

# 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法

石 丹 李庆武 倪 雪 霍冠英

(*河海大学计算机及信息工程学院, 江苏 常州 213022*)

**摘要** 针对红外图像对比度低、噪声大等特点, 提出一种基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法。Contourlet 变换是一种有效的方向多尺度变换分析方法, 能在任意尺度上实现任意方向的分解。首先采用 Contourlet 变换对图像进行多尺度、多方向分解, 得到低频子带系数和各带通方向子带系数。引入非完全贝塔函数对低频子带系数进行处理, 提升图像整体对比度; 采用非线性增益函数对各带通方向子带系数进行处理, 通过估计噪声水平设定阈值, 抑制绝对值小于阈值的系数, 增强大于阈值的系数。最后经 Contourlet 逆变换得到增强图像。实际实验结果表明, 该方法可以有效地增强低对比度红外图像, 无论是在视觉效果上还是在图像对比度评估值定量指标上均明显优于直方图均衡化、小波变换增强等方法, 且能保持更多的图像轮廓特征, 克服了这些方法对噪声增强过度 and 图像细节增强不足等缺点。

**关键词** 图像处理; 图像增强; Contourlet 变换; 红外图像; 非完全贝塔函数; 非线性增益函数

**中图分类号** TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0342

## Infrared Image Nonlinear Enhancement Algorithm Based on Contourlet Transform

Shi Dan Li Qingwu Ni Xue Huo Guanying

(*College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China*)

**Abstract** Considering the low contrast and strong noise of infrared images, an infrared image nonlinear enhancement algorithm based on Contourlet transform is proposed. As an efficient directional multiresolution image representation method, Contourlet transform can offer different number of directions at different scales. Firstly, Contourlet transform is performed on the original infrared image at different scales and directions, thus the low frequency subband coefficients and varieties of directional bandpass subband coefficients are obtained. Then, incomplete beta function is applied to enhance the image's global contrast in the low frequency subband, and nonlinear gain function is used to process the coefficients at each scale in the directional bandpass subbands respectively, which suppresses small coefficients and enhances big coefficients by threshold denoising method. Finally, the enhanced infrared image is obtained by transforming these changed coefficients back to the spatial domain. The experimental results show that the algorithm proposed in this paper has advantages of enhancing low contrast infrared image efficiently over other methods, such as histogram equalization and wavelet transform enhancement. Our method can preserve more characteristics and reduce the noise of original image. It is superior to general histogram equalization and wavelet transform enhancement whatever in visual effect or in quantitative contrast parameter.

**Key words** image processing; image enhancement; Contourlet transform; infrared image; incomplete beta function; nonlinear gain function

## 1 引 言

红外成像设备作用距离远, 隐蔽性好, 具有很强的环境适应性, 与可见光相比, 红外图像除具有干扰小、图像信息简洁等特点外, 还能反映物体的热辐射

特征。因此, 它被广泛应用于军用和民用领域。但是, 红外图像普遍具有整体偏暗、目标和背景对比度低、纹理弱、噪声大、图像的灰度分布较为集中等不足, 不易于观察目标的细节。由于以上特点, 对红外

