

## 一种结合 Contourlet 和小波变换的图像编码算法

冯燕 吕嘉凯 贾蒙 魏江

(西北工业大学电子信息学院 陕西省信息获取与处理重点实验室 西安 710072)

**摘要:** 该文提出了一种 Contourlet 变换和小波变换相结合, 使用新的空间方向树的类似 SPIHT 编码算法。该算法先对图像进行 Contourlet 变换, 再对变换后的低频子带进行多级小波变换, 然后根据变换后系数的结构特性, 借鉴小波 SPIHT 编码思想, 构造了一种新的空间方向树, 实现了对变换后系数的类似 SPIHT 编码。仿真实验结果表明, 该算法与小波变换, Contourlet 变换和基于小波的 Contourlet 变换的 SPIHT 算法相比, 重构图像保留了更多的纹理和细节信息, 并且在低比特率下具有较高的峰值信噪比。

**关键词:** 图像编码; Contourlet 变换; 小波变换; SPIHT

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1323-04

## Image Coding Using Mixed Contourlet and Wavelet Transform

Feng Yan Lü Jia-kai Jia Meng Wei Jiang

(Shaanxi Key Lab of Information Acquisition and Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In this paper, a new Set Partitioning In Hierarchical Trees(SPIHT) coding algorithm is proposed, which is based on a Mixed Contourlet and Wavelet Transform(MCWT) and a new spatial orientation tree (MCWT-SPIHT). In the proposed image coding algorithm, Contourlet transform is employed for the first stage then followed by wavelet transform for the coarse scale. According to the structure properties of the MCWT coefficients, a new spatial orientation tree is developed to perform the SPIHT-like coding algorithm based on SPIHT coding idea of wavelet transform. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm is competitive to wavelet transform, Contourlet transform and Wavelet Based Contourlet Transform(WBCT) with SPIHT in terms of Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) at low bit rate, and it contains more contours and textures in the reconstructed images.

**Key words:** Image coding; Contourlet transform; Wavelet transform; Set Partitioning In Hierarchical Trees(SPIHT)

### 1 引言

目前, 小波变换在图像处理领域中得到了广泛的应用。由一维小波通过张量积而形成的二维可分离小波变换能很好地捕获一维信号的点奇异, 但是由于缺乏方向性, 只具有有限的方向信息, 即水平、垂直和对角, 不能很好地捕获二维图像中的线和面奇异, 不能“最优”地表示含线或者面奇异的二维图像<sup>[1]</sup>。近年来, 研究人员针对小波变换的不足, 提出了多种多尺度几何分析(Multiscale Geometric Analysis, MGA)的方法, 其中Do和Vetterli提出的Contourlet变换就是一种较好的多尺度几何分析方法性<sup>[2]</sup>。

Contourlet变换首先使用LP(Laplacian Pyramid)滤波器对图像进行多尺度分解以捕获点奇异, 然后由方向滤波器组(Directional Filter Bank, DFB)将分布在同一方向上的奇异点合成为一个系数<sup>[3]</sup>, 不仅继承了小波变换的多分辨率时频分析特性, 而且具有高度的方向性和各向异性, 能更好地

保留自然场景中的纹理和细节法<sup>[4]</sup>, 因而基于Contourlet变换的图像编码算法使编码后的图像具有较好的细节和纹理特征。在此基础上, Eslami和Radha提出了一种基于Contourlet变换的低比特的压缩编码算法<sup>[5]</sup>, Song Haohao等提出了一种Contourlet变换与多级树集合分裂编码算法(Set Partitioning In Hierarchical Trees, SPIHT)相结合的算法<sup>[6]</sup>。但是由于目前的Contourlet变换所使用的LP分解具有4/3的冗余度, 因而导致变换系数明显增多, 影响图像的压缩效果。为消除冗余, Eslami提出了基于小波的Contourlet变换(Wavelet Based Contourlet Transform, WBCT), 并提出了基于WBCT的SPIHT编码算法<sup>[7]</sup>。此外, Osslan Osiris Vergara Villegas等也提出了一种基于WBCT的SPIHT编码算法<sup>[8]</sup>。WBCT首先采用小波变换取代LP滤波器结构实现多分辨率分解, 除去LP滤波器结构引入的数据冗余, 然后将小波分解得到的高频子带输入方向滤波器组, 以满足各向异性尺度关系, 形成两级非冗余且完全重构的滤波器组, 能够有效地逼近包含轮廓和震荡模式的图像<sup>[6]</sup>。但由于WBCT对图像先进行小波变换丢失了部分方向信息, 不能更好地恢复图

