

# 基于非冗余轮廓波的图像质量可伸缩编码算法

肖 亮<sup>1</sup> 胡晰远<sup>1,2</sup> 韦志辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京理工大学计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210094;  
<sup>2</sup> 中国科学院自动化研究所国家专用集成电路设计工程技术研究中心, 北京 100080)

**摘要** 提出一种用非冗余轮廓波的中低比特率图像质量可伸缩编码算法。该算法采用双正交小波分解和方向滤波器组(DFB)实现图像的非冗余稀疏表示,不但具有轮廓波对图像中线状奇异性边缘和纹理细节的稀疏表示特点,而且克服了轮廓波变换系数 4/3 冗余的缺点。算法中对图像非冗余轮廓波系数各子带系数分布进行统计分析,通过对变换系数的重新组合,构造了有利于图像编码的空间方向树结构,并统计验证了其零树特性,采用分级树集合分裂和阈值量化达到图像质量可伸缩的嵌入式编码。实验结果表明,其解码算法在中低比特率压缩情况下,压缩后重构图像的感知质量明显优于小波域 SPIHT, JPEG2000 编码标准,峰值信噪比 PSNR 值与 JPEG2000 相当,而图像纹理和边缘细节的视觉效果优于 JPEG2000 和小波域 SPIHT 算法。

**关键词** 图像处理; 图像压缩; 非冗余轮廓波变换; 质量可伸缩; 分级树集合分裂

**中图分类号** TP751 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200828s2.0106

## A Quality Scalable Coding Algorithm of Images Based on Non-Redundancy Contourlet

Xiao Liang<sup>1</sup> Hu Xiyuan<sup>1, 2</sup> Wei Zhihui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Computer Science & Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;  
<sup>2</sup> National ASIC Design Engineering Center, Institute of Automation,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** A novel quality scalable image coding scheme at low-medium based on non-redundancy contourlet transform is proposed. Using the bi-orthogonal wavelet decomposition and directional filter banks, the image non-redundancy sparse representation can be obtained, in which not only it is capable of efficiently characterizing the linear singularity and texture in images but also it can overcome the drawback of 4/3 redundancy in classical contourlet transform. According to the statistical distribution characteristic of coefficients of each subband of non-redundancy contourlet, an elaborated reposition algorithm for the transform coefficients is presented to construct the spatial-orientation tree. Furthermore, the “zero-tree” characteristic of this structure is statistically validated. Then under the principle of set partitioning in hierarchical tree-(SPIHT) algorithm and threshold quantization method, the quality scalable image coding procedure is obtained. Our experimental results demonstrate that at the low to medium rate, the decoding image of the proposed algorithm is competitive to the JPEG2000 in terms of PSNR value, but is visually superior to the wavelet based SPIHT or JPEG2000, especially for those regions with plentiful textures and edge.

**Key words** image processing; image compression; non-redundancy contourlet transform; quality scalable; set partitioning in hierarchical trees

**基金项目:** 国家自然科学基金(60672074, 60802039), 高等学校博士点专项科研基金(20070288090)和江苏省自然科学基金(BK2006569)资助项目。

**作者简介:** 肖 亮(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事图像处理和模式识别方面的研究。

E-mail: xtxiaoliang@163.com

# 1 引言

伴随着小波理论研究的不断深入,嵌入式零树小波(EZW)编码器<sup>[1]</sup>和分级树集合分裂(SPIHT)编码器<sup>[2]</sup>等基于小波的图像压缩编码器相继提出。然而小波变换并不能最优描述图像信号中的边缘等线状奇异性。以脊波<sup>[3]</sup>、曲波<sup>[4]</sup>和轮廓波变换<sup>[5]</sup>等为代表的多尺度几何方向分析(MGA),通过各向异性基达到对图像中的线状奇异性的稀疏表示,在图像去噪、增强、图像特征提取等方面取得了很好的应用<sup>[6,7]</sup>,但是应用于图像编码存在一些问题。脊波虽能刻画图像的直线奇异性,但是不能有效捕获图像的曲线状奇异性;曲波变换是多尺度脊波变换,能够达到对曲线状奇异性更为稀疏的逼近,但是高冗余度与高计算复杂度决定了曲波不适合于图像压缩。轮廓波变换通过拉普拉斯变换(LP)结合方向滤波器组(DFB),具有类似于曲波的各向异性尺度关系和多尺度、时频局部和多方向特性,适合于图像压缩编码。但轮廓波变换仍然具有一定的冗余度( $<4/3$ ),对图像编码很不利。针对上述问题,文献<sup>[8]</sup>给出了一种非冗余的基于小波的方向滤波器组(简称为WDFB)的构造原理,并实现了一种准SPIHT编码算法,但是该文并没有清楚地阐述将WDFB系数重新组织成类似于小波域的空间方向树的详细算法。

