阈值 $T = 2^n$, 用 (1) 式判断集合 Γ 相对于阈值 T 是否重要。

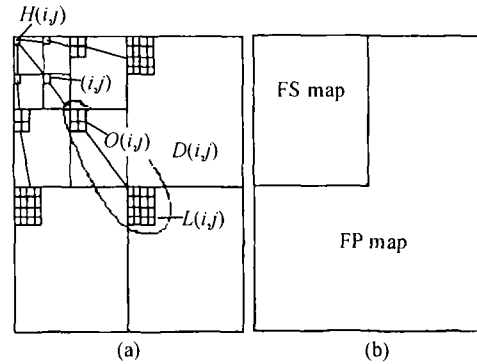


图 4 零树编码中的树结构和标志阵列

$$S_n(\Gamma) = \begin{cases} 1, & \max_{(i,j) \in \Gamma} \{|P(i, j)|\} \geq T \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

与 LZC 相似, 利用两个标志阵列来存储单个像素和集合的重要性信息。一个阵列对应于单个像素, 称为像素标志 FP。另一个阵列对应于集合 D 和 L , 称为集合标志 FS。阵列 FP 的大小与图像的大小相同。由于最高频的 3 个子带 HL1, LH1 和 HH1 没有子节点, 因此 FS 的大小为图像大小的 $1/4$, 如图 4(b) 所示。

在 LZC 算法中, 用标志阵列代替链表以后, 对集合的扫描采用了一种递归的扫描方式。递归扫描很容易用软件实现, 但对硬件实现来说, 递归扫描则会变得复杂。在零树编码中, 小波变换一般要进行 5 级或者 6 级, 否则零树效果并不显著。从图 4(a) 知道, 树的节点是以类似二叉树的形式分布的, 对较高变换级的节点来说, 不但其子孙的分支多, 递归扫描的次数也多。而且在扫描过程中, 递归扫描究竟在哪一级停止也是随机的 (与具体图像变换的数据有关), 这也增加了递归扫描硬件实现的难度。

对硬件来说, 最简单最容易实现的扫描方式应当是顺序扫描。对集合按子带顺序以行扫描的方式进行扫描, 在一个子带中的系数扫描完以后才转向下一个子带, 并且确保子节点不能在其父节点之前扫描。经过研究我们发现, 完全可以利用这种简单的顺序扫描方式完成对集合的扫描。

定义 FP 为 1-bit/word 的像素标志方阵。当 $FP(i, j) = 1/0$ 时, 表示此坐标对应的系数 $P(i, j)$ 是重要的 / 不重要的。

定义 FS 为 3-bit/word 的集合标志方阵。当 $FS(i, j) = "000"/"001"$ 时, 表示此坐标对应的集合是 $D(i, j)$, 且是不重要的 / 重要的; 当 $FS(i, j) = "010"/"011"$ 时, 表示此坐标对应的集合是 $L(i, j)$, 且是不重要的 / 重要的; 此外, 当按顺序方式对子带进行扫描时, 必然会扫描到那些属于某些不重要集合的元素, 它们不需要编码, 必须将它们标识出来, 我们将其标志设为 $FS(i, j) = "111"$ 。新算法的编码步骤如下:

(1) 初始化: 将 FP 清零; 将那些对应于最高变换级的 LL 子带元素的 FS 置为 "000", 将对应于其余子带元素的 FS 置为 "111"; 输出 $n = \log_2[\max |P(i, j)|]$ 。

(2) 对所有的 $P(i, j) \in H$: 如果 $FP(i, j) = 0$, 则输出 $S_n(i, j)$, 如果 $S_n(i, j) = 1$, 则输出 $P(i, j)$ 的符号, 并令 $FP(i, j) = 1$; 如果 $FP(i, j) = 1$, 则输出 $P(i, j)$ 的第 n 重要位 (对 $P(i, j)$ 进行细化)。

(3) 按照子带顺序, 以行扫描的顺序对 $FS(i, j)$ 进行扫描。对 $FS(i, j)$ 的扫描是编码的主要部分, 为了清楚起见, 以伪代码的形式将其描述如下:

```

If  $FS(i, j) = "000"$  then output  $S_n(D(i, j))$ ;
If  $S_n(D(i, j)) = 1$  then encode the children pixels of  $O(i, j)$ ;
  If  $L(i, j) = \Phi$  then set  $FS(i, j) = "001"$ ;
  Else output  $S_n(L(i, j))$ ;
    If  $S_n(L(i, j)) = 0$  then set  $FS(i, j) = "010"$ ;
    Else set  $FS(i, j) = "011"$ ;
    For each  $(k, l) \in O(i, j)$ 
      set  $FS(k, l) = "000"$ ;
  Else if  $FS(i, j) = "001"$  or  $"011"$  then encode the children pixels of  $O(i, j)$ ;
  Else if  $FS(i, j) = "010"$  then encode the children pixels of  $O(i, j)$ ;
  Output  $S_n(L(i, j))$ ;
  If  $S_n(L(i, j)) = 1$  then set  $FS(i, j) = "011"$ ;
  For each  $(k, l) \in O(i, j)$ 
    set  $FS(k, l) = "000"$ ;