**收稿日期**: 2008-09-28; **收到修改稿日期**: 2008-10-15

**基金项目**: 国家 863 计划(2007AA11Z227)、江苏省社会发展科技项目(BS2007058)和常州国家高新区科技攻关项目(XE120070614)资助课题。

**作者简介**: 石 丹(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: shidan-96@163.com

**导师简介**: 李庆武(1964—), 男, 教授, 主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: qwli@hhuc.edu.cn (通信联系人)

图像进行增强处理成了突出目标细节、改善图像质量的主要手段。

目前,图像增强的方法分为空域处理和频域处理两大类。空域处理是在原图像上直接进行数据运算,常见的处理方法有:线性拉伸、直方图均衡化<sup>[1]</sup>和反锐化掩模<sup>[2]</sup>等。对于实际低对比度红外图像,这些方法都不可避免地会带来噪声增强过度和图像细节增强不足的现象。频域处理方法主要有基于傅里叶变换的算法、基于小波变换的算法<sup>[3,4]</sup>等。二者在图像增强时都易产生“振铃”现象。此外,基于傅里叶变换的算法会造成细节信息损失,基于小波变换的增强方法通过在变换域中对小波系数进行处理,增强图像部分细节的同时有效地抑制了图像噪声。但是由一维小波张成的二维可分离小波基只有有限的方向,不能很好地表示图像中的方向信息,细节信息的增强明显不足。多尺度几何分析理论(MGA)的提出和发展弥补了小波变换的这一缺陷。2002年 Do 和 Vetterli 在继承小波多尺度分析思想的基础上提出一种新的非自适应的方向多尺度分析方法——Contourlet 变换<sup>[5]</sup>,它能在任意尺度上实现任意方向的分解,擅长描述图像中的轮廓和方向性纹理信息,很好地弥补了小波变换的不足。本文提出一种基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法,在 Contourlet 域中分别对低频子带系数和各带通方向子带系数进行非线性处理,经反变换得到增强图像。实验结果表明,该方法可以有效地增强低对比度红外图像,在视觉效果和图像对比度评估定量指标上均明显优于直方图均衡化、小波变换增强等方法,且能保持更多的图像轮廓特征。

## 2 Contourlet 变换

Contourlet 变换是一种新的图像二维表示方法,具有多分辨率、局部定位、多方向性、近邻采样和各向异性等性质<sup>[6]</sup>,其基函数分布于多尺度、多方向上,少量系数即可有效地捕捉图像中的边缘轮廓,而边缘轮廓正是自然图像中的主要特征。

Contourlet 变换的基本思想是首先用一个类似小波的多尺度分解捕捉边缘奇异点,再根据方向信息将位置相近的奇异点汇集成轮廓段。选用 Burt 和 Adelson 于 1983 年提出的拉普拉斯塔式滤波器结构(LP)<sup>[7]</sup>对图像多分辨率分解来捕捉奇异点。LP 分解首先产生原始信号的一个低通采样逼近及原始图像与低通预测图像之间的一个差值图像,对得到的低通图像继续分解得到下一层的低通图像和差值图像,如

此逐步滤波得到图像的多分辨率分解。二维方向滤波器组(DFB)应用于 LP 分解得到的每一级高频分量上,在任意尺度上可分解得到 2 的  $n$  次方数目的方向子带。图像每次经 LP 子带分解产生的高通子带输入 DFB,逐渐将点奇异连成线形结构,从而捕获图像中的轮廓。LP 与 DFB 结合形成双层滤波器组结构,称为塔形方向滤波器组(PDFB),由于该变换以轮廓段形式的基函数逼近原始图像,因此也称为离散 Contourlet 变换。图 1 给出了离散 Contourlet 变换的滤波器组结构图,原始粗糙图像经 PDFB 结构多层分解可得到多尺度多方向子带图像。图 2 则给出了一种 Contourlet 频域分解图( $l=3, 2^3=8$ ),在实际应用中,方向数一般随着尺度增大而增多。相比临界采样小波方案,LP 分解在高维情况下每层仅产生一个带通图像,避免了扰频现象(因为 LP 滤波器组仅对低通图像进行了下采样),因此 Contourlet 变换能有效地应用在图像增强领域。

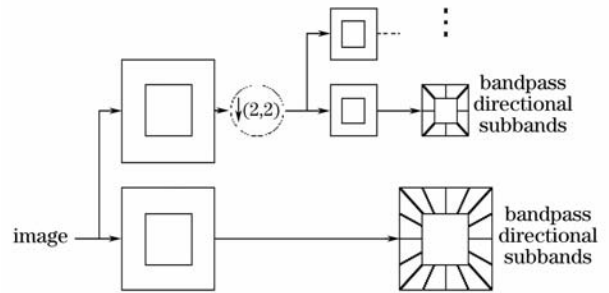


图 1 Contourlet 变换滤波器组结构图

Fig. 1 Pyramid directional filter bank of Contourlet

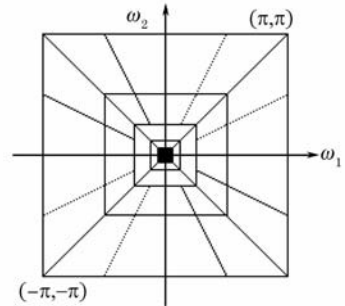


图 2 Contourlet 变换频率分解图

Fig. 2 Frequency decomposition of Contourlet

## 3 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法

红外图像的增强主要在于去除噪声<sup>[8]</sup>、提高目标和背景的对比度。作为一种多尺度分析方法,Contourlet 变换同样将图像分解为低频子带和高频子带,与小波变换不同的是,它能在任意尺度上实现

