

基于非降采样 Contourlet 变换的非线性图像增强新算法

张 林^{①②} 朱兆达^①

^①(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

^②(中航雷达与电子设备研究院 无锡 214063)

摘 要: 为了克服传统去图像噪声算法的限制, 该文提出一种基于非降采样(Nonsubsampled)Contourlet 变换的增强新算法(NNIEM-NSCT)。此新算法通过充分利用方向子带相关性的自适应贝叶斯阈值, 既保护了图像边缘细节, 又可更好地抑制图像噪声。其次, 文中构造的非线性增强匹配函数, 通过改变变换域的系数能有效对图像强弱边缘进行不同程度的增强。实验结果证明, 该文新算法在图像细节处理上, 优于基于 NSCT 的方法, 细节方差(DV) 大约为 NSCT 的 2 倍, 背景方差(BV)基本保持不变, 并且具有更好的视觉效果。

关键词: 图像增强; 非线性增强函数; 非降采样 Contourlet 变换(NSCT); 自适应贝叶斯阈值

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1786-05

A Novel Nonlinear Method for Image Enhancement Based on Nonsubsampled Contourlet Transform

Zhang Lin^{①②} Zhu Zhao-da^①

^①(College of Information Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

^②(Radar and Avionics Institute of AVIC, Wuxi 214063, China)

Abstract: To overcome the limitation of traditional image denoising algorithms, a Novel Nonlinear Image Enhancement Method based on NonSubsampled Contourlet Transform (NNIEM-NSCT) is proposed in this paper. The method not only preserves the details of image edge but also suppresses the noise by means of an adaptive Bayes shrinkage threshold which takes advantages of the relationship across all subbands in the same level. Secondly, a nonlinear enhancement mapping function is constructed by modifying the NSCT coefficients to change the image enhancement of weak and strong edges efficiently. Experimental results show that the proposed method outperforms the NSCT-based method. The Detail Variance (DV) of proposed method improves about two times more than that of NSCT-based method, when the Background Variance (BV) is almost equal, and a better visual effect is gotten.

Key words: Image enhancement; Nonlinear enhancement function; NonSubsampled Contourlet Transform(NSCT); Adaptive Bayes shrinkage threshold

1 引言

图像多尺度分析技术在图像增强中有着广泛的应用。多尺度图像增强^[1-3]是为了更好地保护边缘和细节信息, 抑制噪声。Contourlet 变换^[4,5](CT)不仅继承了小波变换(WT)的多分辨率时频分析特征, 且具有良好的方向各异性。但因 CT 缺乏平移不变性, 在图像去噪增强^[5,6]时会产生伪吉布斯现象。而 NSCT^[7]是一种具有多分辨, 多方向, 平移不变特性的变换, 可有效消除伪吉布斯效应, 在图像增强时, 突出图像中的重要细节和改善视觉质量。近年来, 图像增强算法不断被改进^[1-3,6,8], 取得了良好的增强效果。

通常的图像增强算法中的贝叶斯萎缩法阈值只考虑了 NSCT 变换系数尺度间的相关性, 未利用其尺度内图像系数的相关性。图像尺度间图像系数具有较强的相关性, 利用这种相关性可望在图像增强中取得较好的效果。正是基于这种考虑, 本文通过构造的自适应贝叶斯阈值计算方法, 不但考虑贝叶斯萎缩法阈值的优越性, 也充分利用 NSCT 变换系数尺度内的相关性; 把待增强的图像边缘分为强弱和噪声进行分别处理, 通过非线性增强匹配函数的控制, 既增强了图像细节, 又抑制了噪声, 获得了良好的图像增强效果。

2 基于 NSCT 的非线性图像增强新算法

CT由拉普拉斯金字塔分解和方向滤波器组^[9]两

部分组成。为了保留CT的频率分割结构同时实现移不变性, 去掉对图像下采样, 构造相应的分级和各种方向滤波器, 得到NSCT。图1为NSCT总体结构图, 由两个具有移不变性的部分组成: (1)非降采样金字塔分级; (2)非降采样方向滤波器组。