```

(4) $n = n - 1$, 返回到步骤 (2)。

在编码过程中, 为了避免对 FS 作多遍扫描, 对于从集合 $D(i, j)$ 分割出来的子集合 $L(i, j)$ 立即进行了扫描。而对于从集合 $L(i, j)$ 分割出来的子集合 $\{D(k, l)\}$, 并没有立即扫描, 而只是设置了其标志。这是因为 (k, l) 是 (i, j) 的子节点, 它们在后续的顺序扫描中完全可以扫描到。步骤 (3) 中对子像素的编码与步骤 (2) 中对 $P(i, j)$ 的编码完全类似。

按照这种顺序扫描方法, 只须对 FP 和 FS 作一遍扫描就可以完成一轮编码过程, 而且每次扫描操作只涉及到两个相邻变换级的父节点和其子节点。从而不但降低了算法对硬件资源的需求, 加快了编码速度, 更使算法的硬件实现变得简单。

为了验证快速零树编码的性能, 我们用 C 语言编程实现了新算法, 并对标准灰度图像 Lena (512×512) 压缩编码。为了快速编码, 我们没有使用算术编码。表 2 给出了新算法和 EZW 算法在不同压缩比下的重建图像与原始图像的 PSNR。新算法在不用算术编码的情况下就取得了与 EZW 完全相当的编码性能, 是一种有效的零树编码算法, 为硬件实现零树编码提供了一个有效的解决方案。

表 2 不同算法的 PSNR 的比较 (dB)

压缩比	新算法	EZW ^[5]
16: 1	36.22	36.28
32: 1	33.15	33.17
64: 1	30.11	30.23

3.3.2 快速零树编码算法的 VLSI 实现 针对上面提出的快速零树编码算法, 我们设计了硬件实现的 VLSI 结构, 如图 5 所示。编码器从 DWTRAM 中读取小波变换系数, 用快速零树编码算法对系数进行编码, 编码后的位流送入输出缓冲 FIFO 后输出。

FPSRAM 中存储的是标志阵列 FP 和 FS。CHILDGRAM 是为了简化集合重要性判定而引入的。CHILDGRAM 中存储的是那些有子孙的节点的所有子孙中的最大值。利用 CHILDGRAM, 只需花费很少的时间和代价就可以迅速判定一个集合是否重要。

初始化模块完成编码系统的初始化任务。FPH 编码模块完成对 $P(i, j) \in H$ 的扫描编码。FS 编码模块完成对集合 $D(i, j)$ 、集合 $L(i, j)$ 以及从集合中分割出来的单个子像素 $(k, l) \in O(i, j)$ 的扫描编码。量化步长更新模块则更新量化步长, 并产生新的阈值。码流生成模块根据 FPH 编码和 FS 编码模块输出的编码控制信号产生输出码流。输出码流被送到输出缓冲 FIFO 中。同

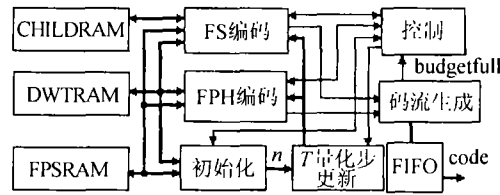


图 5 零树编码的硬件结构

时, 码流生成模块还实时监控输出码流, 当编码结束条件满足时, 信号 `budgetfull` 跳变为高。控制模块产生各个功能模块的使能信号, 控制编码器按算法流程在各个功能模块之间切换。首先, 它使能初始化模块, 从而完成系统的初始化任务。然后进入主要的编码过程, 其依次产生模块 FPH 编码、FS 编码和量化步长更新模块的使能信号, 直到信号 `budgetfull` 跳变为高, 整个编码过程结束。

我们以对 512×512 图像的 5 级二维小波变换系数完成零树编码为例, 编写了其硬件结构的 Verilog HDL 模型, 并进行了仿真和逻辑综合。仿真结构表明, 其仿真输出与 C 语言程序输出的结果完全相同。使用 Leonardo spectrum 将其综合到 APEX20K100QC240 器件中 (10 万门)。综合后器件的资源利用情况如表 3 所示。综合结果表明, 系统时钟可达 45.0MHz, 可以满足实时编码的要求。

表 3 零树编码的综合结果

资源	已用资源	可用资源	利用率 (%)
输入输出引脚 (IOs)	114	189	60.32
逻辑单元 (LCs)	2991	4160	71.90
嵌入式系统单元 (ESBs)	2	26	7.7
存储单元 (Memory bits)	4096	53248	7.7

