

文章编号 1004-924X(2010)03-0748-08

应用图像纹理连续性的 $4f$ 系统图像 非下采样轮廓波变换域降噪

徐 鑫, 田逢春, 陈建军, 姬艳丽
(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

摘要: $4f$ 系统同时具有噪声和低通特性, 为实现对其输出图像降噪的同时保护图像细节, 提出一种结合图像纹理连续性的非下采样轮廓波变换域去噪方法。在传统 NSCT 域硬阈值去噪方法基础上, 首先, 对高频子带图像用一个衰减的阈值去除小幅值的噪声点, 以更多地保护图像细节并凸显剩下的大幅值噪声点的孤立性。然后, 利用图像细节纹理连续性分布和剩下的大幅值噪声点孤立分布的区别分离余下的图像细节和噪声点, 进一步实现去噪的同时更好地保护图像细节的目的。实验结果表明, 与传统方法相比, 该方法峰值信噪比 (PSNR) 提高了 0.5~1 dB, 结构相似度指数 (SSIM) 提高了 3%~5%, 因此能更好地保护图像细节, 视觉边缘效果更清晰。

关键词: 信息光学; 非下采样轮廓波变换; 图像去噪; $4f$ 系统

中图分类号: O438.2; TP391 **文献标识码:** A

$4f$ system image denoising in NSCT domain based on continuity of image texture

XU Xin, TIAN Feng-chun, CHEN Jian-jun, JI Yan-li

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: $4f$ system has the characters of noise and low-pass. In order to remove the image noise and to protect the image texture of its outputs, an image denoising method based on Nonsubsampled Contourlet Transform (NSCT) is proposed combined with the continuity of image texture. Based on the classic hard threshold denoise method in NSCT domain, it adopts a smaller threshold to remove the small amplitude noise to protect the image detail better and protrude the remanent big amplitude noise, then uses the continuity of image texture to remove the large amplitude isolated noise from the consecutive image detail in the high-frequency sub-band images. Eventually the noise is removed and the image detail is protected in the same time. Experiments show that the method can reach the same denoising and can better protect image details for that its Peak Signal Noise Ratio (PSNR) and Structure Similarity (SSIM) have been improved by 0.5~1 dB and 3%~5% respectively as compared with those of traditional methods.

Key words: information optics; Nonsubsampled Contourlet Transform (NSCT); image denoising; $4f$ system

收稿日期: 2009-05-20; 修订日期: 2009-08-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60472037); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20080430096)

1 引言

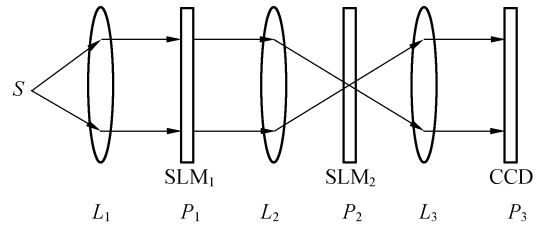
$4f$ 相干光图像处理系统用光来实现图像的空频域转换以及滤波处理,是最典型的傅里叶光学处理系统之一,被应用在很多场合,如 D. Mendlovic 和 N. Konforti 用它实现了图像光学小波变换;才德,严瑛白,金国藩等则将其用于虹膜识别领域中;本课题组则致力于双极性双正交小波变换的光学实现及其在图像压缩中的应用研究。但目前由于设备条件限制,其处理结果中往往有一定噪声,故去噪成为必须。从实验环境和仪器等硬件方面抑制噪声需要很高的成本和技术,相比下后期数字处理则被更广泛地采用。

$4f$ 系统处理过程中除附加噪声外,还有比其它光学图像系统更明显的低通特性,其输出图像已经有一定的细节损失,因此再对它去噪时对保护图像细节的要求高于一般场合^[1-3]。传统的小波及其发展出的脊波、曲线波、轮廓波(Contourlet)等变换域的阈值去噪是经典的后处理方法,它主要是从图像和噪声能量不同的角度来区分二者实现去噪,并不针对图像的纹理分布特性,其结果往往伴随一定的图像细节损失。为此,本文在传统轮廓波阈值去噪方法的基础上,提出一种结合考察图像纹理分布连续性的噪声抑制方法,先用一个衰减的阈值处理小幅值的噪声,保留更多的图像细节信息,再利用这些图像细节的连续分布不同于剩下的大幅值噪声的孤立分布的区别,通过孤立性判决进一步处理噪声,实现在去噪的同时更好地保护图像细节的目的。理论分析和实验实例都表明,该方法比传统阈值收缩方法能更好地保护图像细节,适合 $4f$ 系统类对保护图像信息有高要求的场合。