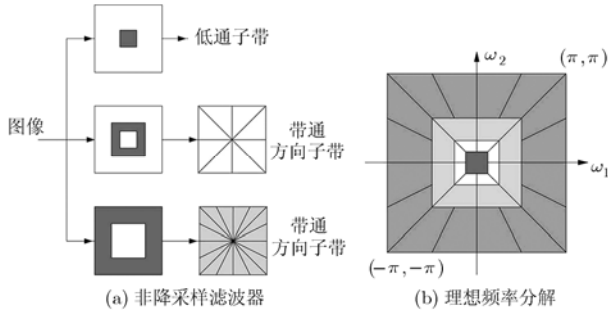


图1 NSCT结构图

2.1 阈值的构造

Chang 等人^[10]以广义高斯分布作为图像小波系数的先验模型, 提出了基于 Bayes 准则的贝叶斯萎缩法(Bayes Shrink), 这种方法能够自适应地处理各子带阈值, 比传统的小波阈值具有更理想的萎缩特性。贝叶斯萎缩法阈值可由下式获得:

$$\lambda = \sigma_n^2 / \sigma_s \quad (1)$$

其中 σ_s 为信号标准差, σ_n^2 为噪声方差。

对NSCT域不同尺度下的噪声方差引入如式(2)的负指数估计模型:

$$\hat{\sigma}_n^2(l) = \hat{\sigma}_n^2(l=1)e^{-l^{1.2}} \quad (2)$$

而最小尺度图像的噪声方差 $\hat{\sigma}_n^2(l=1)$ 可用文献[11]方法估计得到。

对于 l 层 k 方向的子带, 可以根据最大似然估计, 得到子带内信号的方差。其中, M 和 N 分别为图像的长度和宽度。

$$\hat{\sigma}_{l,k}^2 = \max \left(0, \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_{k,l}^2(i, j) - \hat{\sigma}_n^2(l) \right) \quad (3)$$

由式(3)可以获得子带的阈值:

$$\lambda = \hat{\sigma}_n^2(l) / \hat{\sigma}_{l,k} \quad (4)$$

式(4)中得到的阈值只考虑了变换系数尺度间的相关性, 忽视了尺度内的图像系数间的相关性。由于NSCT表示图像边缘, 纹理的系数在各个子带内差异较大, 且噪声能量分散, 幅值较少, 子带系数的绝对值较小。因此, 构造了一个自适应的贝叶斯阈值来解决这一不足:

$$\lambda_{l,k} = \frac{\bar{y}_{l,k} - y_{l,\min}}{\bar{y}_l - y_{l,\min}} \lambda \quad (5)$$

式中 \bar{y}_l 代表NSCT域内 l 层内系数的平均值, $\bar{y}_{l,k}$ 代

表NSCT域 l 层 k 方向的子带内系数的平均值, $y_{l,\min}$ 代表NSCT域 l 层 k 方向的子带系数的最小值。

2.2 匹配函数设计

简单的增益函数在增强边缘细节时, 也放大了噪声。为克服上述缺点, 构造一个非线性的增强匹配函数是十分必要的。该函数具有参数可调、单调、快速的特点, 符合提出图像增强的要求:

$$f(x) = k \cdot \left(\sqrt{a \cdot p_{\max}^2 - (|x| - b \cdot p_{\max})^2} - d \cdot p_{\max} \right) \cdot \text{sgn}(x) \quad (6)$$

式中 x 表示经过 NSCT 的系数; $\text{sgn}(x)$ 表示 NSCT 的系数的符号, 目的是为了保持图像的相位不变; p_{\max} 表示 NSCT 域内同一尺度下, 不同方向子带待增强系数的最大值; k 表示增强因子, 用来控制增强幅度的大小。强弱边缘采取了不同的 k 值定义, k 参数必须满足:

$$k_{E_S} < k_{E_W}, \quad 0 < k < p_{\text{fix}} / p_{\max} \quad (7)$$

式中 k_{E_S} , k_{E_W} 分别代表强弱边缘的不同 k 参数值; p_{fix} 则表示对应于灰度图像空间域中, 值为 $2^N - 1$ (N 代表灰度级) 的像素点的 NSCT 域的系数值。函数非线性度控制增益 a , b , d 参数满足:

$$\left. \begin{aligned} a &= b^2 + d^2 \\ d &= b - 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由于 a 和 d 参数可以由 b 参数决定, 下面讨论 b 参数对图像增强结果的影响。

图 2 给出式(6)对应的曲线族。其中参数值 k 分别为 2.5 和 1(当 x 绝对值小于 18 时 k 值为 2.5, 其余值为 1), b 参数值分别取 1.1, 1.3, 1.5, 1.7 和 1.9。