像的纹理和细节。

本文提出了一种基于Contourlet和小波相结合的变换(Mixed Contourlet and Wavelet Transform, MCWT)的类似SPIHT编码算法(MCWT-SPIHT)。该算法先对图像进行Contourlet变换,提取方向信息,再对变换后的低频子带进行多级小波变换,克服了Contourlet变换和WBCT的缺陷,即保留了图像的方向信息,又能更好地表示图像的细节和纹理,然后根据变换后系数的特殊结构特点,提出了一种新的空间方向树结构实现对图像的类似SPIHT编码。

### 2 Contourlet与小波相结合的变换

WBCT先对图像进行小波变换后再进行方向分解,虽然有效地消除了Contourlet变换产生的冗余,改善了图像的压缩效果,但由于先对图像进行小波变换后丢失了部分方向信息,再经过方向分解就不能更好地表示图像的纹理和轮廓,而且小波变换对高频子带的下采样导致的频率不规则性,会使图像部分区域的纹理和轮廓产生比Contourlet变换更大的失真<sup>[6]</sup>,影响图像的压缩效果。针对这一缺陷,本文采用Contourlet与小波相结合的变换(MCWT)。

为了同时保持小波变换的低频逼近特性和Contourlet变换的纹理和轮廓特征,首先对图像进行Contourlet变换,生成高频子带和低频子带,目的是先提取图像的方向信息,避免图像的方向信息受到破坏,以便更好地捕捉图像的纹理和轮廓特征,然后对变换后产生的低频子带进行多级小波变换,对图像的低频部分进行更好地逼近,图1为zoneplate图像先进行一层16方向Contourlet变换,再对变换后的低频子带进行2级小波变换后的结果。MCWT先对图像进行Contourlet变换,再对变换后的低频子带进行小波变换,这样既减少了Contourlet变换产生的冗余,克服了Contourlet变换在图像部分区域产生的失真,又比WBCT保留了更多的方向信息,能够更好地提取图像的纹理和轮廓。

### 3 基于MCWT的类似SPIHT编码算法

小波SPIHT编码算法设计了空间方向树(spatial orientation tree)来更有效地组织小波系数,这种空间方向树的数据结构不仅充分利用了不同尺度间小波系数的相关性,

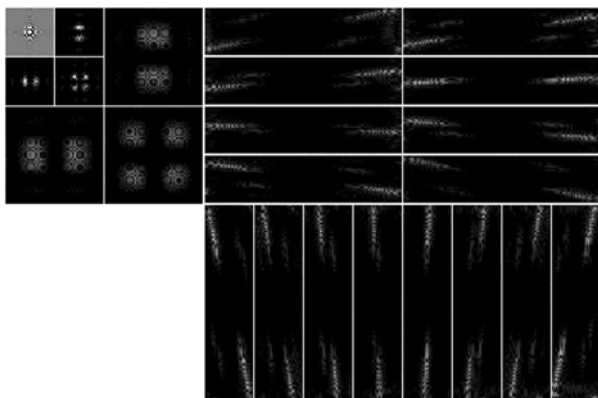


图1 zoneplate图像经过MCWT后的结果

也充分考虑了同一尺度下小波系数的相关性,可以有效地组织小波系数。由于MCWT与小波变换均具有多分辨率的特性,因此可以借鉴小波SPIHT编码算法的思想,对变换后的系数进行类似SPIHT编码。鉴于经过MCWT后系数结构与小波系数结构有所不同,本文构造了一种新空间方向树结构,实现了MCWT-SPIHT编码算法。