本文通过系数重排有效组织WDFB变换系数,构造WDFB域的空间方向树,利用类似于小波域中的SPIHT编码器,给出了一种基于WDFB变换的图像质量可伸缩编码算法。该算法在相同压缩比下,压缩后重构图像的感知质量要明显优于JPEG2000<sup>[9]</sup>编码标准,峰值信噪比(PSNR)值也与JPEG2000相当,并且具有更好的纹理和边缘细节保持效果。

## 2 非冗余轮廓波变换

### 2.1 轮廓波变换

轮廓波是基于离散域滤波器组理论构建的,随后M. N. Donoho和M. Vetterli<sup>[5]</sup>使用多分辨率分析的框架将轮廓波由离散域扩展至连续域。离散轮廓波分解可以分为两个独立的步骤:

(1) 使用拉普拉斯滤波器(LP)对原图像进行子带分解,以捕获二维图像信号中存在的点奇异性。LP分解是由文献<sup>[10]</sup>提出的多分辨率分解方法,一次LP分解是将原始信号分解为原始信号的逼近分量

和低频分量;递归地对逼近分量做进一步的分解,便得到了整个多分辨率图像。由于LP每分解一次就会产生一个原图像1/4大小的逼近图像和一个原图像一样大小的高频分量,所以LP分解的冗余度为:  

$$1 + \left(\frac{1}{4}\right) + \left(\frac{1}{4}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{4}\right)^n < \frac{4}{3}。$$

(2) 使用方向滤波器组(DFB)进行方向变换。文献<sup>[11]</sup>提出的原始方向滤波器组使用了钻石形滤波器对输入图像加以调制,而文献<sup>[5]</sup>构造了一类新的DFB滤波器,无需先对原始图像进行调制。若DFB对图像进行层 $l$ 分解,则每层将频域分解成 $2^l$ 个子带,且每个子带都成楔形。

图1给出了轮廓波滤波器组的频域分割和分解原理的示意图。可以看出,在不同尺度和方向上,轮廓波都具有长方形的支集,而轮廓波变换的最终结果是用类似于线段的基结构来逼近原图像。

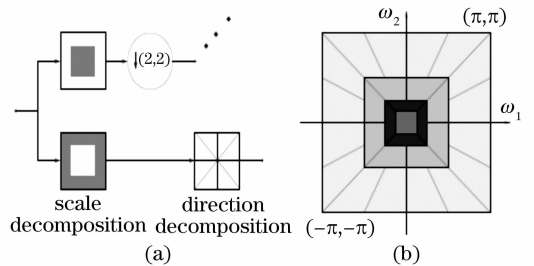


图1 轮廓波变换结构示意图。

(a) 轮廓波滤波器组构造原理; (b) DFB 频域划分

Fig. 1 Illustration of contourlet transform. (a) principle of filter banks of contourlet; (b) division of DFB frequency domain

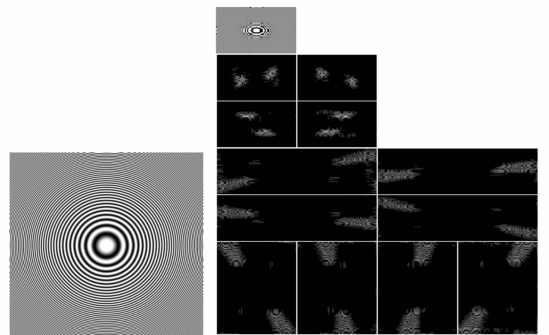


图2 图像 Zoneplate 及其轮廓波变换示意图

Fig. 2 Image Zoneplate and its contourlet transform

图2是图像“Zoneplate”的轮廓波变换的示意图,图像首先被LP分解2级,形成一个低频子带和2个细节子带。然后每一个不同尺度上的细节子带又被DFB进一步分解为不同的方向子带。由于图像“Zoneplate”中像素频率和方向的特性,可以清楚

