

一种方向提升小波变换和网格编码量化的 图像编码算法

侯兴松¹, 江桂凤¹, 吉荣晶¹, 史乘龙²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安电子工程研究所, 710100, 西安)

摘要: 由于 JPEG2000 图像压缩标准不能有效表示图像边缘的缺陷, 提出了一种结合方向提升小波变换和网格编码量化(TCQ)的图像编码算法. 该算法先通过基于率失真优化的四叉树分割算法得到最优变换方向, 再沿最优变换方向做方向提升小波变换, 然后对得到的小波子带系数进行 TCQ 量化, 最后将量化系数编码输出. 实验结果表明, 对所给定的测试图像, 该算法比 JPEG2000 峰值信噪比最多提高了 1.49 dB, 比 JPEG2000 的结构相似度最多提高了 3.98%, 解码图像的主观视觉质量更好.

关键词: 方向提升小波变换; 网格编码量化; 图像编码

中图分类号: TN919.81 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)02-0067-05

An Image Coding Algorithm Combining Directional Lifting Wavelet Transform and Trellis Coded Quantization

HOU Xingsong¹, JIANG Guifeng¹, JI Rongjing¹, SHI Chenglong²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Institute of Electronics Engineering, Xi'an 710100, China)

Abstract: An image coding algorithm combining the directional lifting wavelet transform (DLWT) and the trellis coded quantization (TCQ) is presented to overcome the drawback of JPEG2000 image compression standard in representing image edges. This algorithm firstly uses a rate-distortion optimization-based quadtree segmentation method to get the optimal transform directions, performs DLWT along the optimal transform directions, then quantizes the wavelet subband coefficients by TCQ, and finally encodes the quantization coefficients outputting the bit-stream. Experimental results show that the proposed image coding algorithm outperforms JPEG2000 for the given test images up to 1.49 dB in peak signal-to-noise ratio and 3.98% relatively in multi-scale structural similarity index, and that significant improvement in the subjective visual quality of decoded images is also observed.

Keywords: directional lifting wavelet transform; trellis coded quantization; image coding

传统小波变换具有优异的时频局部化能力, 被广泛应用于图像压缩编码领域, 但是它不能稀疏表示图像中多个方向的边缘, 影响了基于小波变换的图像编码算法的压缩性能. 方向提升小波变换将空间方向预测与小波提升结构相结合, 具有传统小波

变换可分离和无冗余的优点, 可稀疏表示图像中的边缘. 基于方向提升小波变换的图像编码算法^[1-5]的压缩性能明显高于 JPEG2000, 但是这些编码算法对小波子带系数只进行简单的标量量化(SQ), 没有采用一种高性能量化器来进一步提高压缩性能. 网

格编码量化(TCQ)^[6]是一种高效的、具有很好视觉效果的量化方法,已被用于 JPEG2000 第2部分^[7]和合成孔径雷达(SAR)的数据压缩^[8],得到了很好的压缩性能.本文提出了一种基于方向提升小波变换和 TCQ 的图像编码算法.为了减少方向提升小波变换引入的额外编码开销,本文采用了一种基于简单拉格朗日代价函数的二叉树分割算法^[9]对图像进行率失真优化分割.

1 编码算法

本文提出的图像编码算法框架如图1所示.首先对输入图像进行二维方向提升小波变换以获得图像的稀疏表示,然后将得到的小波子带系数进行 TCQ 量化,最后对量化系数进行优化截断嵌入式块编码(EBCOT),输出压缩码流.



图1 本文算法框架

1.1 方向提升小波变换

方向提升小波变换利用图像的空间方向相关性,将空间方向预测融入到小波提升结构中,可稀疏表示图像边缘.图2是二维方向提升小波变换的示意图.输入二维信号 $x(m,n)$,其中 m 和 n 分别表示行和列序号,先进行行分量的一维方向提升小波变换,得到一个水平低通子带(L)和一个水平高通子带(H),再对 L 子带进行列分量的一维方向提升小波变换,得到 L 的低通和高通分量 L_L, L_H . H 子带由于能量低,可进行列分量的一维传统提升小波变换,得到 H 的低通和高通分量 H_L, H_H .行/列分量的一维方向提升小波变换相当于水平/垂直变换,分别对输入图像和水平低通子带做率失真优化分割,以减少方向信息的额外编码开销.下面将分别介绍方向提升和二叉树分割.