任意方向的分解,产生低频系数和各带通方向子带系数。基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法是在 Contourlet 域内分别对低频系数和各带通方向子带系数采用不同的非线性函数进行处理,经逆变换后实现空域图像整体对比度的增强。

### 3.1 低频系数非线性增强

#### 3.1.1 非完全贝塔函数

Tubbs 提出利用归一化的非完全 Beta 函数来实现几种典型的灰度变换曲线的自动拟合<sup>[9]</sup>。归一化的非完全 Beta 函数定义为

$$I_x(x) = B^{-1}(z, \omega) \int_0^x t^{z-1} (1-t)^{\omega-1} dt, \quad (1)$$

式中,  $B(z, \omega) = \int_0^1 t^{z-1} (1-t)^{\omega-1} dt$  为 Beta 函数,  $0 < z, \omega \leq 10$ , 不同的  $z$  和  $\omega$  能够拟合各类的灰度变换曲线。

#### 3.1.2 系数调整

经 Contourlet 变换后,低频子带包含大量图像的基本信息,噪声较少。低频子带关系到图像整体的对比度。对于低对比度红外图像,其分解后的低频子带系数值相差甚小,为了实现增强效果,需要进行灰度值的拉伸。引入非完全贝塔函数处理低频系数以提高整体对比度

$$C'_{j,k} = k_1 * I_x(C_{j,k}/M'_{j,k}), \quad (2)$$

式中  $C'_{j,k}$  和  $C_{j,k}$  是处理前后的低频子带系数,  $M'_{j,k}$  是该层系数的最大值,  $k_1$  为常数 ( $k_1 > 1$ )。

考虑到红外图像整体偏暗的特点,调整参数  $z$ ,  $\omega$  使灰度过渡较为平缓,且灰度抑制范围较小。经实验得到,图 3 所示曲线处理红外图像的低频系数较为合适。其中,  $z = 5, \omega = 10$ 。

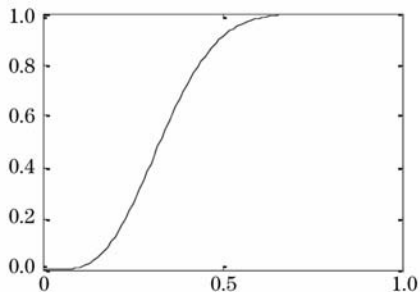


图 3 非完全贝塔函数曲线 ( $z=5, \omega=10$ )

Fig. 3 Curve of incomplete beta function ( $z=5, \omega=10$ )

### 3.2 带通方向子带系数非线性增强

#### 3.2.1 非线性增益函数

非线性增益函数必须满足单调性、反对称性。且能抑制较小的系数,保持较大的系数,放大绝对值

介于中间的系数。本文采用如下增益函数<sup>[10]</sup>

$$f(x) = a \{ \sigma[c(x-b)] - \sigma[-c(x-b)] \}, \quad (3)$$

其中  $a = \frac{1}{\sigma[c(1-b)] - \sigma[-c(1-b)]}$ ,

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad 0 < b < 1, b \text{ 和 } c \text{ 分别是控制}$$

增强范围和增益强度的参数。通常,  $0 < b < 1, c$  的取值在 20 ~ 50 间。图 4 为非线性增益函数曲线。

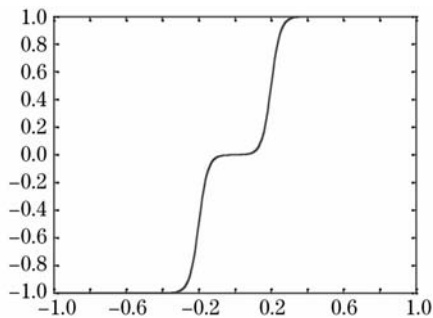


图 4 非线性增益函数曲线 ( $b=0.2, c=40$ )

Fig. 4 Curve of nonlinear enhancement function

( $b=0.2, c=40$ )

