

## 采用方向树结构矢量组合的小波图像分类矢量量化

郑 勇 李德明 朱维乐\*

(世宏科技(苏州)有限公司 苏州 215021)

\*(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**摘 要:** 该文提出了采用方向树结构矢量组合对小波图像进行分类矢量量化的新方法。该方法的矢量构成结合了子带系数的方向性,充分利用了子带系数的带间和带内的相关性,按能量和活跃度进行两级分类,降低了类中矢量的内部离散度,分类信息占用比特数少,并采用了基于人眼视觉特性的加权均方误差准则进行矢量量化,提高了量化增益。仿真结果表明,该方法实现简单,可以达到很好的压缩效果。

**关键词:** 小波变换, 方向树结构矢量, 矢量分类, 矢量量化

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)12-1959-05

## Classified Vector Quantization on Wavelet Image with Directional Tree Structure Vector Combination

Zheng Yong Li De-Ming Zhu Wei-le \*

(Innosys Technology, Suzhou 215021, China)

\*(Dept. of Electronic Eng., UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** A new method to perform classified vector quantization on wavelet images using directional tree structure vector combination is proposed. It makes vector combination by employing the direction character of subband coefficients and the correlation between and within subbands. It has two steps of classification with the vector's energy and activity and thus reduces the inner dispersion of the classified vectors. The classified information needs few bits to carry. The weighted mean square error rule using human visual characteristics is used to improve quantization gain. Simulation results show its coding efficiency for wavelet images.

**Key words** Wavelet transform, Directional tree structure, Vector classification, Vector quantization

### 1 引言

小波变换<sup>[1,2]</sup>由于使信号的低频长时特性和高频短时特性同时得到处理,有效地克服了傅氏变换在处理非平稳的复杂图像信号时所存在的局限性,因而在数字图像压缩领域得到了广泛的应用<sup>[3,4]</sup>。Shapiro 利用零树处理图像的小波分解系数<sup>[5]</sup>,充分利用了带间和带内相关性,获得了较高的编码效率。由率失真理论知道,矢量量化优于标量量化,当码率给定时,如果维数任意大,矢量量化可以任意接近率失真下界。在小波变换域内作矢量量化,由于小波逆变换具有一定程度的平滑作用,不会像DCT+VQ方法那样出现明显的方块效应,故具有较好的图像压缩效果。

本文提出一种新的高压缩比图像压缩算法。结合二进离散小波的方向性并利用各级子带间的相关性和空间约束性

将同方向各级子带的小波系数按四叉树规则组合成矢量,根据矢量的能量以及活跃度对矢量进行分类,再采用加权均方误差准则(WMSE)对重要类矢量中的活跃和非活跃矢量分别采用不同大小的码书进行加权矢量量化。该方法不需对各子带独立进行码书训练,可以对各方向子带采取不同的量化策略,通过矢量分类大大减少了编码比特,同时这种跨带矢量组合解决了不同分辨率子带的比特分配问题,因而实现更加简单。

### 2 算法原理

#### 2.1 变换域内方向树结构矢量的设计

小波变换域内对不同子带单独进行矢量量化,根据每个子带的重要程度不同分别训练一个码书,码矢维数和码书尺寸大小都可以不同,这种方法编码效率不高,它仅仅利用了

频率分辨率,而未充分考虑空间分辨率,因为同方向的各级子带之间具有相似性。

本文提出一种利用了各级子带间的频率分辨率和空间分辨率并结合了二进离散小波方向性的新的带间矢量组合方法。带内矢量构成一般采用矩形形状,并且其形状与该子带的方向性相一致<sup>[6]</sup>,这样可以更充分地利用带内系数之间的相关性,同样可以把这一思想运用到带间矢量构成方法中,将同一方向上形状一致的矩形带内子矢量按四叉树结构重新组合从而形成本文的矢量构成方法,由于既考虑了子带的方向性又采取了树结构形式的系数组合故称之为方向树结构矢量。具体地说,以水平方向子带为例,设图像( $N \times N$ )进行了 $J$ 层小波分解,根据文献[5],文献[7]的零树思想,组合矢量由第 $J$ 层子带中2个系数(排列为 $1 \times 2$ ),以及分别以这两个父系数为根的四叉树上的低层子带系数构成,即新的组合矢量 $\mathbf{v}(x, y)$ 为