1.1.1 方向提升 方向提升采用基于加权自适应提升小波变换(WAL)的改进加权提升方案^[5],包含分裂、预测和更新3个步骤.下面以二维信号 $x(m,$

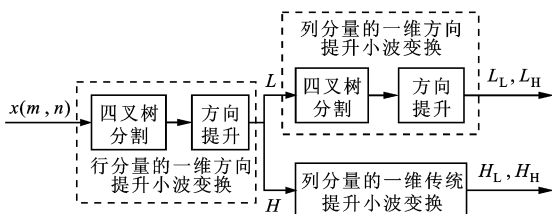


图2 二维方向提升小波变换

$n)$ 行分量的方向提升过程为例来说明.首先,将 $x(m,n)$ 分裂成偶数集 $x_e(m,n)$ 和奇数集 $x_o(m,n)$,即

$$\left. \begin{aligned} x_e(m,n) &= x(m,2n) \\ x_o(m,n) &= x(m,2n+1) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其次,用最优方向上的偶像素值来预测奇信号

$$h(m,n) = x_o(m,n) - \sum_{i=0}^1 p_i x_e^d(m,n+i) \quad (2)$$

式中: p_i 为预测系数; $x_e^d(m,n+i)$ 表示 $x_o(m,n)$ 在最优预测方向 d 的相邻偶像素值.如果 d 等于-1、0或1,则 $x_e^d(m,n+i)$ 为偶整数像素值,否则 $x_e^d(m,n+i)$ 是由周围的偶整数像素点插值得到的偶小数像素值.最后,偶信号用其在预测阶段预测得到的高通信号反过来更新

$$l(m,n) = x_e(m,n) + \sum_{j=-1}^0 u_j \{ \beta_j x_o^d(m,n+j) + \gamma_j \} \quad (3)$$

式中: u_j 为更新系数; β_j 和 γ_j 为补偿系数; $x_o^d(m,n+j)$ 表示 $x_e(m,n)$ 左侧或右侧预测的所有奇像素点的加权和,即

$$x_o^d(m,n+j) = \sum_l w_{j,l} x_o(m,n) \quad (4)$$

其中 $w_{j,l}$ 为加权系数.在上述提升过程中,参数 β_j 、 γ_j 和 $w_{j,l}$ 的选择详见文献^[5], p_i 、 u_j 由选定的小波滤波器来确定.

1.1.2 二叉树分割 为了减少方向提升小波变换中引入的方向信息的额外编码开销,可对图像进行率失真优化分割,常用方法是 H.264 的宏块分割方式^[10].宏块分割方式先将图像分成一个个宏块,再对每个宏块进行宏块和子宏块分割,它不同码率下具有相同的宏块数.设水平变换和垂直变换的宏块大小分别为 16×16 和 8×16 ,若对 512×512 像素的8b灰度图像做3级二维方向提升小波变换,共有2688个宏块,假设宏块模式编码只需1b,则共需2688b,其分块编码开销相当于 $0.0103 \text{ b} \cdot \text{像素}^{-1}$.事实上,在采用通用可变长编码(UVLC)进行宏块模式编码的条件下,宏块模式的编码比特数大于等于1b,3级方向提升小波变换的分块编码开销肯定大于 $0.0103 \text{ b} \cdot \text{像素}^{-1}$,这将严重影响低码率下图像编码的率失真性能.

本文采用一种基于简单拉格朗日代价函数的二叉树分割算法^[9]对图像进行率失真优化分割,减少了分块编码开销.首先通过递归的方法将一个块不断分成4个同样大小的子块来创建一棵完整的二叉树,直到子块的大小为一个预先设好的最小块,本文

取水平和垂直变换的最小块为 4×4 和 2×4 , 然后比较每个中间节点和其对应的 4 棵最优子树的拉格朗日代价, 如果中间节点的代价小就合并节点, 否则保留 4 棵最优子树。

树节点 X_n 的拉格朗日代价函数为

$$J(X_n) = D(X_n) + \lambda R(X_n) \quad (5)$$

式中: $D(X_n)$ 为树节点 X_n 的失真量, 它是 X_n 内所有奇像素点 $x_o(i, j)$ 与其最优变换方向 d 上 2 个相邻偶像素点 $x_e^d(i, j)$ 和 $x_e^d(i, j+1)$ 平均值的绝对误差和 (i 和 j 分别表示行和列序号)

$$D(X_n) = \sum_i \sum_j \left| x_o(i, j) - \frac{1}{2} (x_e^d(i, j) + x_e^d(i, j+1)) \right| \quad (6)$$