### 3.1 新空间方向树结构的描述

MCWT先对图像进行一层Contourlet变换,再对变换后的低频子带进行多级小波变换,变换后如图1所示分为两大块,其中右边较大的块是经Contourlet变换后的最高频子带(以下称右块),左边较小的块是经过多级小波变换后的低频子带(以下称左块)。为将左块的小波系数与右块的Contourlet系数有效地联系起来,需要对Contourlet变换后各子带图像对应的方向进行分析。

文献[9]指出,zoneplate图像经过Contourlet变换后,各方向子带图像所示的空间方向位置与方向滤波器频域楔形子带的方向相对应,因此采用zoneplate图像变换后的结果来确定Contourlet变换后方向子带的对应方向。为方便说明,将方向滤波器的楔形子带按图2(a)所示以1-16的序号标注,通过图1中各方向子带图像所示的空间方向位置与图2(a)楔形子带对应的方向进行对比可以分析得出,方向子带与方向滤波器的方向存在如图2所示的对应关系,即图像经过图2(a)所示方向滤波器第*i*个方向变换后,生成图2(b)所示第*i*个方向子带图像。

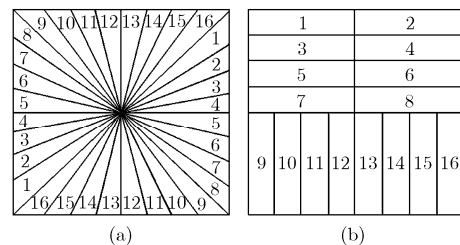


图2 Contourlet变换后方向频带的对应关系

基于上述分析,如图2(a)所示,右块方向子带3 4 5 6对应的方向近似于水平方向,因此其变换后的系数与左块小波变换水平方向子带系数具有较强的相关性,应作为左块小波水平方向子带系数的子系数;同理方向子带11 12 13 14对应的方向近似于垂直方向,其变换后的系数应为左块小波变换垂直方向子带系数的子系数;其余方向子带对应的方向近似于对角方向,其变换后的系数应为左块小波变换对角方向子带系数的子系数。由图1还可分析得出,经多级小波变换后的图像,方向频带的排列规则为:左上为低频子带,左下为水平方向子带,右上为垂直方向子带,右下为对角方向子带。因此为方便编码,对右块的方向子带位置按小波变换水平、垂直、对角的子带的位置进行重新排列,将近似水平方向的子带3 4 5 6依次排列在左下方,近似垂直方向的子带11 12 13

14依次排列在右上方,近似对角方向的其余子带依次排列在左上方和右下方,重排前后方向子带位置的对应关系如图3所示,图3(b)为重排前的方向子带位置,图3(a)为新空间方向树结构,其右块为重排后的方向子带位置。

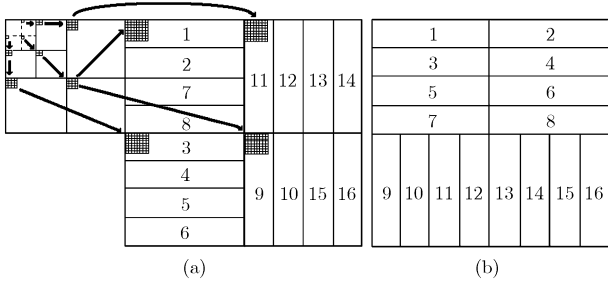


图3 新空间方向树结构及重排前后频带对应关系

在小波 SPIHT 编码算法中,只需要两个坐标  $(i, j)$  就可以记录系数的位置,而 MCWT-SPIHT 编码算法为区别系数位于左块还是右块,需要 3 个坐标  $(n, i, j)$  来记录系数的位置,其中  $n=1$  表示系数位于左块,  $n=2$  表示系数位于右块,  $i$  和  $j$  仍代表系数在每一块中处于第  $i$  行和第  $j$  列的位置。

新空间方向树结构的具体描述如下:

(1)左块左上角为小波变换后的最低频子带。为有效地组织系数,将此块假设分解为图 3(a)所示的虚拟频带,即将其平均分成 4 块,其中左上角的那块没有子系数,其余 3 块(即左下、右上、右下)有子系数,作为树结构的根节点。