2 $4f$ 相干光图像处理系统

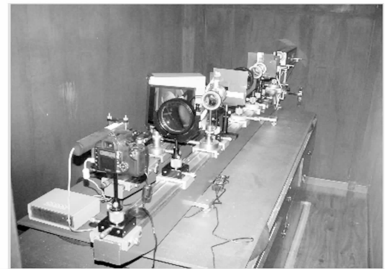
图 1(a)示意了典型的 $4f$ 系统,(b)是本课题小组的试验平台,由波长 633 nm 的 DH-HNKW250P 型 HE-NE 激光源、72 lp/mm 的 so-ny lcx029 液晶板空间光调制器(SLM)、焦距 400 mm 的 GCO-0203M 型消色差傅里叶变换透镜以

及佳能 EOS 350D CCD 相机等设备构成。它可以实现输入图像的空频变换,在面上加载需要的频域滤波器,即可以实现图像的频域滤波。这里暂不考虑滤波处理,先假设 SLM₂ 上加载全通滤波器。



(a) $4f$ 系统框图

(a) Diagram of $4f$ system



(b) $4f$ 系统平台

(b) Experimental platform of $4f$ system

图 1 $4f$ 系统

Fig. 1 $4f$ system

这类系统的噪声情况非常复杂,有复杂的噪声来源和种类,通常合起来看做高斯白噪声处理。另外与其它很多光学图像系统由 CCD 或 SLM 类的图像采集或显示器件决定系统带宽情况不同的是, $4f$ 系统还使用傅里叶透镜进行空频变换,而它只有在近轴条件下才有较准确的傅里叶变换性能,即它也是一个带限器件,这使得系统的输出图像往往是 SLM₁ 上的输入图像被傅里叶透镜低通滤波后的结果,已经有一定的低通损失,所以再对它处理时,需要格外注意保护图像细节。图 2 是我们系统的处理结果,(a)、(c)是标准 Lena 和 Boat,(b)、(d)是系统输出图像,在图中可以看到噪声和低通模糊情况。即是说, $4f$ 系统图像降噪就是在特别注重保护图像细节背景下的特殊处理。



(a) 输入 Lena 图像

(a) Input Lena



(b) 输出 Lena 图像

(b) Output Lena



(c) 输入 Boat 图像

(c) Input Boat



(d) 输出 Boat 图像

(d) Output Boat

图 2 4f 系统的输入输出图像

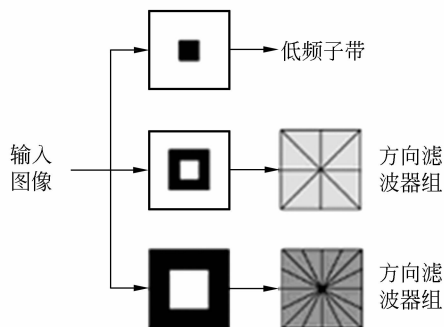
Fig. 2 Input and output images of 4f system

3 NSCT 变换

轮廓波变换 (Contourlet Transform, CT) 是近年来热门的多尺度几何分析方法之一^[4], 由 M. N. Do 和 Martin Vetterli 于 2002 年提出, 被称为“真正”的二维图像表示方法^[5]。它将多尺度分析和多方向分析分开进行, 首先用拉普拉斯金字塔 (LP) 变换对图像进行多尺度分解, 每变换一次相当于对整幅图像做低频带通滤波, 得到下一“粗”尺度的图像, 获得图像的“点”奇异性。然后用方向滤波器组 (DFB) 对子图像做方向分解, 每一个滤波器可以把该滤波器方向上的图像纹理集中到少数系数上, 获得“线”奇异性。最终实现对图像的多尺度、多方向分解, 其结果是用类似于线段 (Contour Segment) 的基来表示图像。如果用 ψ_j 表示 LP 变换中的等效带通滤波器, 用 φ_d 表示方向滤波器, 那么图像 x 的 CT 变换就可以写成:

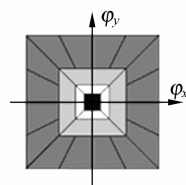
$$c_{j,d} = \langle \langle x, \psi_j \rangle, \varphi_d \rangle = \langle s_j, \varphi_d \rangle$$