$R(X_n)$ 是树节点 X_n 的码率, 它包含 1 b 合并判决和方向预测编码比特数

$$R(X_n) = 1 + R(d - d_p) \quad (7)$$

其中 d_p 是空间预测方向, 可由相邻块的方向预测得到^[4], 其预测残差采用指数哥伦布码 (Exp-Golomb)^[10] 来编码。

1.2 网格编码量化

TCQ^[6] 借鉴了网格编码调制中信号集合扩展和信号集合划分以及网格状态转化的思想, 可达到非常接近于率失真理论允许的均方误差性能。TCQ 可以看作是时变的标量量化, 它首先在 4 个标量量化器中分别找到与每个输入样本最接近的码字, 然后用维特比算法搜索一条使得输入序列和重构序列间总体误差最小的最佳网格路径。

1.3 算法复杂度分析

方向提升小波变换的计算复杂度高于传统小波变换, 其原因有 2 个: ①一级二维方向提升小波变换需做 2 次率失真最优化分割 (包括最优四叉树构造和每个子块 9 个最优方向的搜索); ②小数像素点插值。由于采用了方向提升小波变换, 本文编码算法的计算复杂度高于采用 TCQ 的 JPEG2000。

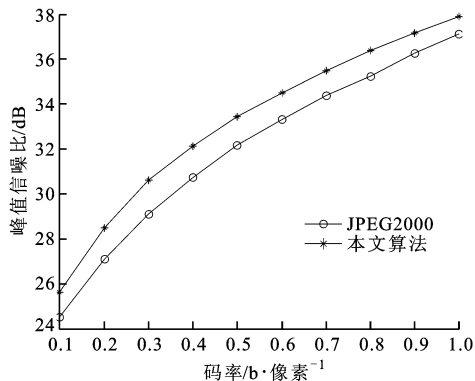
2 实验结果

本文的实验结果都是基于现有 JPEG2000 标准, 对输入图像进行 3 级 CDF9/7 小波变换, 将生成的小波子带系数进行 TCQ 量化和 EBCOT 编码。测试图像为 Barbara 和 Fingerprint 灰度图像^[11], 其大小为 512×512 像素, 码率为 $8 \text{ b} \cdot \text{像素}^{-1}$ 。

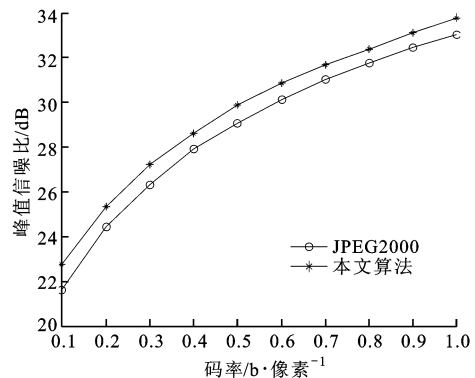
2.1 本文算法和 JPEG2000 的性能比较

图 3 是本文算法和 JPEG2000 的峰值信噪比比

较。由图 3 可见, 本文算法的峰值信噪比明显高于 JPEG2000。对于 Barbara 图像, 本文算法提高了 $0.78 \sim 1.49 \text{ dB}$, 对于 Fingerprint 图像, 本文算法提高了 $0.63 \sim 1.14 \text{ dB}$ 。图 4 给出了本文算法和 JPEG2000 在码率为 $0.2 \text{ b} \cdot \text{像素}^{-1}$ 下的 Barbara 解码图像。与图 4b 相比, 图 4c 更为清晰且振铃效应小, 在桌布、裤腿和桌腿阴影等区域主观视觉具有非常明显的改善, 但与图 4a 相比, 图 4c 因大的量化效应仍存在一定程度的视觉失真。由于结构相似度 (MSSIM)^[12] 结合了人类视觉特性 (HVS), 能较准确地反映图像的主观视觉质量, 本文也给了解码图像的结构相似度评价。由图 5 可见, 在低码率下, 本文算法的结构相似度明显优于 JPEG2000。对于 Barbara 和 Fingerprint 图像, 本文算法在码率 $0.1 \text{ b} \cdot \text{像素}^{-1}$ 下比 JPEG2000 的结构相似度分别提高了 2.36% 和 3.98% 。



