

一种基于小波的 Contourlet 变换的图像压缩算法

宋蓓蓓, 许录平, 孙文方

(西安电子科技大学电子工程学院, 710071, 西安)

摘要: 针对 JPEG2000 图像压缩不能有效地保护图像边缘的局限, 提出了一种结合基于小波的 Contourlet 变换与最优截断嵌入码块编码 (EBCOT) 的静止图像压缩算法 (CEBCOT). 在 Contourlet 变换中采用小波变换取代拉普拉斯塔式变换获得了非冗余基于小波的 Contourlet 变换, 它通过方向滤波器组把小波变换的高频子带进一步分解为多个方向子带, 从而更稀疏地表示了图像的边缘和纹理. CEBCOT 采用了改进的 EBCOT 编码, 它依照方向子带大小进行编码块分割, 提高了编码性能. 实验结果表明, 相对于 JPEG2000, 所提出的算法获得的压缩图像边缘更加清晰, 峰值信噪比提高了 0.1~0.8 dB.

关键词: Contourlet 变换; 静止图像压缩; 方向子带

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)04-0479-05

Image Compression Algorithm Using Wavelet-Based Contourlet Transform

Song Beibei, Xu Luping, Sun Wenfang

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To overcome the limitation of JPEG2000 in image edge preservation, a novel still image compression algorithm called CEBCOT was presented, in which the algorithm was constructed by wavelet-based contourlet transform and embedded block coding with optimized truncation (EBCOT). In the contourlet transform, the Laplacian pyramid transform was replaced by the wavelet transform to obtain non-redundant wavelet-based contourlet transform. The high frequency subband decomposed by the wavelet transform was further decomposed into multiple directional subbands by directional filterbank so as to explain the edge and texture of the image more sparsely. A modified EBCOT coder with code-block partition according to the size of directional subband was adopted to increase the coding performance. Experiments demonstrate that compared to JPEG2000, the edges of the compressed images obtained by our proposed algorithm are clearer, the peak signal-noise ratio is increased by 0.1 dB to 0.8 dB.

Keywords: contourlet transform; still image compression; directional subband

由于小波变换不能有效地表示图像的方向性信息, 研究者们提出了图像的多尺度几何分析方法, 其中的 Contourlet^[1]变换就是较为突出的一种, 它具有多分辨率、局部化和方向性等特征, 能更好地刻画图像轮廓和纹理. 但是, 由于原始的 Contourlet 变换具有 4/3 的冗余度, 因此不适于图像压缩. 近来, 一些文献^[2-5]用传统的小波变换取代 Contourlet 变

换中的拉普拉斯金字塔式变换获得了非冗余 Contourlet 变换, 在此基础上结合多级树集合分裂编码算法 (SPIHT)^[6]提出了一种基于非冗余 Contourlet 变换的 SPIHT 算法 (简称 CSPIHT), 提高了富含方向特征图像的压缩效率. 但是, CSPIHT 算法并不能提供可变的滤波器分解级数和优化的率失真技术, 还需进一步完善. 最优截断嵌入码块编码

(EBCOT)^[7-8]是一种比 SPIHT 更灵活和有效的数据编码算法,它所具有的独立编码块和最优化编码技术可以充分利用基于小波的 Contourlet 变换在提取图像方向信息和图像稀疏化表示方面的优势,以达到提高编码效率和保护图像边缘纹理的目的.由此,本文提出一种结合基于小波的 Contourlet 变换和 EBCOT 编码的压缩算法(简称 CEBCOT).

1 基于小波的 Contourlet 变换

1.1 方向滤波器

方向滤波器的设计是基于图像边缘与其频谱分布的关系而导出的.对于二维连续空间中的直线 $L(x_1, x_2) = \delta(x_2 - ax_1 - b)$ (其中 a 为斜率, b 为截距),其傅里叶变换为 $\hat{L}(\omega_1, \omega_2) = \exp(-j\omega_2 b) \delta(\omega_1 + a\omega_2)$,故时域中所有斜率为 a 的平行直线的频谱将叠加到一条过原点且斜率为 $-1/a$ 的直线上.如果时域的直线是有限长的,那么它的频谱将分布于整个频域内,并且在与直线 $\delta(\omega_1 + a\omega_2)$ 垂直的方向上以 sinc 函数衰减.因此,为了实现图像的各个方向纹理的分离,必须在频域中以与时域纹理方向垂直的扇区中进行方向滤波,这就需要引入方向滤波器组.