第一步尺度分解由 $\langle x, \psi_j \rangle$ 完成, 得到带通子图像 s_j , 对每个 s_j 再用不同方向的 φ_d 进行方向分解, 就能得到 j 尺度下 d 方向上的子带图像 $c_{j,d}$, 图 3



(a) NSCT 变换流程

(a) Flowchart of NSCT transform



(b) NSCT 分解频域结构

(b) Structure of NSCT in frequency domain

图 3 NSCT 分解的频域示意图

Fig. 3 Illustration of NSCT decomposition in frequency domain

示意了这个过程,(a)是分步进行的示意图,(b)是整体示意图。

A. L. Cunha、J. P. Zhou 和 M. N. Do 等于 2006 年提出的非下采样轮廓波变换(NSCT)是 CT 变换的数字实现方式之一^[6],它的特点是用满足 Bozout 恒等式条件(即完全重构条件,指尺度分解时用的滤波器应满足逆运算能完全重构图像的条件)的移不变滤波器对图像做尺度分解来代替 LP 变换,节省了 LP 变换后的下采样环节,从而避开了低通滤波后的下采样会造成子图像的频谱混迭的现象,因此 NSCT 具有更好的频谱分割特性,在图像处理中被广泛的采用。

在图像去噪应用中,NSCT 域阈值去噪同经典的小波域阈值去噪原理相同:变换后的高频子带图像系数会集中在少数位置上,数值较大,而高斯白噪声噪声的系数仍然是散开的随机分布,数值较小,因此可以利用数值大小的区别来区分图像和噪声^[7],而且由于 NSCT 分解有更多的方向性,能更稀疏的分解图像和噪声,所以有比张量积小波变换更好的效果。传统的阈值去噪做法是:先对含噪图像 $f_n = f + n$ 做 NSCT 变换得到子带变换系数:

$$C = \text{NSCT}(f_n) = C_f + C_n, \quad (1)$$

f 是原图像, n 是噪声, C_f 和 C_n 分别是其变换系数。然后在各高频子带系数中进行阈值处理,通常有软阈值和硬阈值两种,为更好的保护图像细节,我们采用硬阈值处理:

$$C' = \begin{cases} C, & |C| \geq T \\ 0, & |C| < T \end{cases}, \quad (2)$$

常用的一种阈值是 Donoho 提出的 Visu shrink 阈值 $T = \sigma \sqrt{2 \log(m \times n)}$, m 和 n 是图像点数, σ 是噪声的标准差,用图像第一级小波分解斜向子块的绝对值中值除以 0.674 5 来估计。最后用阈值处理后的高频子带系数和保留的低频子带系数重建图像,可得到去噪图像。

传统方法是从幅值大小的角度来区分图像细节和噪声,阈值的选择是基于 MSE 原则的,认为该阈值下的处理能使去噪后图像达到最小均方误

差标准,这些考虑主要是从信号能量角度出发,并没有特别针对图像信号的几何“纹理”特性进行考虑,所以常常伴随一定的图像模糊。

4 NSCT 中利用纹理连续性去噪

纹理是图像的结构特征,在图像中占重要地位,不仅是人眼视觉系统最敏感的成分,也是很多机器图像处理的重要数据。在去噪中,我们总希望能在抑制噪声的同时尽可能的保护这些纹理特性,因此希望在处理中引入能表达纹理的数学概念或模型。图像纹理的重要特性有方向性,连续性等,方向性在 NSCT 变换中已有体现,连续性则是图像纹理显著而高斯白噪声不显著的性质,正可以用来区分二者。

根据(1)式,NSCT 变换后,高频子图像中包含图像边缘处的细节纹理和噪声两部分,图像细节主要以连续的线段形式出现,有较大的幅值。噪声信息则连续性差,数值随机。那么首先根据幅值的区别,可以舍弃小幅值的系数点,即去除噪声中幅值较小的部分,剩下大幅值连续的图像细节信息和孤立的大幅值噪声点。然后,再通过连续性来区分二者,从而实现更好的去噪的同时保护图像细节的目的:

含噪图像的 NSCT 分解:

$$C = \text{NSCT}(f_n) = C_f + C_n, \quad (3)$$

对各高频子图像取二值化模板 $B(i, j)$:

$$B(i, j) = \begin{cases} 1 & |C(i, j)| \geq T' \\ 0 & |C(i, j)| < T' \end{cases}, \quad (4)$$