$$\mathbf{v}(x, y) = \{d_J, d_{J-1}, \dots, d_1\},$$

$$0 \leq x \leq N/2^J - 1, 0 \leq y \leq N/2^{J+1} - 1 \quad (1)$$

其中 $N$ 为原始图像大小,

$$d_j = d_j(2^{J-j}x + p, 2^{J+1-j}y + q),$$

$$0 \leq p \leq 2^{J-j} - 1, 0 \leq q \leq 2^{J+1-j} - 1 \quad (2)$$

为 $2^J$ 尺度下水平方向的子带中维数为 $2^{J-j} \times 2^{J+1-j}$ 的矢量,则组合矢量 $\mathbf{v}(x, y)$ 的维数为

$$m(J) = 2 \sum_{j=0}^{J-1} 2^{2j} = \frac{2}{3}(4^J - 1) \quad (3)$$

其它方向子带组合矢量的构成与此类似,不同的是垂直方向第 $J$ 层子带系数按 $2 \times 1$ 方式排列,矢量维数与水平方向相同,而对角方向第 $J$ 层子带系数按 $2 \times 2$ 方式排列,矢量维数是式(3)的两倍。

## 2.2 方向树结构矢量量化的加权均方误差准则

因为在图像的塔式小波分解中,大尺度下数据在恢复图像时经过滤波的次数要多,因而量化误差对恢复图像的质量将产生较大影响,且影响的空间范围比较小尺度下的数据要大。因此适合于采用了基于人眼视觉特性的加权均方误差准则(WMSE)进行最佳矢量的匹配。

$$d_w(X, Y) = \sum_{i=0}^{K-1} w_i^2 (x_i - y_i)^2 \quad (4)$$

其中 $K$ 为矢量维数, $w_i$ 为加权系数。

Desarte等<sup>[8]</sup>利用人眼的视觉特性对灰度图像设计了一种加权量化方案以减小量化噪声。显然本文采用的方向树结构矢量组合方式是一种同方向跨带矢量组合,可以很方便地

进行以上加权的矢量量化,采用文献[8]中给出的各级子带对应加权系数。

## 2.3 采用分类矢量量化

由于图像复杂多样,形成的矢量变化多端,要建立一个囊括各种变化的大型码书则不太可能,而且码书尺寸越大,编码所需的比特数越多,匹配搜索时间越长,影响其应用。于是分类矢量量化在这种情况下产生,通过对矢量进行分类后,用各自独立的码书分别进行量化。文献[9]将组合成的64维矢量分成4类:水平方向活跃,垂直方向活跃,对角方向活跃,方向不明显。对分类矢量分别进行不同的处理,实现较为复杂,每一矢量的分类信息要占用2个比特,编码效率不高。

下面提出一种新的分类方法,分以下3点:

(1)按本文矢量构成无需作任何判别,自然地分成3类:水平方向、垂直方向和对角方向。对3个方向的矢量作量化是可以分别选取不同的码书尺寸及采用其它不同的量化策略。实验表明<sup>[1]</sup>,人类的视觉对对角方向的失真比较迟钝,对最高频对角子带的失真最为迟钝,加之本身能量较小,所以可以完全丢弃最高频对角子带,并对对角方向矢量采用较小的码书尺寸。在下面矢量分类算法中,对角方向矢量还可以产生更多的非重要类矢量,大大减少了编码率和量化复杂度,这样相比其它方法在相同信噪比的情况下,可以获得更高的“主观信噪比”。

(2)矢量能量决定了其对恢复图像质量的贡献程度,能量越大其对恢复图像质量贡献越大。由于各高频子带系数的值大部分分布在零值附近,并且同方向同空间位置小波系数具有很大的相似性,因此本文采用的方向树结构矢量组合具有很好的能量集中特性,这有利于我们采用简单的能量判决对矢量进行第一次分类。设矢量维数为 $K$ ,矢量能量使用以下形式:

$$W(x_i) = \sum_{k=0}^{K-1} |x_{i,k}| \quad (5)$$

相对于一定的能量门限 $T$ ,若 $W > T$ ,则该矢量为重要类,反之则为非重要类,由于非重要类矢量对恢复图像质量贡献不大,数量又多,对非重要类矢量不进行编码可极大地提高编码效率。