2.3 NSCT 去噪声方法的参数影响分析

依据不同子带的同一位置所有像素点的平均值 \bar{p} , 以及所有像素点的最大值 p_{\max} , 选取一个合适的阈值可把 NSTC 系数进行分类:

$$\hat{f}_{\text{in}} = \begin{cases} E_S, & \bar{p} \geq c\lambda_{l,k} \\ E_W, & \bar{p} < c\lambda_{l,k}, p_{\max} \geq c\lambda_{l,k} \\ n, & \bar{p} < c\lambda_{l,k}, p_{\max} < c\lambda_{l,k} \end{cases} \quad (9)$$

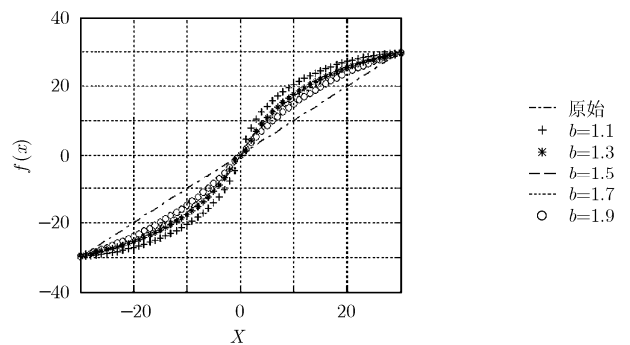


图 2 非线性增强匹配函数

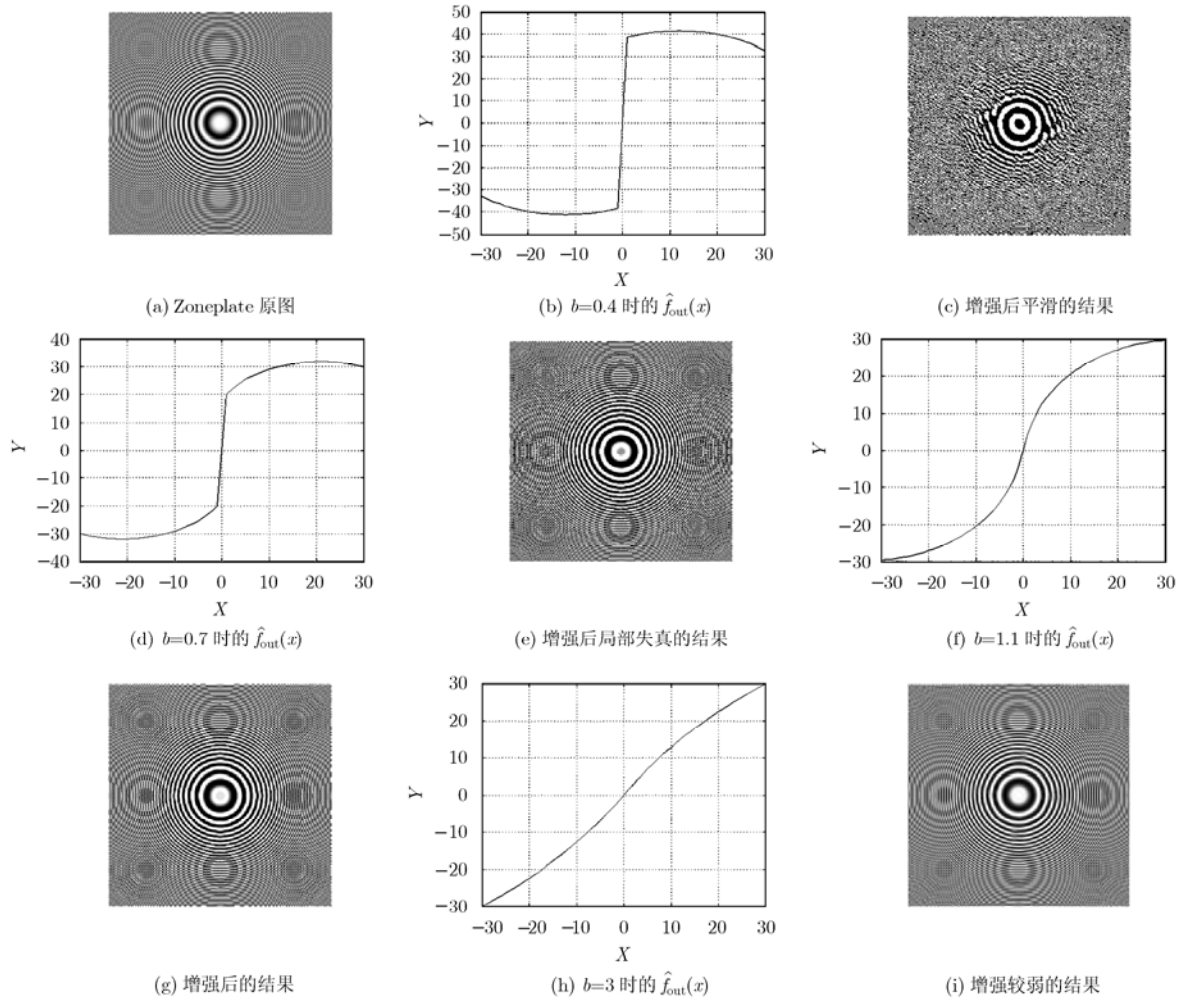


图 3 NSCT 去噪声方法的参数影响分析结果

其中 E_S 代表强边缘, E_W 代表弱边缘, n 则代表噪声, $\lambda_{l,k}$ 代表位于 l 层和 k 方向子带的阈值。而 c 为调节参数, 其典型值介于 1~5 之间。

可以根据式(10)改变系数:

$$\hat{f}_{out}(x) = \begin{cases} x, & x \in E_S \\ f(x), & x \in E_W \\ 0, & x \in n \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 图像的强边缘被保留, 弱边缘被增强, 噪声被有效地抑制。