1.2 方向滤波器组构造

对于 l 级的方向滤波器组,有 2^l 个等价分析滤波器传递函数 $H_k^{(l)}(z)$ 和综合滤波器传递函数 $G_k^{(l)}(z)$ (其中 $0 \leq k < 2^l, z = (z_1, z_2)^T$) 以及下采样矩阵 $S_k^{(l)}$ ($0 \leq k < 2^l$),其中 $S_k^{(l)}$ 定义为^[1]

$$S_k^{(l)} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2^{l-1} \end{bmatrix}, & 0 \leq k < 2^{l-1} \\ \begin{bmatrix} 2^{l-1} & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, & 2^{l-1} \leq k < 2^l \end{cases} \quad (1)$$

那么, $\{g_k^{(l)}(n - S_k^{(l)}m)\}$ ($0 \leq k < 2^l, m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{Z}$) 是二维空间的方向滤波器函数集合,其中 $g_k^{(l)}(n)$ 是综合滤波器 $G_k^{(l)}(z)$ 的脉冲响应函数. l 级的方向滤波器组等效分解和重构结构见图 1,当该滤波结构是完全重构时,二维输入信号 $x(n)$ 和输出信号 $\hat{x}(n)$ 满足如下关系

$$\hat{x}(n) = x(n) = \sum_{k=0}^{2^l-1} \sum_{m \in \mathbb{Z}} y_k(m) g_k^{(l)}(n - S_k^{(l)}m) \quad (2)$$

式中: $y_k(m) = \langle x(n), h_k^{(l)}(S_k^{(l)}m - n) \rangle$, 其中 $h_k^{(l)}(n)$ 是分解滤波器 $H_k^{(l)}(z)$ 的脉冲响应函数, $\langle \cdot \rangle$ 表示信号的内积运算.

由图 1 中的分解部分得到的方向子带 y_k ($0 \leq$

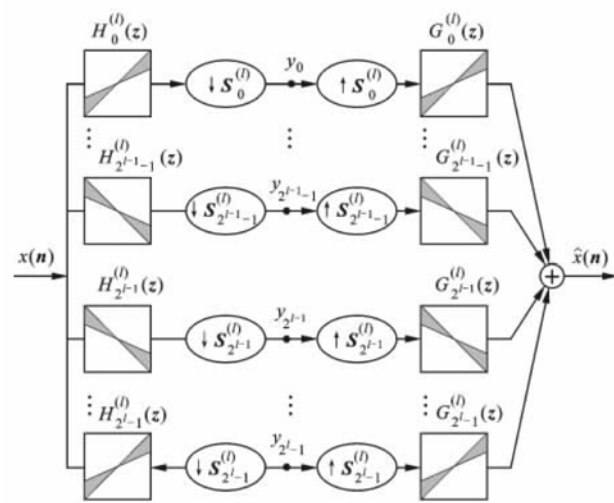


图1 l 级方向滤波器组的等效分解和重构

$k < 2^{l-1}$) 包含图像中接近于垂直方向的纹理信息,而 y_k ($2^{l-1} \leq k < 2^l$) 则包含图像中接近于水平方向的纹理信息.

图 1 所示的理想频谱的方向滤波器组会使得图像真实边缘的附近产生严重的 Gibbs 现象,同时沿边缘方向会出现严重的拖尾现象,本文选用的方向滤波器可以有效地抑制这两种现象.本文滤波器由 7 阶最大的平坦菱形滤波器^[9]经过梅林变换并进行调制得到,其分解端的高、低通滤波器支撑长度分别为 (29, 29) 和 (43, 43). 在方向滤波器组的每级分解过程中,设每个数据需要 L_d 个运算操作(包括乘法和加法运算),那么二维输入信号进行 l 级滤波时总共需要 NlL_d 个运算操作,其中 N 为输入信号的数据总量.

1.3 基于小波的 Contourlet 变换

Contourlet^[1]变换中采用的拉普拉斯金字塔式变换有 4/3 的冗余度,不利于图像的压缩,因此可以采用二维的小波变换^[2].由于小波分解和方向滤波器组分解都是无冗余的,因而当信号经小波分解后得到的高频子带再进行方向滤波器组分解时,整个过程不会产生数据的冗余.