(3)由于本文矢量构成依据了四叉树的规则,因此可以方便地引入零树编码的思想。零树<sup>[5]</sup>是基于小波系数相关性的一种假设:如果在低分辨率高频子带上的小波系数相对于门限 $T$ 是无意义的,那么位于同方向同空间位置高分辨率子带

上的所有小波系数相对于门限  $T$  也是无意义的。把满足这种假设的系数用树状结构表示出来, 就是零树。另一方面, 方向树结构矢量可视为由同方向各高频子带中系数所组成的子矢量组合而成, 对于子矢量  $x = (x_1, x_2, \dots, x_K)$  采用方差作为其活跃度的度量:

$$\delta = E[x - E(x)]^2 \quad (6)$$

其中

$$E(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} x_k \quad (7)$$

子矢量活跃度  $\delta$  及所在子带的分辨率级  $i$  决定了其重要程度, 活跃度  $\delta$  越大其所含图像边缘信息越多, 分辨率级越高对恢复图像的质量贡献越大, 因此  $\delta$  和  $i$  越大的矢量就越重要。将零树思想推广至矢量情形, 同时使用子矢量活跃度的判断方法对重要类方向树结构矢量作第二次分类: 对于一定的子矢量活跃度门限  $\delta_T$ , 若最低分辨率高频子带中子矢量活跃度  $\delta > \delta_T$ , 则该子矢量是活跃的, 相应的高分辨率子带子矢量及其所在的方向树结构矢量也是活跃的, 采用较大尺寸的码书量化; 反之则是不活跃的, 采用较小尺寸的码书量化。显然按活跃度分类大大降低了每个矢量所在类的内部离散度, 从而有利于减小量化误差。

根据矢量构成规则, 矢量的个数仅为最低分辨率上各高频子带系数的总和。每次分类信息的表示仅需 1bit, 由于第一次分类后重要类矢量个数大大减少, 所以再经第二次分类后总的分类信息占用的比特数大大减少。

### 3 方案实现

根据图像编码时小波的选择原则及其特性, 选择了双正交的(9, 7)滤波器<sup>[10]</sup>作小波变换。对输入图像使用对称延拓方式作三级小波分解。

因最低分辨率级的 LL3 低频子带对图像恢复质量影响很大, 但数据量又很小, 所以不进行矢量量化, 对其单独处理, 利用 LL3 系数之间的相关性, 采用 DPCM 加算术编码

对其进行压缩。

实验表明, 对小波系数不作量化而直接进行小波逆变换, 把最高分辨率级对角方向子带 HH1 系数全部置零, 恢复图像的峰值信噪比 PSNR 为 44.17dB, 因此 HH1 的系数可以全部丢弃。这样对小波系数按照式(1), 式(2)组合成新的矢量时, 水平和垂直方向的组合矢量维数为  $2+8+32=42$  维, 而对角方向的组合矢量维数为  $4+16=20$  维。

为了能够自适应确定各门限值, 首先对矢量能量和最低分辨率级各方向高频子带系数构成的子矢量活跃度作出统计, 按编码率和图像质量的要求; 依据各方向的矢量平均能量设定能量门限; 依据各方向的最低分辨率级子矢量活跃度均值设定活跃度门限; 进行矢量分类后, 将矢量分类的信息单独保存, 再运用结合人眼视觉特性的加权均方差准则对重要类矢量按其活跃度的不同选择不同尺寸大小的码书分别进行加权矢量量化; 最后运用 Huffman 熵编码即变长编码进行编码率的进一步压缩。由此可以得到采用方向树结构矢量组合和分类矢量化的小波图像编/解码算法框图(图 1)。

解码时, 逆索引器根据索引号在码书中索引对应的组合矢量, 结合分类信息, 恢复出 8 个高频子带, 再与自适应算术解码出的低频子带及全部置零的 HH1 子带一起作小波综合, 得到恢复图像。

### 4 仿真结果

采用标准图像  $512 \times 512 \times 8\text{bit}$  Lena 对系统性能进行模拟实验仿真(图 2)。表 1 列出了对 Lena 小波图像组合矢量及最低分辨率子带子矢量采用式(5)、式(6)中能量和方差的定义进行均值统计的结果。