非线性函数比分段线性函数光滑, 增强后的图像相对来说过渡较平滑。当 $b = 0.4, 0.7, 1.1$ 和 3 时增强的差值图像, 如图 3 所示。从图中可以看到, 当 $b = 1.1$ 的时候, 增强差值图的纹理较明显, 效果最好。而图 3(c), 3(e), 3(i) 因参数选择不当, 造成不同程度局部图像失真和模糊。

2.4 参数的选择

通过引入 DV 和 BV 的比值, 作为选择 b 参数值的客观依据。其中 BV 代表图像背景方差; DV

代表图像细节方差, DV 值大, 说明图像细节更丰富。

如图 4 所示, 当 DV/BV 值达到最大时, 对应的 b 参数值作为前面讨论增强匹配函数的参数值时, 所得到的实验结果是最好的。当 $b = 1.1$, Barbara 图对应曲线的 DV/BV 值达到最大。同理, 当 $b = 1.2$, Pentagon 图对应的增强效果最好。当给定待增强图像后, 可以通过计算图 4 中函数最大值, 确定最佳

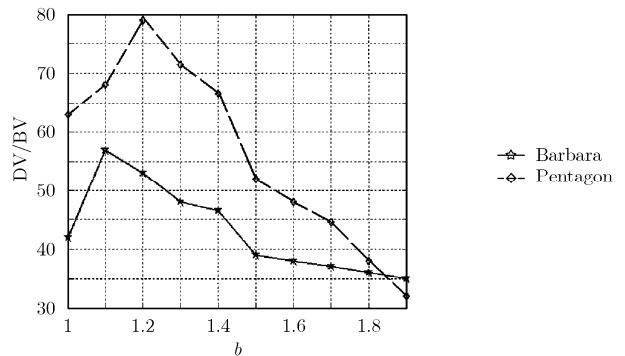


图 4 不同 b 参数值对应不同的 DV/BV 值

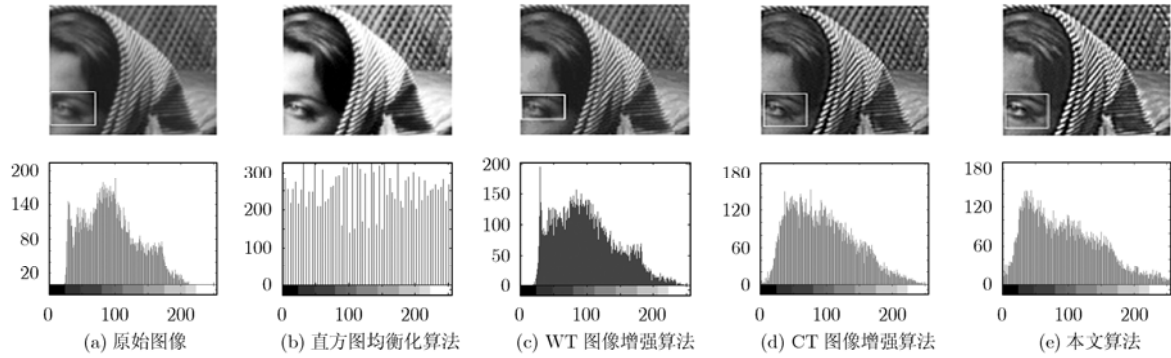


图 5 应用 Barbara 图像对比实验结果(图像及直方图)