(2)左块中系数均为小波变换系数,除最后一层系数频带外,其余系数的子系数寻找方法与小波 SPIHT 编码算法相同,即父系数  $(1, i, j)$  的 4 个直接子系数为  $(1, 2i - 1, 2j - 1)$   $(1, 2i - 1, 2j)$   $(1, 2i, 2j - 1)$   $(1, 2i, 2j)$ 。

(3)左块最后一层系数频带的子系数,按如上所述到右块对应近似方向子带中寻找。在左块最后一层左下的水平方向子带和右上的垂直方向子带中,每个父系数有 4 个直接子系数,分别位于右块的左下和右上的 1/4 块中,即其中父系数  $(1, i, j)$  在右块中的 4 个直接子系数为  $(2, 2i - 1, 2j - 1)$   $(2, 2i - 1, 2j)$   $(2, 2i, 2j - 1)$   $(2, 2i, 2j)$ ; 在左块最后一层右下的对角方向子带中,每个系数有 8 个直接子系数,分别位于右块的左上和右下的两个 1/4 块中,且每块中各有 4 个直接子系数,即其中父系数  $(1, i, j)$  在右块中的 8 个直接子系数为  $(2, 2i - 1 - \text{bandsize}, 2j - 1 - \text{bandsize})$   $(2, 2i - 1 - \text{bandsize}, 2j - \text{bandsize})$   $(2, 2i - 1, 2j - 1)$   $(2, 2i - 1, 2j)$   $(2, 2i, 2j - 1)$   $(2, 2i, 2j)$ , 其中  $\text{bandsize}$  为右块每行系数个数的一半。

MCWT-SPIHT 编码算法与小波 SPIHT 编码算法在上述空间方向树结构上存在较大的差异,而二者的算法流程相似,此处不再赘述。

#### 4 实验结果

为了验证算法的有效性,以  $512 \times 512 \times 8\text{bit}$  的 Barbara,

Lena, Goldhill 3幅标准灰度图像为例进行实验,并与基于小波变换, Contourlet变换和WBCT的SPIHT编码算法进行了比较。表1列出了不同比特率下3幅图像在4种算法下的峰值信噪比(PSNR)。实验中小波变换与Contourlet变换的塔形分解阶段都选用9/7双正交滤波器,所有算法分解层数均为5级。

表 1 标准图像不同比特率下 PSNR 比较

图像	比特率 (bpp)	PSNR(dB)			
		本文方法	WBCT	小波	Contourlet
Barbara	0.5	30.0115	30.3092	30.3316	28.5001
	0.25	27.0943	26.8190	26.3961	26.1212
	0.125	24.7892	24.1871	23.7971	24.0971
	0.0625	22.9362	22.1423	22.1947	22.3143
Lena	0.5	35.5028	35.5804	36.3671	33.3942
	0.25	32.9521	32.5455	32.8507	30.5434
	0.125	30.1182	29.2480	29.3190	27.9653
	0.0625	27.2189	25.6714	25.6714	25.9067
Goldhill	0.5	32.0288	31.7897	32.0717	30.7100
	0.25	29.6611	29.2149	29.3984	28.4729
	0.125	27.6746	26.9017	27.0784	26.5627
	0.0625	25.8414	24.7004	24.7802	24.8898

从表1可以看出,对于3幅图像,在比特率为0.25bpp及其以下时,本文方法的PSNR均高于其他3种方法。这是因为基于Contourlet的相关变换,只需较少的系数就可以对图像边缘轮廓进行十分有效的逼近,因此在低比特率下MCWT和WBCT的效果优于小波变换,而单纯的Contourlet变换由于具有4/3的冗余度影响了图像的压缩质量。WBCT虽然消除了Contourlet变换产生的冗余,但由于先进行小波变换丢失了部分方向信息,再对小波高频系数进行方向变换就不能很好的提取图像的方向信息,而且破坏了原来小波高频系数的能量分布,所以对于Lena和Goldhill等纹理信息不强的图像,效果反而不如小波变换。MCWT虽然大大减少了Contourlet变换产生的冗余,但在同样分解层数下MCWT的系数个数仍比小波系数多出1/4,依然存在一定的冗余,因此在高频系数上图像的能量分布相对比较分散,所以在高比特率下,随着编码系数的增多,小波方法效果更好。图4为比特率0.125bpp时Barbara图像的重构图像,从图中可以看出,与小波变换相比,本文方法在图像中的头巾、裤子和桌布等纹理较强的部分保留了更多的纹理信息,与Contourlet变换和WBCT相比,本文方法在上述图像纹理较强部分纹理更细致,并且在图像的面部和背景部分更加平滑、清晰,恢复图像保留了更多的方向信息。由于MCWT与其他三种变换的系数结构不同,因此构造一种新的空间方向树结构进行编码,MCWT和新空间方向树结构共同提高了算法的有效性。