基于小波的 Contourlet 变换^[2]可分为两步进行:首先利用小波变换取代拉普拉斯金字塔式变换进行子带分解,然后对除最低频子带外的其他所有子带采用方向滤波器组进行分解.图 2 给出了整个变换的频域分解示意,其中灰色部分是小波高频子带的频域.

因为小波具有多分辨率分析的特点,所以由它和方向滤波器组结合的系统是多分辨率多方向的.设图 2 中的灰色部分分别属于二维小波空间 $W_{j,HL}$ 、

$W_{j,\text{LH}}$ 和 $W_{j,\text{HH}}$,其中的下标 j 为尺度,它们的基函数分别为 $\Psi_{j,\text{HL}}(n)$ 、 $\Psi_{j,\text{LH}}(n)$ 和 $\Psi_{j,\text{HH}}(n)$,则尺度空间 V_j 与小波空间 W_j 的关系为

$$V_{j-1} = V_j \oplus W_j \quad (3)$$

$$W_j = W_{j,\text{HL}} \oplus W_{j,\text{LH}} \oplus W_{j,\text{HH}} \quad (4)$$

式中: $\oplus$ 表示空间直和.当对这3个小波空间都采用 l_j 级的方向滤波时,得到的第 k 个方向子带空间分别记为 $W_{j,\text{HL},k}^{(l_j)}$ 、 $W_{j,\text{LH},k}^{(l_j)}$ 和 $W_{j,\text{HH},k}^{(l_j)}$ ($0 \leq k < 2^{l_j}$),则它们与小波空间的关系为

$$W_{j,\text{HL}} = \bigoplus_{k=0}^{2^{l_j}-1} W_{j,\text{HL},k}^{(l_j)}; \quad W_{j,\text{LH}} = \bigoplus_{k=0}^{2^{l_j}-1} W_{j,\text{LH},k}^{(l_j)} \quad (5)$$

$$W_{j,\text{HH}} = \bigoplus_{k=0}^{2^{l_j}-1} W_{j,\text{HH},k}^{(l_j)}$$

且方向子带空间 $W_{j,\text{HL},k}^{(l_j)}$ 、 $W_{j,\text{LH},k}^{(l_j)}$ 和 $W_{j,\text{HH},k}^{(l_j)}$ 的基函数分别为

$$\eta_{j,\text{HL},k}^{(l_j)}(n) = \sum_{m \in \mathbb{Z}^2} g_k^{(l_j)}(n - S_k^{(l_j)}m) \Psi_{j,\text{HL}}(m) \quad (6)$$

$$\eta_{j,\text{LH},k}^{(l_j)}(n) = \sum_{m \in \mathbb{Z}^2} g_k^{(l_j)}(n - S_k^{(l_j)}m) \Psi_{j,\text{LH}}(m) \quad (7)$$

$$\eta_{j,\text{HH},k}^{(l_j)}(n) = \sum_{m \in \mathbb{Z}^2} g_k^{(l_j)}(n - S_k^{(l_j)}m) \Psi_{j,\text{HH}}(m) \quad (8)$$

若每层小波变换中的每个数据需要 L_w 个运算操作,那么基于小波的 Contourlet 变换的计算复杂度为

$$C = \sum_{j=0}^{J-1} (1/4)^j M(L_w + 3/4 L_d l_j) \quad (9)$$

式中: M 为原始数据总量; J 为小波变换层数; l_j 为第 j 层小波子带进行方向滤波的级数.

2 CEBCOT 的图像编码算法

为了充分发挥基于小波的 Contourlet 变换在

提取图像方向信息和稀疏化表示图像方面的优势,本文将其与 EBCOT 编码相结合,构成了一种新的压缩算法——CEBCOT.由于 EBCOT 编码性能在很大程度上受独立编码块大小的影响,这里采用聚类的思想,并且结合方向滤波器组的特点,给出了利用压缩的编码块分割方法.