地看出轮廓波变换在尺度分解及方向分解上的有效性。

## 2.2 非冗余轮廓波：WDFB 的构造原理

轮廓波变换的思想是：首先通过拉普拉斯分解捕获图像中轮廓和边缘等的高频信息，再用方向滤波器组来进一步刻画图像中这些轮廓和边缘的方向信息，因而使得轮廓波变换对图像具有更加准确的描述。但是，轮廓波变换使用拉普拉斯分解，使得轮廓波变换存在一定的冗余度，这对图像编码很不利。

本文引入 WDFB 变换<sup>[8]</sup>，采用小波分解来代替轮廓波变换中的 LP 分解，因为小波变换同样能有效地捕获图像中的高频信息并且小波变换是严格抽样的，即小波变换不会带来数据量上的冗余。与轮廓波变换相似，WDFB 也由两部分滤波器组组成（图 3）。第一步：使用小波变换对图像进行多分辨率分解（轮廓波变换中使用的是 LP 分解），将图像分解为低频子带（LL）和三个高频子带（LH，HL，HH）；然后递归地对低频子带做进一步的小波分解，得到多尺度小波子带图像。第二步：使用方向滤波器组（DFB）对小波分解后的 LH，HL 和 HH 三个高频子带分别进行方向分解，从而将每个高频子带又分解成不同方向的若干方向子带。从而 WDFB 将图像分解为多个尺度方向的子带图像。

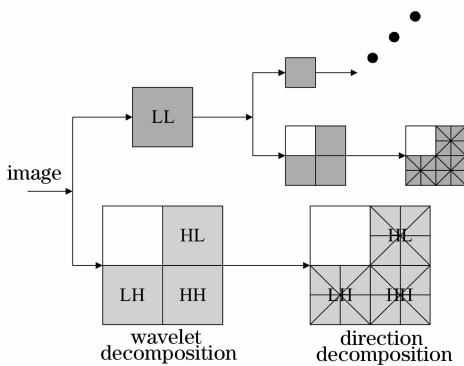


图 3 Wavelet-Based DFB 变换的分解原理结构示意图

Fig. 3 Decomposition structure of wavelet-based DFB transform

图 4 中所示为本文采用 3 层小波分解的分解方式，其中对于  $HH^i (i=1, 2, 3)$  子带各分解为 8、4 和 2 个方向子带，对于  $LH^3, HL^3$  子带保持不变，对  $LH^i, HL^i (i=1, 2)$  子带各分解为 4 和 2 个方向子带。图 5 所示为采用图 4 中所示的分解方式，对图像 Barbara 进行 WDFB 变换后的系数图。

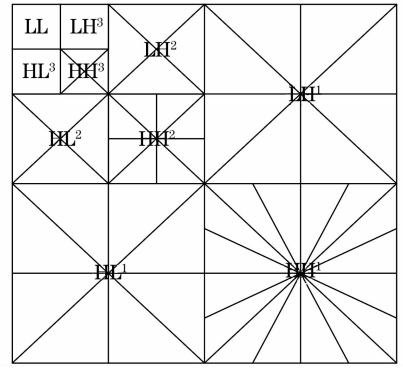


图 4 三层 WDFB 分解示意图

Fig. 4 Illustration of three layer decomposition in WDFB



图 5 图像 Barbara WDFB 变换

Fig. 5 WDFB transform of Barbara

## 3 WDFB 变换域下图像的编码算法

### 3.1 空间方向树结构与“零树”特性

由于 WDFB 变换在小波分解后，将把小波分解后的高频子带进一步分解为多个方向子带，因而 WDFB 变换中系数的树结构与小波变换有所不同。因此，需要对 WDFB 变换后系数间存在的树结构进行定义。首先，WDFB 变换系数间的树结构只存在于小波分解后的每个子带序列中，即在属于子带序列  $LH^i, HL^i, HH^i (i=1, 2, \dots)$  中的不同方向子带间的系数之间定义树结构。对 WDFB 变换后属于同一个小波子带序列的两个相邻尺度的子带之间，定义：与当前系数所在子带相邻的粗尺度子带中，与当前系数空间位置相对应的系数称之为当前系数的“父亲”系数；同样，与当前系数所在子带的相邻细尺度子带中，与当前系数的空间位置相对应的系数称之为当前系数的“孩子”系数。如图 6 所示，阴影块表示父亲系数，空白块表示子系数。对“Barbara”，“Mandrill”，“Lena”，“Peppers”等 JPEG2000 图像库中的测试图像的 WDFB 变换系数中“父亲-孩子”的联合散布直方图和条件概率进行统计分析（如图 7），可以发现父子关系中