(a) Barbara 图像



(b) Fingerprint 图像

图 3 本文算法与 JPEG2000 的峰值信噪比较

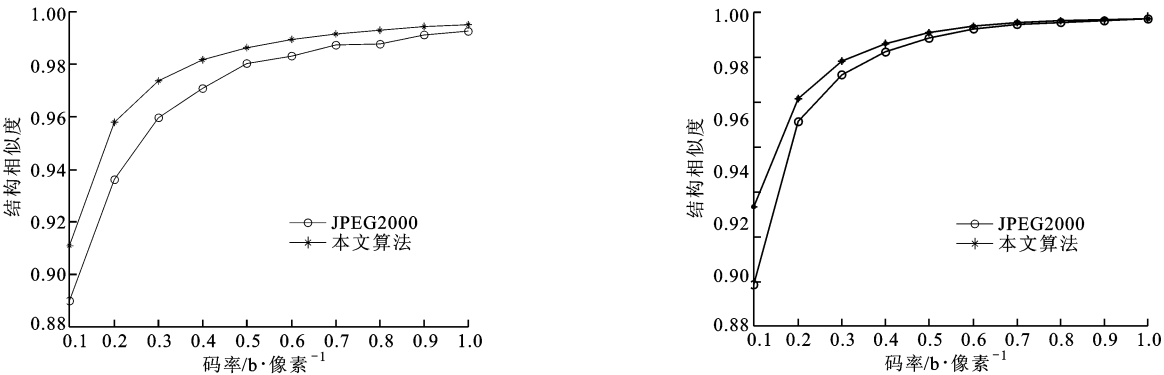
2.2 四叉树分割的性能

表 1 给出了四叉树分割和宏块分割的分块编码开销比较。由表 1 可见, 四叉树分割的分块编码开销明显小于宏块分割。由表 2 可见, 四叉树分割的峰值



(a)原始图像 (b)JPEG2000 (c)本文算法

图 4 在码率为 0.2 b · 像素⁻¹下 Barbara 解码图像的主观视觉质量比较



(a)Barbara 图像 (b)Fingerprint 图像

图 5 本文算法与 JPEG2000 的结构相似度比较

表 1 四叉树分割和宏块分割的分块编码开销比较

码率/ b · 像素 ⁻¹	分块编码开销/b · 像素 ⁻¹			
	Barbara 图像		Fingerprint 图像	
	宏块	四叉树	宏块	四叉树
0.125	0.017 7	0.004 1	0.014 1	0.000 7
0.25	0.019 2	0.004 4	0.014 7	0.000 7
0.5	0.021 4	0.006 9	0.016 3	0.000 9
1	0.021 4	0.008 9	0.017 4	0.000 9

表 2 四叉树分割和宏块分割的峰值信噪比比较

码率/ b · 像素 ⁻¹	峰值信噪比/dB			
	Barbara 图像		Fingerprint 图像	
	宏块	四叉树	宏块	四叉树
0.125	26.05	26.42	23.15	23.62
0.25	29.45	29.63	26.10	26.33
0.5	33.34	33.42	29.70	29.87
1	37.88	37.89	33.72	33.79

信噪比大于宏块分割,低码率下的增益明显. 对于 Fingerprint 图像,四叉树分割在码率 0.125 b · 像素⁻¹下比宏块分割提高了 0.47 dB. 可见,本文算法通过采用四叉树分割方式减少了分块编码开销,解决了低码率下额外编码开销太大的问题.

3 结论与展望

本文提出了一种基于方向提升小波变换和网格编码量化的图像编码算法,该算法和 JPEG2000 相比具有更好的峰值信噪比和结构相似度,其解码图像的主观视觉质量也很好. 为了减少方向提升小波变换引入的分块编码开销,本文采用了一种基于简单拉格朗日代价函数的四叉树分割算法,解决了低码率下额外编码开销太大的问题. 但是,本文算法的计算复杂度高于采用 TCQ 的 JPEG2000,这可以通过进一步研究快速的分块和方向搜索算法来降低复杂度,也可以采用快速处理器,如多核处理技术来提高运算速度. 虽然在低码率下本文算法相对于 JPEG2000 而言解码图像获得了更好的视觉质量,但在一些纹理丰富的区域(如 Barbara 图像下垂的