对重要类矢量根据其活跃度进行第二次分类后使用 LBG 算法进行训练生成不同尺寸的码书, 在水平、对角和垂直 3 个方向上活跃类矢量码书尺寸分别取为 256、64 和 256, 相应的非活跃类矢量码书尺寸取为 128、32 和 128。表 2 列出了使用不同门限分类下的仿真结果, 对矢量化后有无

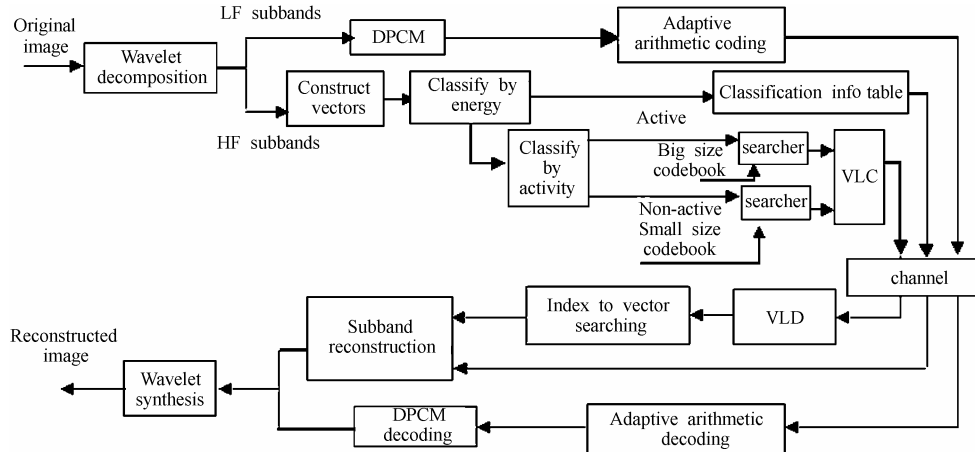


图 1 方向树结构矢量组合和分类矢量化编/解码结构框图

表 1 Lena 小波图像的统计结果

| 垂直方向矢量<br>平均能量 | 对角方向矢量<br>平均能量 | 水平方向矢量<br>平均能量 | HL3 子矢量<br>方差平均 | HH3 子矢量<br>方差平均 | LH3 子矢量<br>方差平均 |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 45.00          | 7.805          | 30.55          | 9.69            | 3.33            | 5.25            |

表 2 Lena 图像仿真结果

| 水平门限 |     | 对角门限 |     | 垂直门限 |     | 不作量化  |       | 无 Huffman |      | 有 Huffman |      | 加权 VQ |       |
|------|-----|------|-----|------|-----|-------|-------|-----------|------|-----------|------|-------|-------|
| 能量   | 活跃度 | 能量   | 活跃度 | 能量   | 活跃度 | SNR   | PSNR  | 编码率       | 压缩比  | 编码率       | 压缩比  | SNR   | PSNR  |
| 0    | 1   | 0    | 1   | 0    | 1   | 23.78 | 44.17 | 0.257     | 31.1 | 0.219     | 36.6 | 7.43  | 32.84 |
| 2/3  | 1/4 | 2/3  | 1/2 | 2/3  | 1/4 | 13.54 | 38.61 | 0.195     | 41   | 0.174     | 45.9 | 6.95  | 32.37 |
| 1    | 1   | 1    | 1   | 1    | 1   | 9.332 | 34.84 | 0.165     | 48.5 | 0.152     | 52.6 | 7.06  | 32.35 |
| 4/3  | 1/4 | 4/3  | 1/2 | 4/3  | 1/4 | 7.479 | 33.05 | 0.158     | 50.6 | 0.146     | 54.8 | 6.74  | 31.94 |



(a) Lena 原始图像

(b) 0.219bpp,  
PSNR=32.84db(c) 0.152bpp,  
PSNR=32.35db

图 2

Huffman 熵编码的编码率和压缩比作出了比较。各门限值的确定依据了表 1 对能量和方差的统计结果，门限数据为表 1 中相应统计结果的倍数。表 2 中 PSNR 表示恢复图像的峰值信噪比，信噪比 SNR 是对子带系数矢量量化的失真度量，分别定义如下(单位均为分贝)：

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2}{\text{MSE}}, \quad \text{SNR} = 10 \lg \frac{P_{\text{av}}}{\text{MSE}}$$