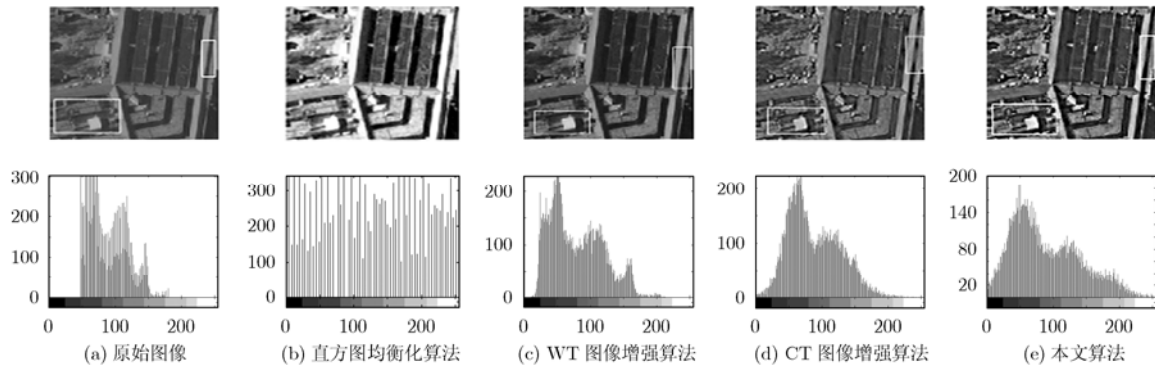


图 6 应用 Pentagon 图像实验结果(图像及直方图)

参数，来达到增强最佳效果。

3 实验结果和分析

通过和经典算法，如直方图均衡化算法、基于 WT 的算法和基于 CT 的算法^[12]进行实验对比，分别从主观和客观两方面对提出的算法进行性能评估。

先从视觉上对算法的效果进行评价。在图 Barbara 和 Pentagon 的实验中，通过公式计算出参数：大尺度系数 $c=4$ ，小尺度系数 $c=3$ ， $a=1.22$ ， $b=1.1$ ， $d=0.1$ ，强边缘 $k=1.2$ ，弱边缘 $k=2.5$ ，实验结果如图 5 和图 6 所示。

在直方图均衡化算法中，原图像呈现低对比度，经直方图均衡化后，图像直方图充满整个灰度级，提高了图像对比度，如图 5 和图 6 中的(a)和(b)。但直方图均衡化对于图像的纹理细节的增强没有作用。在基于 WT 的算法中，图像的边缘和细节到了一定的增强。在基于 CT 的算法中，选择一个合适的阈值，能较好地区分图像的边缘和纹理，使得增强后的图像细节纹理更明显。本文 NNIEM-NSCT 算法选择了一个更好的阈值，能更好地区分图像的边缘和噪声，从图 5 和图 6 中的(d)和(e)可看到，比基于 CT 的算法图像细节增强得更明显。

应用上面实验结果进行客观增强效果评价。由表 1 和表 2 可以得出，在直方图算法中，图像的 DV

值下降，BV 值和原来的差别较大，说明图像的细节和纹理被模糊。在 WT 的算法和 CT 的算法中，图像的 DV 值得到了提高，BV 值基本一致，说明图像细节有所增强。与这些算法相比，本文 NNIEM-NSCT 算法的 DV 值都有更显著的提高，BV 值也基本保持不变，说明 NNIEM-NSCT 算法的图像增强性能比这些算法更好。

表 1 Barbara 图中各种算法 DV, BV, DV/BV 值比较

| 参数值 | DV | BV | DV/BV |
|---------------|---------|-------|-------|
| 原始图像 | 525.02 | 38.71 | 13.75 |
| 直方图均衡化 | 326.22 | 67.73 | 5.65 |
| 小波算法 | 633.23 | 38.99 | 16.24 |
| NSCT 算法 | 1049.11 | 36.95 | 28.39 |
| NNIEM-NSCT 算法 | 1936.12 | 33.70 | 57.44 |

表 2 Pentagon 图中各种算法 DV, BV, DV/BV 值比较

| 参数值 | DV | BV | DV/BV |
|---------------|---------|-------|-------|
| 原始图像 | 584.21 | 31.82 | 18.35 |
| 直方图均衡化 | 506.37 | 65.67 | 7.71 |
| 小波算法 | 617.49 | 30.32 | 20.36 |
| CT 算法 | 1051.09 | 28.18 | 37.30 |
| NNIEM-NSCT 算法 | 2251.16 | 28.45 | 79.12 |