#### 3.2.2 阈值设定

在 Contourlet 变换系数中大部分噪声处于最细子带。在最细子带中采用经典中值估计公式  $\sigma = \text{median}[abs(c)]/0.6745$  对方差  $\sigma$  进行估计比较准确<sup>[11]</sup>。其中  $c$  为 Contourlet 分解后的最细子带系数。阈值设定为

$$T = \begin{cases} 3\sigma \sqrt{\sigma_{j,k}}, & j = 1, 2, \dots, J-1 \\ \rho 3\sigma \sqrt{\sigma_{j,k}}, & j = J \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\rho$  用来微调最细层阈值,考虑到 Contourlet 变换系数冗余度,取为 4/3。  $\sigma_{j,k}$  是第  $j$  尺度,第  $k$  方向的噪声方差,其值可由蒙特卡罗估计法<sup>[12]</sup>得到:对多次重复产生的随机噪声分别进行 Contourlet 变换,并在 Contourlet 域中求出各方向子带系数的方差,最后在每一个子带上计算所有随机噪声方差的均值,即为该方向子带的噪声方差。

#### 3.2.3 系数调整

带通方向子带系数反映的是图像的细节信息,其系数偏小且包含噪声。一般认为绝对值较小的那部分系数对应噪声分量,需要抑制,而绝对值较大的那部分系数对应清晰边缘,需要保持,其余绝对值介于中间的系数需放大,以此提高各方向子带的对比度。

为避免将噪声系数放大,对各带通方向子带系数非线性处理时,需根据(4)式所设定的阈值进行阈值化处理,即

$$C'_{j,k} = \begin{cases} k_2 * C_{j,k} * f\left(\frac{C_{j,k}}{M_{j,k}}\right), & \text{abs}(C_{j,k}) \geq T \\ 0, & \text{abs}(C_{j,k}) < T \end{cases} \quad (5)$$

式中  $C_{j,k}$  和  $C'_{j,k}$  是处理前后的各带通方向子带系数,  $M_{j,k}$  是该层系数的最大值,  $k_2$  为常数 ( $k_2 > 1$ )。

#### 4 对比度评估

对图像增强效果的评价可以从定性和定量两方面进行。人眼的主观感受是最直接、最简单、最有效的评价标准,这种方式也是目前使用最广泛的方式之一,对那些具有较大差别,处理前后变化量较大的图像是能够达成广泛共识的。然而这种方法也存在一定的局限性。当图像处理前后的变化不是非常明显时,人类视觉就很难判断了,还需借助定量的评价标准。本文采用对比度测量函数<sup>[13]</sup>定量评价增强效果

$$C = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f'^2(m,n) - \left| \frac{1}{mn} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f'(m,n) \right|^2, \quad (6)$$

式中  $M, N$  表示图像的大小,  $f'(m, n)$  表示增强后的图像。(6) 式的值越大, 图像对比度越好。

#### 5 算法步骤

根据上述分析, 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法步骤如下:

1) 采用 Contourlet 滤波器组对原红外图像进

行 Contourlet 变换, 得到各尺度上的 Contourlet 方向子带系数  $C_{j,k}^{(l)}$  ( $0 \leq l \leq J, 0 \leq j \leq J, 0 \leq k \leq 2^l$ ) 和低频子带系数  $C_0$ 。其中  $j$  表示 LP 各尺度,  $l$  为 DFB 的分解级,  $k$  为 DFB 分解的方向;

2) 将非完全贝塔函数作用于归一化的低频系数, 提高图像整体对比度;

3) 按照(4)式设定各方向子带系数的阈值, 并采用 3.2 节所述的非线性增益算法调整各带通方向子带系数;

4) 对所有子带系数进行 Contourlet 逆变换, 得到增强后的图像。

#### 6 实验结果及评价

对不同环境下拍摄的红外图像进行基于 Contourlet 变换的非线性增强实验。第一组是夜晚在实验室内采集的红外图像, 实验结果如图 5 所示。实验中,  $k_1$  和  $k_2$  均取 5, 增益函数参数为  $b=0.13$ ,  $c=35$ 。可以看出, 源图像(a1)整体偏暗, 直方图灰度分布集中, 经直方图均衡化(b1)处理后, 目标得到了较好的突显, 但噪声也被完全放大, 整幅图像噪声严重, 视觉效果较差。小波变换增强(c1)有效地抑制了噪声, 但在增强过程中细节信息保持不足, 使目标不够突出。本文的算法(d1)实现了目标和背景整体对比度的提升, 抑制噪声的同时保留了图像的细节, 尤其在左右两侧垂直方向, 轮廓信息的保持较小波变换方法完整, 很好地保留了图像边缘。