其中 $T' = T/a$, a 是衰减因子。与(2)式 T 相比, T' 的意义在于 T 是 MSE 意义下的最优值,认为用它处理系数能一次达到最小均方差的目的,而我们希望从图像的纹理几何特性角度出发更多的保护图像细节,因此先选用一个衰减的阈值 T' 做初处理。这虽然少去除了一些噪声点,但却保留了更多的图像细节,并凸显了剩下的大幅值噪声点的孤立性,以便下一步处理。我们将要去除的

噪声分为大小各一半, a 取为 2。这样模板 $B(i, j)$ 中的 1 值点就是图像细节点和大幅值噪声的位置。

在模板 $B(i, j)$ 中, 利用图像的连续性和噪声的孤立性差异进行信噪分离。由于连续性和孤立性是对立的, 所以可以反过来考察各 1 值点的孤立性, 认为孤立的 1 值点是大幅值噪声, 非孤立的则是图像细节。要提取这类二值模板中的孤立点, 数学形态学中的击中击不中运算是非常适合的方法^[8-9], 我们将其引入这里。

数学形态学中用击中击不中运算(HMT)提取模板 $B(i, j)$ 中的孤立点定义为:

$$\text{HMT}_{\text{SE}}(B(i, j)) = [\text{SE}(i, j) \Theta B(i, j)] \cap [\text{SE}^c(i, j) \Theta B(i, j)], \quad (5)$$

它表示用结构元素 SE 和其补 SE^c 分别对 $B(i, j)$ 进行击中运算(即腐蚀运算 Θ)后再求二者的并, 当 SE 击中同时 SE^c 击不中 (i, j) 点时, 该点就是与 SE 相同的结构形式, (3) 式输出为 1, 否则输出为 0。当结构元素取为下式时, 该运算即可提取出 $B(i, j)$ 中的孤立 1 值点。

$$\text{SE} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \text{SE}^c = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

这样得到的中的 $\text{HMT}_{\text{SE}}(B(i, j))$ 1 值点就标识出了孤立的大幅值噪声点的位置, 在 $B(i, j)$ 相应的位置上将该点置零得到 $B'(i, j)$, 其中剩下的 1 值点则标识了连续的图像细节的位置, $B'(i, j)$ 既是最终去噪模板。

使用击中击不中运算的另一个好处在于其模板的灵活性, 如果需要, 可以将 SE 取为任意形式的模板, 比如在采集时可能由于 CCD 快门振动使图像有轻微的抖动痕迹, 图像中的点元素会变为短“线”的形式, 那么只要将 SE 取为抖动方向上的线段模式, 就可以同样应用了。

再用模板 $B'(i, j)$ 和低频系数矩阵 $C(i, j)$ 点乘, 最后逆 NSCT 变换得到去噪图像。

5 处理结果

用本文提出的方法, 对我们 $4f$ 系统输出图像(图 2(b)、(d))进行了去噪处理, 同时使用了非下采样小波变换(UWT)和 NSCT 阈值方法作为对比, 系统的输出图像大小为 616×616 , 都进行 4 级分解。UWT 方法采用 Bior4. 4 双正交小波, 它的计算量最小, 时间最短, 但其分解的方向子带数量只有横、竖、斜向三种, 稀疏程度不如另外两者; NSCT 方法采用文献[6]中使用的经典方案^[10-14], 两级粗尺度用 4 方向子带, 两级细尺度用 8 方向子带, 能够更加稀疏的将图像信息进行分解, 使得图像细节在分解系数域中有更好的能量集中性, 更加突出其与随机噪声的幅值差异, 利于信噪区分。

图 4 给出处理结果, (a)、(e) 是系统输出图像(NI), (b)、(f) 是本文方法结果(PM), (c)、(g) 是 NSCT 方法结果, (d)、(h) 是 UWT 方法结果。从视觉上, UWT 对噪声和细节都同时抑制, 结果图中细节模糊最严重, NSCT 由于有更多的方向分解, 所以对细节的保护更好, 而我们的方法在去噪的程度上与它们能达到同样程度, 而对细节纹理的保护则有明显的优势, 比如 Lena 的头发, 帽沿, Boat 的桅杆等处。