在幅值接近于零时都存在着强烈的相关性,当父亲系数接近于零时,该父亲系数的孩子系数也往往趋近于零。进一步对不同阈值下所提出的空间方向树结构满足“零树”条件(即如果一个父亲系数关于阈值  $T$  是不重要的,那么它的后代关于阈值  $T$  也极有可能是重要的)情况进行统计,从表 1 的统计结果可看出,不论是对纹理丰富的“Barbara”、“Mandrill”还是“Lena”、“Peppers”等纹理较弱的图像,上述空间方向树结构基本具有“零树”特性。

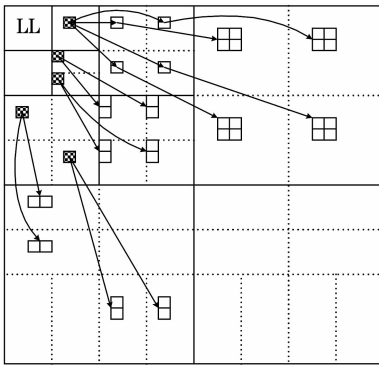


图 6 WDFB 系数间的父子关系

Fig. 6 Relationship between parent and children of WDFB coefficients

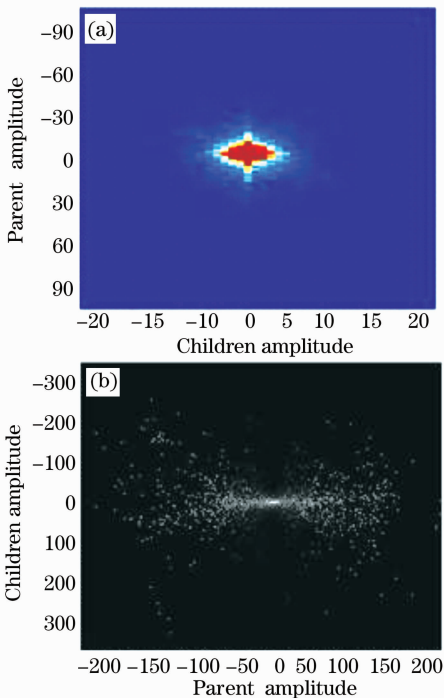


图 7 统计结果。(a)“父亲-孩子”联合散布直方图；(b)“父亲-孩子”条件概率分布

Fig. 7 Statistical results. (a) joint histogram of “parent and children”; (b) conditional probability distribution of “parent and children”

表 1 不同图像在不同阈值下“零树”所占比重  
Table 1 Percent of “zero tree” under different threshold of different images

Threshold	Barbara	Mandrill	Lena	Peppers
$T = 2^9$	93.97	94.36	99.14	99.63
$T = 2^8$	93.35	94.03	97.89	98.73
$T = 2^7$	91.78	94.32	98.16	98.16

### 3.2 WDFB 系数重排与 SPIHT 编码

虽然通过 3.1 节中对 WDFB 系数树结构的定义,可以采用 SPIHT 算法的思想对 WDFB 变换系数进行编码,但是考虑到 WDFB 系数中复杂的树结构以及 SPIHT 算法中需要对树结构进行大量操作,如果直接使用 SPIHT 算法将增大算法的时间复杂度。因此,本文将 WDFB 变换系数进行重新排列,使系数符合标准的 4 叉树结构,再用 SPIHT 算法对其进行编码。重排操作的主要思想是将原本可能分散在不同子带中,但属于同一个父亲的 4 个孩子系数排列在一起,从而将原本由某一个小波高频子带分解出来的多个方向子带再次重新排列回一个子带。重排过程是一个对 4 叉树广度优先的遍历过程。首先重排根节点,设重排后根节点的位置为  $(i, j)$ ,则将根节点的 4 个孩子排在  $(2i - m, 2j - n)$  位置上,其中  $m, n = 0, 1$ ; 然后根据 4 个孩子的位置