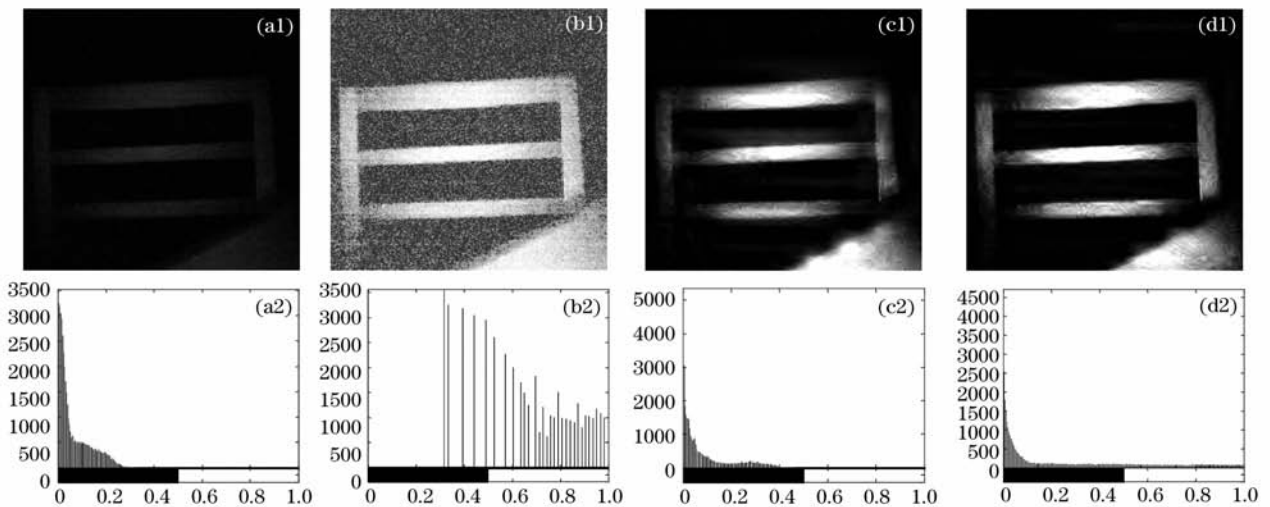


图 5 室内红外图像增强实验。(a1)原图;(b1)直方图均衡化;(c1)小波变换增强法;(d1) Contourlet 变换增强法  
(a2)~(d2)分别为(a1)~(d1)的直方图

Fig. 5 Indoor infrared image enhancement test. (a1) Original image; (b1) Histogram equalization; (c1) Wavelet enhancement; (d1) Contourlet enhancement; (a2)~(d2) Histograms of (a1)~(d1)

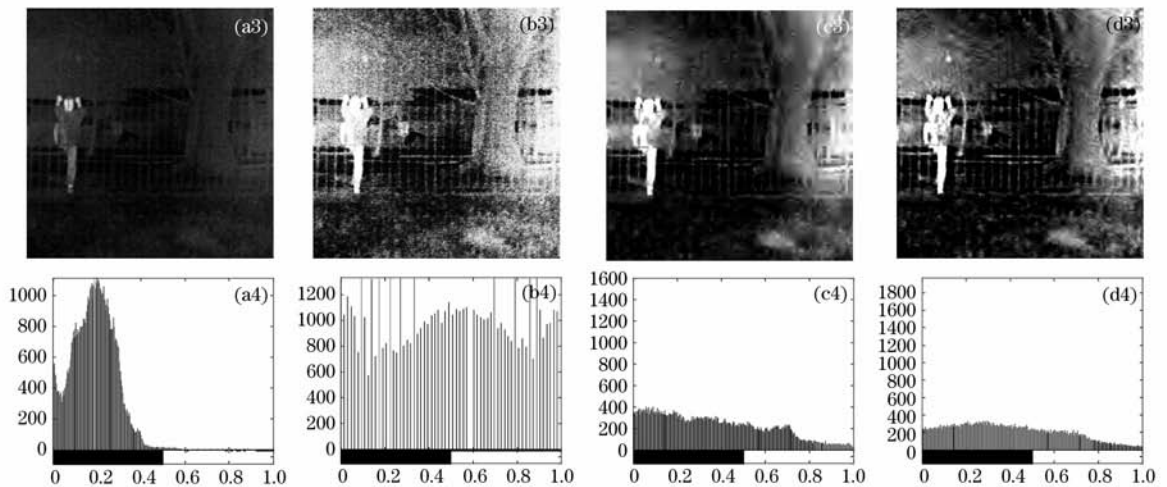


图6 室外红外图像增强实验。(a3)原图;(b3)直方图均衡化;(c3)小波变换增强法;(d3)Contourlet变换增强法  
(a4)~(d4)分别为(a3)~(d3)的直方图