3.5 本地监控端的 VLSI 实现

在小波变换和零树编码 Verilog HDL 模型的基础之上, 我们设计了图像采集模块和发送模块的 Verilog HDL 模型, 并在顶层将这些模块组装在一起, 完成了本地监控端的 Verilog HDL 模型设计。将监控端的硬件结构映射到可编程逻辑器件中, 仍然选择 ALTERA 公司的 APEX20K 系列器件。图像采集、小波变换和全局控制模块被综合到 APEX20K300EQC-240, 而发送模块和零树编码则被综合到 APEX-20K100QC240。结果表明, 图像采集和小波变换部分的最高工作频率达 40.6MHz, 零树编码部分的最高工作频率达 45.0MHz, 完全满足实时编码的要求。

4 基于 PC 机的远程接收控制程序

远程监控系统的远程主控端是一个带有 MODEM 的 PC 机, 它采集由监控端 MODEM 发送过来的数据, 对数据进行解压缩并在屏幕上显示出来。接收程序主要由 3 个模块组成。分别是数据流接收模块, 解压缩模块和图像显示模块。接收程序采用 VC++6.0 在 WINDOWS 下编程。采用一个称为 MSCOM 的串行端口控件完成压缩数据流的接收任务。解压缩模块则包括零树解码和小波反变换两个部分, 压缩数据流首先经过零树解码, 然后再进行小波反变换重建图像, 重建图像由显示模块显示在屏幕上。主控端还可以主动拨通监控端, 请求监控端将现场图像传送过来。

5 远程监控系统的实现

我们设计了本地监控端的 PCB 板, 用 ALTERA 公司的 QuartusII 软件将监控端综合后的网表装配到 FPGA 器件中, 结合远程接收控制程序, 完成了整个监控系统的协同调试, 成功实

现了基于小波图像编码的远程监控系统。实验中系统时钟取为 16MHz, 压缩比取为 40:1, MO-DEM 的速率为 33.6kbps, 对于 512×512 大小的图像, 传输一幅图像大约需要 1.5s。实验结果表明, 我们的设计基于小波图像编码的远程监控系统是正确的, 达到了预期的目标。

参 考 文 献

- [1] 陈默, 王晓东, 李维钊, 等, 基于 PC 机和公用电话网的远程监控的设计和实现, 计算机应用研究, 2001, (8), 111-114.
- [2] 吴桂初, 冉立新, 陈抗生, 基于 PSTN 的远程图像采集和传输系统, 计算机工程, 1999, 25(4), 32-34.
- [3] 戴礼荣, 李枫, 王仁华, 基于 PSTN 的远程多媒体监控系统, 中国图象图形学报, 2001, 6(6), 594-598.
- [4] A. S. Lewis, G. Knowles, VLSI architecture for 2-D Daubechies wavelet transform without multipliers, Electronics Letters, 1991, 27(2), 171-173.
- [5] M. Vishwanath, R. M. Owens, M. J. Irwin, VLSI architecture for the discrete wavelet transforms, IEEE Trans. on CAS-II, 1995, CAS-II-42(5), 305-316.
- [6] J. M. Shaprio, Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients, IEEE Trans. on SP, 1993, SP-41(12), 3445-3462.
- [7] A. Said, W. A. Pearlman, A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees, IEEE Trans. on CAS, Video Tech., 1996, 6(3), 243-249.
- [8] W. K. Lin, B. W. -H Ng, N. Burgess, Reduced memory zerotree coding algorithm for hardware implementation, IEEE ICMCS'99, Florence, Italy, 1999, 231-235.
- [9] Wang Guoyu, High integration CMOS vision chips, in Proc. SPIE, 1996, Vol. 2894, 123-131, Beijing.

REMOTE SURVEILLANCE SYSTEM BASED ON WAVELET IMAGE CODING

Qiao Shijie Zhi Guilian* Wang Guoyu**

(Dept. of Advanced Technology, ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

*(Dept. of Electric Power Engineering, Xi'an Institute of Electric Power, Xi'an 710032, China)

** (Dept. of Electronic Science and Technique, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China)

Abstract The wavelet transform is ideal for image coding due to its capability for multi-resolution representation. This paper presents a remote surveillance system based on the wavelet image coding. The system contains two subsystems, the local monitor and the remote control. The local monitor consists of the image capture module, the wavelet coding module which has two blocks of 2-D wavelet transform and the zerotree coding, and the transmit module. The hardware structure of each module is designed, and the Verilog HDL modules of the local monitor are programmed and simulated. The hardware is then synthesized to FPGA. The receiver program for the remote control is designed, and the remote surveillance system is implemented successfully.

Key words Remote surveillance, Wavelet transform, Zerotree coding, VLSI, Verilog HDL

乔世杰: 男, 1969 年生, 博士, 研究方向为: 小波变换图像编码算法及其 VLSI 实现, 远程监控等。

智贵连: 女, 1973 年生, 讲师, 研究方向包括: 图像处理, 视频压缩等。

王国裕: 男, 1954 年生, 教授, 博士生导师, 中科院半导体所研究员, 研究领域包括: CMOS 摄像器件, 远程监控等。