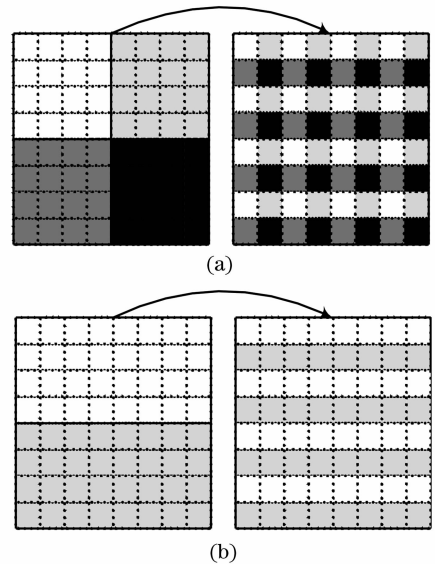


图 8 系数重排。(a)最低频子带被分解为 4 个方向；(b)最低频子带被分解为 2 个方向

Fig. 8 Reposition of coefficients. (a) in the case of the lowest frequency subband is decomposed into four directional subbands; (b) in the case of the lowest frequency subband is decomposed into two directional subbands

重排它们的孩子节点;重复该过程直至整棵树的叶子节点。例如对图像进行  $L$  层小波分解,则根节点即处于  $LH^L, HL^L, HH^L$  子带中。若对于最低频子带( $LH^L, HL^L, HH^L$ )没有再进行方向分解,则保持根节点的位置不变;否则采用交错重排的方法对根节点进行重排,如图 8 所示。

系数重排后,编码策略采取阈值量化策略。某方向子带变换系数的  $\{c_{i,j}^k\}$  阈值初始化为  $T^k = 2^n$ ,  $n = \lfloor \log_2(\max\{|c_{i,j}^k|\}) \rfloor$ ; 然后按照  $T^k \leftarrow T^k/2$  逐次逼近量化的方法,重要系数输出“1”,不重要系数输出“0”。最后与小波域 SPIHT 的整体编码过程相似,通过排序和细化两个过程实现分级树集合分裂的质量可伸缩的嵌入式编码。

### 4 实验结果

以  $512 \times 512 \times 8\text{bit}$  图像 Barbara, Lena 和 Baboon 为例进行编解码实验,并与基于小波的 SPIHT 算法和 JPEG2000 编码标准进行比较。实验中 WDFB 分解步骤 1 中进行小波分解和 SPIHT 算法中的小波分解都选用 9/7 滤波器,WDFB 变换的方向滤波器组采用 PKVA 滤波器。由于 JPEG2000 中采用的是 6 层小波分解,故本文算法及 SPIHT 算法中均采用 6 层小波分解。表 2 列出了不同压缩比下(8:1,16:1,32:1,64:1)3 种算法解码图像的 PSNR 值。

表 2 不同图像在不同压缩率下 PSNR 的比较

Table 2 Comparison results of PSNR under different compression ratio of different images

Image	JPEG2000				SPIHT				Our method			
	8:1	16:1	32:1	64:1	8:1	16:1	32:1	64:1	8:1	16:1	32:1	64:1
Babara	35.91	31.05	27.36	24.75	35.79	30.82	27.06	24.36	35.70	30.73	27.31	24.70
Baboon	28.78	25.20	22.93	21.33	28.59	25.05	22.86	21.30	28.32	24.92	22.74	21.46
Lena	41.15	37.73	34.32	31.01	40.56	37.44	34.04	31.08	40.39	37.11	33.78	30.82

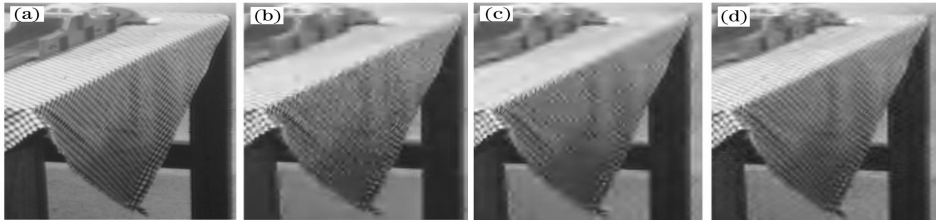


图 9 不同压缩方法解码图像的视觉质量对比

(a)Barbara 原图;(b)JPEG2000 方法;(c) 小波域 SPIHT 方法;(d) 本文方法

Fig.9 Visual quality comparison of decoding images of different compression methods