图4 比特率为0.125bpp时barbara图像的重构图像

## 5 结束语

本文提出了一种新的图像编码算法—MCWT- SPIHT。该算法与已有的其它算法相比, 具有如下特点: (1)采用Contourlet变换和小波变换相结合的变换(MCWT), 克服了Contourlet变换和WBCT的缺陷, 减少了Contourlet变换产生的冗余, 保留了更多的方向信息, 降低了Contourlet变换和WBCT在图像部分区域产生的失真, 能够更好地表示图像的纹理和轮廓信息。(2)根据变换后系数的特点, 提出了一种新的空间方向树结构, 充分利用了变换后系数的相关性, 更有效地组织了重要系数, 实现了MCWT-SPIHT编码算法。

本文仅对标准灰度图像进行了研究, 由于高光谱图像具有丰富的纹理信息, 如何设计基于Contourlet变换的高光谱图像压缩编码算法, 是进一步研究的目标。

## 参考文献

- [1] 焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1975-1981.  
Jiao Li-cheng and Tan Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12A): 1975-1981.
- [2] Do M N and Vetterli M. Contourlet: A new directional multiresolution image representation[C]. Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA, Nov. 3-6, 2002, 1: 497-501.
- [3] Esakkirajan S, Veerakumar T, Senthil Murugan V, and Sudhakar R. Image compression using contourlet transform and multistage vector quantization[J], *International Journal on Graphics, Vision and Image Processing*, 2006, 6(1): 19-28.
- [4] 金炜, 潘英俊, 魏彪, 冯鹏. 一种基于Contourlet的无表零树图像编码算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(11): 2116-2120.  
Jin Wei, Pan Ying-jun, Wei Biao, and Feng Peng. An image coding algorithm based on contourlet listless zerotree coding[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(11): 2116-2120.
- [5] Eslami R and Radha H. On low bit-rate coding using the contourlet transform [C]. Conference Record of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA, Nov. 9-12, 2003, 2: 1524-1528.
- [6] Song Haohao, Yu Songyu, and Song Li, *et al.*. Contourlet image coding based on adjusted SPIHT[C]. 6th Pacific-Rim Conference on Multimedia Proceedings. Jeju Island, South Korea, Nov. 13-16, 2005: 629-640.
- [7] Eslami R and Radha H. Wavelet-based contourlet transform and its application to image coding[C]. Proc of IEEE International Conference on Image Processing. Singapore, Oct.24-27, 2004, 5: 3189-3192.
- [8] Osslan Osiris Vergara Villegas and Vianey Guadalupe Cruz Sánchez. The wavelet based contourlet transform and its application to feature preserving image coding[C]. Proceedings 6th Mexican International Conference on Artificial Intelligence. Aguascalientes, Mexico, Nov. 4-10, 2007: 590-600.
- [9] Do M N. Directional multiresolution representation. [http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2001/2500/EPFL\\_TH2500.pdf](http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2001/2500/EPFL_TH2500.pdf). 2001.10.23.

冯 燕: 女, 1963年生, 教授, 博士, 研究方向为高光谱数据分析、数据压缩、神经网络和多尺度几何分析及其应用等。  
吕嘉凯: 男, 1983年生, 硕士生, 研究方向为图像压缩和图像去噪。  
贾 蒙: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为光通信和图像处理。  
魏 江: 男, 1968年生, 副教授, 在职博士生, 研究方向为图像工程与可视化技术、DSP 及其应用、信息获取与处理等。