区域大小为 PQ 的二维数据 x 进行 l 级方向滤波组分解,得到 2^l 个子带,其中子带 y_k ($0 \leq k < 2^{l-1}$)的区域大小为 $(P/2^{l-1})(Q/2)$,而子带 y_k ($2^{l-1} \leq k < 2^l$)的区域大小为 $(P/2)(Q/2^{l-1})$,这些子带按照图3的方式排放,所占总区域大小仍然是 PQ .方向滤波器组分离开了数据不同方向的轮廓和边缘信息,因此在不同的方向子带中只突出了某一方向而抑制了其他方向的边缘和纹理.为了保证编码块中信息的完整性,可把每个子带 y_k 作为一个独立的编码块进行编码.由于原始的 EBCOT 编码算法编码块大小为 64×64 ,因此令方向子带 y_k ($0 \leq k < 2^l$)区域大小近似等于4 096来确定二维信号 x 需要方向滤波的层数 l ,即

$$l \approx \text{round}[\text{lb}(PQ/4\,096)] \quad (10)$$

式中: $\text{round}(\cdot)$ 为最靠近取整操作.由于方向滤波器组最终的等效采样矩阵是对角阵,因此 EBCOT 编码中的上下文预测模型仍然有效.下面以 512×512 像素图像为例,给出本文图像压缩算法的流程:

(1)采用提升9/7小波对图像进行4层小波变换,得到的子带大小从高频到低频依次为 256×256 , 128×128 , 64×64 , 32×32 ;

(2)按照式(10)计算每个小波高频子带需要的方向滤波器变换级数的范围,依子带大小分别选择为3,2,0,0;

(3)对每个高频子带采用方向滤波器组滤波,得到的数据按照图3的方式排放;

(4)按一定的区域大小分割变换系数得到独立

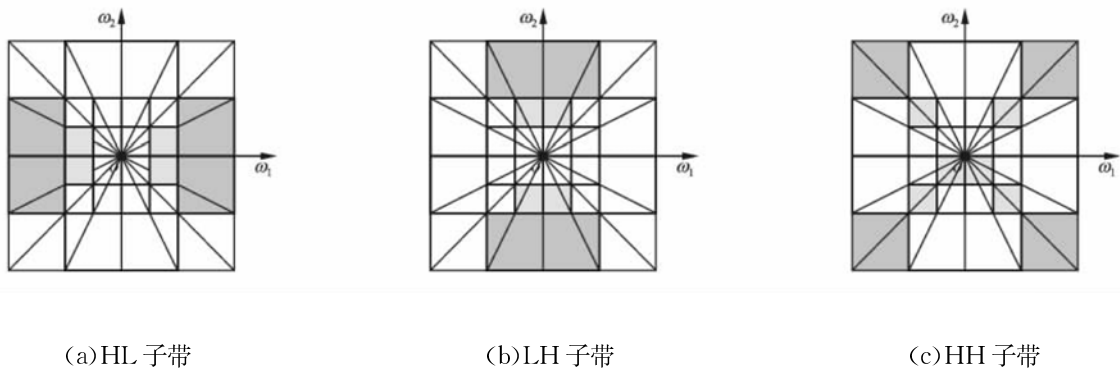


图2 结合方向滤波器组的小波子带频域分布

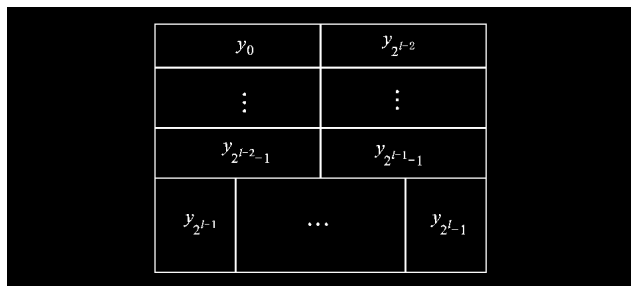


图3 数据块排列图

编码块,即对未进行方向滤波操作的小波子带以 64×64 的大小分割,而进行方向滤波的小波子带得到的每个方向子带就各自作为一个独立的编码块;

(5)对所有编码块分别采用 EBCOT 中的位平面扫描、上下文建模和算术编码得到编码流,并记录率失真数据;

(6)根据率失真数据计算每个编码块的全局最优的码流截断点,可以得到所要求数量的压缩码流。

由以上算法描述可以看到,本文算法与 JPEG2000 拥有相同的编码和率失真优化截断算法,不同的是本文算法采用了基于小波的 Contourlet 变换,以及依方向子带大小进行的编码块划分,而 JPEG2000 中是采用小波变换和等大小的编码块分割。

3 仿真实验

选用大小为 512×512 像素的直线纹理丰富的图像对提出的压缩算法进行测试。表 1 给出了 Barbara、City 两幅图在不同码率下的重构图像的峰值信噪比(P_{SNR})。