(a) original Barbara; (b) JPEG2000; (c) SPIHT in wavelet domain; (d) our method

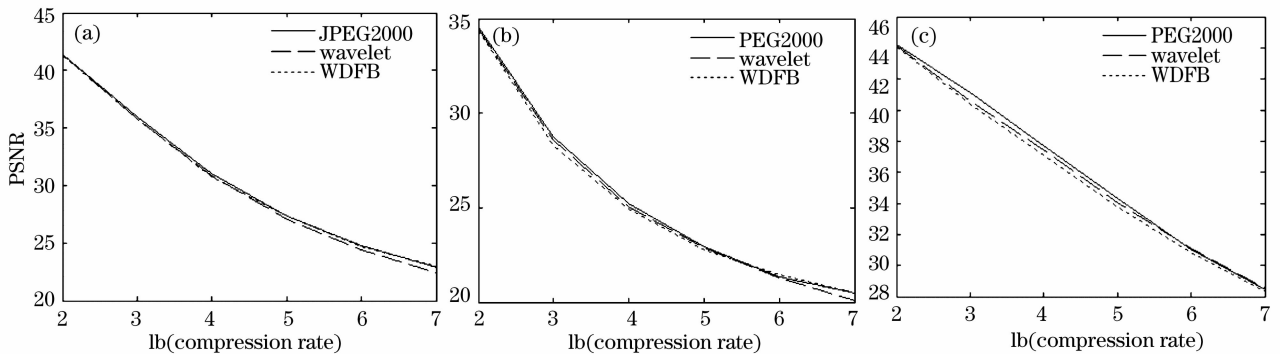


图 10 采用 JPEG2000,SPIHT 和本文方法对图像 Barbara,Baboon 和 Lena 编码后的率-失真曲线图

(a)Barbara 图像;(b) Baboon 图像;(c) Lena 图像。

Fig.10 Rate-distortion curve of JPEG 2000,SPIHT and our method for Barbara,Baboon and Lena respectively

(a) Barbara; (b) Baboon; (c) Lena

图9为三种方法对图像 Barbara 及 Baboon 压缩 32 倍后,图像中纹理比较丰富的局部图像进行的比较。从图9中可以发现 JPEG2000 算法与小波域 SPIHT 方法相比尽管有了一定的提高,但桌布部分的纹理依然是点状的,与本文方法相比仍然有一定的差距。图10所示为使用 JPEG2000、小波域 SPIHT 算法及本文方法分别对图像 Babara, Baboon 和 Lena 进行编码后的率-失真曲线。从图10中可以发现,这三种方法的 PSNR 值都非常接近。尽管 JPEG2000 编码器的 PSNR 值要略高于本文的方法,但从实验结果可以发现,本文方法对于保持图像的纹理和细节信息方面要优于 JPEG2000 编码器。

## 5 结 论

轮廓波变换是一种新的几何多尺度方向分析的工具,它具有多尺度、时频局部性、方向性和各向异性等优良特性,但是轮廓波变换的冗余性对于图像编码很不利。本文在阐述非冗余轮廓波构造原理的基础上,统计分析轮廓波系数的“零树”特性,并通过系数重组构造有利图像编码的空间方向树,给出了一种质量可伸缩的中低比特率图像编码算法。今后的工作将结合人类视觉特性,进一步研究具有视觉压扩特性的高效感知编码算法。

## 参 考 文 献

- 1 J. M. Shapiro. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, **41**(12):3445~3462
- 2 A. Said, W. A. Pearlman. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Transactions on CASVT*, 1996, **6**(3):243~250
- 3 M. N. Donoho, M. Vetterli. The finite ridgelet transform for image representation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, **12**(1):16~28
- 4 J. L. Stack, E. J. Candes, D. L. Donoho. The curvelet transform for image denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(6):670~684
- 5 M. N. Donoho, M. Vetterli. Contourlet. Beyond Wavelet [M]. New York: Academic Press, 2003
- 6 Wang Gang, Xiao Liang, He Anzhi. Algorithm research of adaptive fuzzy image enhancement in ridgelet transform domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1183~1190  
王刚,肖亮,贺安之.脊小波变换域模糊自适应图像增强算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1183~1190
- 7 Wang Gang, He Anzhi, Xiao Liang. Algorithm research in ridgelet transform domain based on the image content of freeway local linear crack [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):341~346  
王刚,贺安之,肖亮.基于高速公路裂纹局部线性特征内容的脊波变换域算法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):341~346
- 8 E. Ramin, R. Hayder. Wavelet-based contourlet transform and its application to image coding[C]. International Conference on Image Processing, Singapore 2004. 3189~3192
- 9 M. D. Adams, F. Kossentini. Jasper: a software-based JPEG2000 codec implementation[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Vancouver, CA, 2000, **12**:53~56
- 10 J. B. Peter, H. A. Edward. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1983, **31**(4):532~541
- 11 H. Roberto, J. T. Mark. A filter bank for the directional decomposition of images: theory and design [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, **40**(4):882~893