式中 MSE 表示均方误差， $P_{\text{av}}$  表示平均功率。

以上结果表明，能量门限  $T$  的大小决定了不作矢量量化直接进行小波综合的恢复图像 PSNR， $T=0$  时 PSNR 最高为 44.17dB，随着  $T$  的增加编码率逐渐减小同时 PSNR 显著降低。但是对重要类矢量按活跃度再分类并分别进行矢量量化后恢复图像的 PSNR 并没有随之显著地降低，而是均维持在 32dB 左右，就是说通过矢量分类在编码率大大减小的情况下恢复图像 PSNR 却降低得非常有限。这是因为当能量门限减小时重要类矢量个数增加，在相同的码书尺寸下对这些矢量进行量化造成的子带系数整体失真就会相应增加。由此可见本文的矢量分类算法是十分有效的。矢量量化后使用 Huffman 编码，压缩比增加 10% 左右，而使用加权矢量量化更符合人眼的视觉特性，有更好的主观信噪比。由表 3 结果比较可以看出，本文算法结果明显优于文献[2，5，9]。

## 5 结束语

本文基于零树编码和分类矢量量化的思想，采用方向树

表 3 Lena 图像压缩结果比较

|          | 文献[2] | 文献[3] | 文献[6] | 本文算法  |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| PSNR(dB) | 29.11 | 31.33 | 31.8  | 32.35 |
| 编码率(bpp) | 0.21  | 0.25  | 0.32  | 0.152 |

结构跨带矢量组合，与子带系数的方向相一致，不仅充分利用了各级子带系数的带间相关性和带内相关性，而且解决了带内矢量组合的不同分辨率子带的比特分配问题。先按子带方向特性自然分类，由矢量能量的集中特性使用能量门限保留一部分的重要类矢量，由矢量信息的边缘特性使用活跃度门限作出二级分类，减少了分类信息的占用比特数，同时大大降低了每个矢量所在类的内部离散度，再采用基于人眼视觉特性的加权均方误差准则对活跃类和非活跃类矢量分别进行加权矢量量化，最终达到减小量化误差的目的。仿真结果表明，本文算法实现简单，并且具有很好的压缩效果。

## 参 考 文 献

- [1] Mallat S. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models. *IEEE Trans. on ASSP*, 1989, 37 (12): 2091 – 2110.
- [2] Atonini M, Barlaud M, Mathieu P. Image coding using wavelet transform, *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992, 1(2): 205 – 220.
- [3] Zaid A O, Olivier C, Marmotton F. Wavelet image coding with adaptive dead-zone selection: application to JPEG2000. *Image Processing. 2002. Proceedings*, 2002, 3(1): 253 – 256.
- [4] ISO/IEC, International Standard 15444-1: 2000, Information technology-JPEG2000 image coding system-Part 1: Core coding system.
- [5] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet

- coefficients. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445 – 3462.
- [6] Cosman P C, Gray R M, Vetterli M. Vector quantization of image subbands: A survey. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, 5(2): 202 – 225.
- [7] Taekon K, Seungkeun C, Van Dyck R E, Bose N K, Chandler A. Classified zerotree wavelet image coding and adaptive packetization for low-bit-rate transport. *IEEE Trans. on CSVT*, 2001, 11(9): 1022 – 1034.
- [8] Desarte P, Macq B, Slock D. Signal-adapted multiresolution transform for image coding. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1992, 38(2): 897 – 904.
- [9] Huh Y, Hwang J J, Rao K R. Block wavelet transform coding of images using classified vector quantization. *IEEE Trans. on CSVT*, 1996, 5(1): 63 – 67.
- [10] Villasenor J, Belzer B, Liao J. Wavelet filter evaluation for image compression. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4(8): 1053 – 1060.
- 郑 勇: 男, 1970年生, 博士, 香港理工大学访问学者, 在数字视频/图像编码与传输领域发表文章20余篇, 现任世宏科技(苏州)有限公司高级工程师, 资深项目经理, 目前从事H.264/MPEG4-AVC的算法研究及其VLSI架构设计和实现.
- 李德明: 男, 1963年生, 加拿大Concordia大学Master, 现任世宏科技(苏州)有限公司资深经理, 目前指导和从事新一代音视频标准MPEG-4,AAC等相关产品的SoC系统设计和实现.
- 朱维乐: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 研究兴趣主要有数字视频及 HDTV 系统、图像序列的三维运动估计和三维结构恢复以及数字视频方向的 VLSI 设计等.