同时,图 4 给出了两幅图像在 $0.2 \text{ bit} \cdot \text{像素}^{-1}$ 码率下采用 JPEG2000 算法和本文算法的恢复图像的一个 $1/4$ 区域。由表 1 可知,对于直线纹理十分丰富的 Barbara 图像在高倍数压缩时的 P_{SNR} 值取得明显的提高,虽然 City 图的 P_{SNR} 值提高幅度相对较小,而从图 4 可以看到,本文算法更多地保留了图像的边缘和轮廓信息,所以获得了很好的视觉效果。对

$0.2 \text{ bit} \cdot \text{像素}^{-1}$ 码率压缩的 Barbara 图像,本文算法的峰值信噪比比文献[5]的 CSPIHT 算法提高了 0.1 dB ,视觉质量也有所提高。由于方向滤波器组的操作削弱了部分树型结构中父子子带的相关性,从而降低了 SPIHT 的编码能力,但是 EBCOT 是基于独立数据块的编码,不受父子子带相关性的影响且操作灵活,因此本文算法比 CSPIHT 算法有更好的压缩性能和灵活性。

表1 不同码率下重构图像的峰值信噪比

码率/ $\text{bit} \cdot \text{像素}^{-1}$	P_{SNR}/dB			
	Barbara		City	
	JPEG2000 算法	本文算法	JPEG2000 算法	本文算法
0.125	25.23	26.00	24.31	24.47
0.250	28.10	28.69	26.04	26.17
0.320	29.27	29.78	26.93	26.95
0.500	31.92	32.06	28.33	28.49

整个仿真程序运行在 CPU 为 P4/1.8 GHz 的计算机上,其中小波变换和方向滤波器组采用 Matlab 语言编写,EBCOT 算法用 C 语言编写,表 2 给出了 Barbara 图像在 $0.2 \text{ bit} \cdot \text{像素}^{-1}$ 码率压缩时两种算法各步骤运行时间比较。

4 结 论

本文给出了一种图像编码的新算法——CEBCOT,其中基于小波的 Contourlet 变换是非冗余的,它分离出小波高频子带中不同方向的轮廓和边缘信息到对应的方向子带中,使能量在空间中进一步聚集,同时把方向子带作为独立编码块的 EBCOT 编码应用到这种稀疏的数据结构上,这样更好地结合了变换和编码两者的优势。仿真结果表明,所提出的算法主、客观评价性能优于 JPEG2000,灵活性优于 CSPIHT。

表2 两种算法各步骤运行时间比较

	运行时间/s					
	小波正变换	方向滤波分解	EBCOT 编码	EBCOT 解码	方向滤波综合	小波逆变换
本文算法	0.48	9.91	2.02	0.47	1.92	0.48
JPEG2000	0.48		1.91	0.41		0.48



(a)Barbara 原图像

(b)JPEG2000($P_{\text{SNR}}=26.98$ dB)(c)本文算法($P_{\text{SNR}}=27.68$ dB)

(d)City 原图像

(e)JPEG2000($P_{\text{SNR}}=25.37$ dB)(f)本文算法($P_{\text{SNR}}=25.48$ dB)

图4 两种压缩算法性能比较

参考文献:

- [1] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [2] Eslami R, Radha H. Wavelet-based contourlet transform and its application to image coding [C]// Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 3189 - 3192.
- [3] Eslami R, Radha H. Wavelet-based contourlet coding using an SPIHT-like algorithm [C]// Proceeding of Conference on Information Science and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 784-788.
- [4] Eslami R, Radha H. New image transform using hybrid wavelets and directional filter banks: analysis and design [C]//Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 733-736.
- [5] Chappelier V, Guillemot C, Marinkovic S. Image coding with iterated contourlet and wavelet transforms [C]//Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 3157-3160.
- [6] Said A, Pearlman W. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Trans on Circuits Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243-250.
- [7] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(7): 1158-1170.
- [8] 吴宗泽, 郑南宁, 黄宇, 等. 基于编码通道数的 JPEG2000 压缩率控制算法[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1216-1219.
Wu Zongze, Zheng Nanning, Huang Yu, et al. Novel scheme for JPEG2000 rate control based on number of coding passes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(12): 1216-1219.
- [9] DaCunha L A. Nonsubsampled contourlet transform toolbox [EB/OL]. (2005-11-3) [2006-4-6]. http://www.ifp.uiuc.edu/~cunhada/nsct_toolbox.zip.

(编辑 刘杨)