4 结束语

本文对直方图均衡化算法、基于 WT 的算法、最近提出的基于 CT 的算法与本文 NNIEM-NSCT 算法进行实验对比, 结果表明, NNIEM-NSCT 算法无论在人的主观视觉效果和客观评价方面, 都优于这些算法。在客观评价指标方面, 在背景方差(BV)值保持基本不变的情况下, NNIEM-NSCT 算法的细节方差(DV)值明显高于这些算法。不同的 b 参数对图像增强结果有直接的影响, 具体如下: (1) b 参数的一般取值范围, $b \in [1, 2]$, 相应地 $d \in [0, 1]$ 。(2) 当 $b < 0.5$ 时, NSCT 域的大幅度系数没有得到增强, 而小幅度的系数得到很大的增强, 结果使图像的对比度下降。图像变得平滑, 甚至模糊, 如图 3(c)所示。(3) 当 $b < 1$ 时, 图像过增强。这是因为某些局部区域放大因子超过最大值, 图像的对比度被破坏, 因此出现局部区域增强, 甚至图像失真, 如图 3(e)所示。在 $x=20$ 区域, 可以看到, 增益函数的值已超出了最大的像素值 30(绝对值), 原来的对比度被破坏, 局部区域出现了模糊现象。(4) 当 $b > 2$ 时, 图像虽然有所增强, 但是幅度不够, 如图 3(i)所示。随着参数 b 的增大, 可以看出匹配函数近似于线性函数, 即图像几乎没有增强。

最后要说明的是本文的方法也存在一定的局限性, 当图像的噪声方差达到一定值的时候, 分解出来的图像的弱边缘和噪声的区分难度加大, 无法进行准确分类, 从而很难得到一个较好的阈值, 因此也会出现伪边缘现象。对这一方法的改进将是未来的研究工作。

参考文献

- [1] Dippel S, Stahl M, Wiemker R, and Blaffert T. Multiscale contrast enhancement for radiographies: Laplacian pyramid versus fast wavelet transform. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2002, 21(4): 343-353.
 - [2] Po D D and Do M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(6): 1610-1620.
 - [3] 何宏, 唐志航等. 基于小波多尺度积的图像增强新算法. 计算机应用与软件, 2007, 24(3): 163-165.
He Hong and Tang Zhi-hang, *et al.*. Novel algorithm for image enhancement based on wavelet multiscale product. *Computer Application and Software*, 2007, 24(3): 163-165.
 - [4] Do M N and Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091-2106.
 - [5] 梁栋, 沈敏等. 一种基于Contourlet递归Cycle Spinning的图像去噪方法. 电子学报, 2005, 33(11): 2044-2046.
Liang Dong and Shen Min, *et al.*. A method for image denoising based on the contourlet transform using recursive cycle spinning. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(11): 2044-2046.
 - [6] Zhou J, Cunha A L, and Do M N. Nonsubsampled contourlet transform: construction and application in enhancement. Proc. of IEEE Intl Conf on Image Processing, Genoa, Italy, Sep. 2005: 469-472.
 - [7] Cunha A L, Zhou J, and Do M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design and applications. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
 - [8] Feng Peng, Pan Ying-jun, Wei Biao, Jin Wei, and Mi De-ling. Enhancing retinal image by the Contourlet transform. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(4): 516-522.
 - [9] Khan M A U, Khan M K, and Khan M A. Coronary angiogram image enhancement using decimation-free directional filter banks. Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Proc.(ICASSP), Montreal, QC, Canada, 2004: 441-444.
 - [10] Chang S G, Yu B, and Vetterli M. Spatially adaptive wavelet thresholding with context modeling for image denoising. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(9): 1522-1531.
 - [11] Da C and Minh N D. Nonsubsampled contourlet transform: filter design and applications in denoising[C]. IEEE International Conference on Image Processing, Genova, Italy, 2005: 749-752.
 - [12] Nezhadarya E and Shamsollahi M B. Image contrast enhancement by Contourlet transform. 48th International Symposium ELMAR-2006 focused on Multimedia Signal Processing and Communications, June 2006: 81-84.
- 张林: 男, 1960年生, 研究员, 研究方向为雷达系统与雷达信号处理。
朱兆达: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号检测与处理。