Fig. 6 Outdoor infrared image enhancement test. (a3) Original image;(b3) Histogram equalization;(c3) Wavelet enhancement;(d3) Contourlet enhancement;(a4)~(d4) Histograms of (a3)~(d3)

第二组实验是室外拍摄的红外图像,实验参数为 $k_1=3, k_2=5, b=0.2, c=40$ ,结果见图6所示,其中,图(b3),(c3),(d3)分别为源图像(a3)经直方图均衡化、小波变换增强法、Contourlet变换增强法处理的结果,图(a4)~(d4)分别为图(a3)~(d3)的直方图。从直方图(a4)可以看到,源图像灰度分布较第一组相对均匀,但背景和目标对比度仍然很小,不利于下一步对图像信息进行准确分析。经三种方法对比后,本文的方法无论在整体视觉还是在细节保持上都有明显的优势。特别在目标增强的同时很好地保留了背景树枝和栅栏等细节信息。

为了进一步说明本文算法的优越性,采用第4节所述对比度测量函数定量评价增强效果,如表1所示。数据表明,Contourlet变换增强法的评估值高于另外两种方法。

表1 各增强算法定量对比度参数评价

Table 1 Quantitative contrast parameter comparison of various enhancement algorithms

	Histogram equalization	Wavelet enhancement	Contourlet enhancement
Indoor infrared image	0.055071	0.079898	0.096344
Outdoor infrared image	0.085618	0.095546	0.13225

## 7 结 论

传统直方图均衡化没有考虑噪声的影响,在增强对比度的同时也放大了噪声,小波变换法对细节的增强不足,本文的算法能有效提高红外图像的对比度,无论是在视觉效果上还是在图像对比度评估值定量

指标上均明显优于直方图均衡化、小波变换增强方法,并充分保留了图像的轮廓信息。如何自适应调整非线性增益函数的参数将是进一步研究的内容。

## 参 考 文 献

- Hummel R. Image enhancement by histogram transformation[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1977, **6**: 184~195
- H P Chan, C J Vyborny. Digital mammography: ROC studies of the effects of pixel size and unsharp mask filtering on the detection of subtle microcalcifications[J]. *Invest. Radiol.*, 1987, **22**(7): 581~589
- Zhang Changjiang, Fu Mengyin, Jin Mei *et al.*. Approach to enhance contrast of infrared image based on wavelet transform [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2004, **23**(2): 119~124  
张长江,付梦印,金梅等.一种红外图像对比度增强的小波变换法[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(2): 119~124
- Zhang Jingjing, Fang Yonghua. Novel image fusion algorithm for multi-band polarimetric image based on visible light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1067~1072  
张晶晶,方勇华.基于可见光的多波段偏振图像融合新算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1067~1072
- M N Do, M Vetterli. *Contourlets, Beyond Wavelets* [M]. New York: Academic Press, 2002. 1~23
- Wang Junghua, Lin Lianda. Improved median filter using minmax algorithm for image processing[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(16): 1362~1363
- P J Burt, E H Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1983, **31**(4): 532~540
- Bai Junqi, Chen Qian. Algorithm for infrared image noise filtering based on anisotropic diffusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 866~869  
白俊奇,陈钱.基于各向异性扩散的红外图像噪声滤波算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 866~869
- Tubbs J D. A note on parametric image enhancement[J]. *Pattern Recognition*, 1997, **36**(6): 617~621
- Wang Gang, Xiao Liang, He Znzhi. 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
- Donoho D L, Johnstone I. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. *Biometrika*, 1994, **81**(3): 425~455
- Po D D-Y, Do M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform[J]. *IEEE Trans. on Image Proc.*, 2006, **15**(6): 1610~1620
- Azriel Rosenfield, Avinash C K. *Digital Picture Processing* [M]. New York: Academic Press, 1982. 154~167