桌布区域)仍然存在由于大的量化电平所引起的失真,为此可以考虑设计更为合理的方向变换策略来进一步聚集纹理丰富区域的能量,或者直接通过纹理建模的方法^[13]来进一步改善本文算法在纹理丰富区域的解码图像质量,这也是我们下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] CHAPPELIER V, GUILLEMOT C. Oriented wavelet transform for image compression and denoising [J]. IEEE Trans Image Processing, 2006, 15(10): 2892-2903.
- [2] CHANG Chuoling, GIROD B. Direction-adaptive discrete wavelet transfer for image compression [J]. IEEE Trans Image Processing, 2007, 16(5): 1289-1302.
- [3] 张楠, 吕岩, 吴枫, 等. 基于方向提升小波变换的多描述图像编码[J]. 自动化学报, 2007, 33(5): 567-576.
ZHANG Nan, LÜ Yan, WU Feng, et al. Image compression algorithm using wavelet-based Contourlet transform [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(5): 567-576.
- [4] DING Wenpeng, WU Feng, WU Xiaoling, et al. Adaptive directional lifting-based wavelet transform for image coding [J]. IEEE Trans Image Processing, 2007, 16(2): 416-427.
- [5] LIU Yu, NGAN K N. Weighted adaptive lifting-based wavelet transform for image coding [J]. IEEE Trans Image Processing, 2008, 17(4): 500-511.
- [6] KASNER J H, MARCELLIN M W, HUNT B R. Universal trellis coded quantization [J]. IEEE Trans Image Processing, 1999, 8(12): 1677-1687.
- [7] TAUBMAN D S, MARCELLIN M W. JPEG2000 图像压缩基础、标准和实践 [M]. 魏江力, 柏正尧, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [8] HOU Xingsong, LIU Guizhong, ZOU Yiyang. SAR image data compression using wavelet packet transform and universal-trellis coded quantization [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2632-2641.
- [9] SULLIVAN G J, BAKER R L. Efficient quadtree coding of images and video [J]. IEEE Trans Image Processing, 1994, 3(3): 327-331.
- [10] Telecommunication Standardization Sector. ITU - T recommendation H. 264 advanced video coding for generic audiovisual services [S]. Geneva, Switzerland: Telecommunication Standardization Sector, 2003.
- [11] PORTILLA J. Test images [EB/OL]. (2005-03-14) [2009-08-01]. http://decsai.ugr.es/~javier/denoise/test_images/index.htm.
- [12] WANG Zhou, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error measurement to structural similarity [J]. IEEE Trans Image Processing, 2004, 13(4): 600-613.
- [13] NADENAU M J, REICHEL J, KUNT M. Visually improved image compression by combining a conventional wavelet-codec with texture modeling [J]. IEEE Trans Image Processing, 2002, 11(11): 1284-1294.

[本刊相关文献链接]

- 视频通信中的选择性重传技术. 2009, 43(6): 282-287.
- 适合于小波视频编码的尺寸自适应图像组结构. 2009, 43(4): 52-56.
- 利用 MPEG-4 视频流的运动目标检测算法. 2008, 42(4): 454-457.
- 保证 H. 264 视频通信质量的实时传输协议载荷. 2007, 41(12): 1455-1459.
- 一种基于小波的 Contourlet 变换的图像压缩算法. 2007, 41(4): 479-483.
- 基于区域特性的 Contourlet 域多聚焦图像融合算法. 2007, 41(4): 448-452.
- 基于直方图偏差约束的快速模糊 C 均值图像分割法. 2007, 41(4): 430-434.
- 结合对比度塔和克隆选择加权 Wedgelets 的图像融合. 2007, 41(10): 1170-1174.
- 质心迭代图像跟踪算法. 2007, 41(12): 1396-1400.
- 分散、递阶蚁群算法及其在相变序列图像分割中的应用. 2007, 41(2): 136-140.
- 基于模板匹配的图像配准算法. 2007, 41(3): 307-311.
- 码率约束抗丢包伸缩码流保护的码率分配方法. 2006, 40(12): 1432-1435.
- 基于双密度双树复数小波变换的图像去噪. 2006, 40(2): 246-248.
- MPEG-4 码率控制方案的改进研究. 2005, 39(10): 1052-1055.

(编辑 刘杨)