另外, $4f$ 系统的误差除了噪声外还有相干光源引起的干涉衍射及光照不均匀等问题, 这些因素会带来输出图像明暗不均等调制度变化情况, 即图 4 中的明暗亮度、对比度问题, 由于这个问题对观察着获取图像的纹理线条信息影响不大, 而且亮度对比度调整已有很多成熟方便的级数, 所以本文就不再累述了, 图 5 给出我们课题组在本文方法基础上再简单调整亮度和均匀度后的 Lena 图像, 仅供参考。

为进一步说明本文方法的特点, 除了常用的 PSNR 标准外, 我们还引入结构相似度(Structural Similarity, SSIM) 指数来考察, 它是 2004 年 Zhou Wang 等针对人眼视觉系统(HVS)特性提出的新评估标准^[15-16], 着重考察图像的“结构”, 其取值范围是 $0 \sim 1$, 越接近 1 说明待测图像越接近标准图像。表 1 给出了两种统计值。



(a) 输出 Lena 图像
(a) Output Lena



(b) 本文方法处理 Lena
(b) Lena processed by proposed method



(c) NSCT 方法处理 Lena
(c) Lena processed by NSCT



(d) UWT 方法处理 Lena
(d) Lena processed by UWT



(e) 输出 Boat 图像
(e) Output Boat



(f) 本文方法处理 Boat
(f) Boat processed by proposed method



(g) NSCT 方法处理 Boat
(g) Boat processed by NSCT



(h) UWT 方法处理 Boat
(h) Boat processed by UWT

图 4 $4f$ 系统图像去噪结果

Fig. 4 Denoised images of $4f$ system



图 5 调制度调整后结果

Fig. 5 Lena after modulation depth modified

表 1 各图 PSNR 和 SSIM

Tab. 1 PSNRs and SSIMs of images

		NI	PM	NSCT	UWT
Lena	PSBR/db	22.750 0	23.749 6	23.425 6	23.391 7
	SSIM	0.978 5	0.937 4	0.901 4	0.891 4
Boat	PSBR/db	21.169 3	22.376 7	21.952 0	21.884 7
	SSIM	0.831 8	0.908 7	0.860 59	0.841 5

可以看出,本文方法相比传统稀疏分解阈值处理方法效果更好,特别是在 SSIM 意义下提高

参考文献:

- [1] TIAN F CH, XU X, XUE F, *et al.*. The size limitation on input image of $4f$ system in applications of optical image data compression[C]. *Proceedings of International Conference on Sensing, Computing and Automation (ICSCA 2006)*, Waterloo, 2006: 2208-2211.
- [2] 韩亮, 田逢春, 徐鑫, 等. 光学 $4f$ 系统的图像空间频率特性[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(4): 426-431.
HAN L, TIAN F CH, XU X, *et al.*. Spatial frequency characteristics of optical $4f$ system [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(4): 426-431. (in Chinese)
- [3] 韩亮, 田逢春, 徐鑫. Mallat 算法的光学实现[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(8): 1490-1499.
HAN L, TIAN F CH, XU X. Optical implementation of Mallat algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1490-1499. (in Chinese)
- [4] 焦李成, 侯彪, 王爽, 等. 何分析理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 280-284.
JIAO L CH, HOU B, WANG SH, *et al.*. *Image*

明显,在去噪的同时对图像的细节结构有很好的保护。

6 结 论

由于 $4f$ 系统的特殊情况,在处理其输出图像时需格外注意保护图像细节。本文提出了一种在 NSCT 域内利用图像纹理连续性去噪的方法。先用一个衰减的阈值去除小幅值的噪声,以更多的保留图像细节,同时凸显大幅值噪声的孤立性;然后,在余下的系数点中利用图像细节纹理的连续性和大幅值噪声系数的孤立性来区分二者,进一步实现去噪。

与传统方法从能量角度出发希望一步阈值处理达到最小均方差目的相比,本文方法的特点在于既从幅值角度考虑了图像细节和噪声的差异,又从图像细节的几何纹理特性角度对信噪加以考察,因此能在去噪的同时更好地保护图像细节,其 PSNR 比传统的 NSCT 阈值去噪方法提高 0.5~1 dB, SSIM 提高了 3%~5%,可以说它更适合于 $4f$ 类低通系统需要格外保护图像细节的场合。

Multiscale Analysis: Theory and Applications Beyond Wavelets [M]. Xi An: Xidian University Press, 2008: 280-284. (in Chinese)

- [5] DO M N, VETTERLI M. *Contourlets*. In *Beyond Wavelets* [M]. New York: Academic Press, 2003. 125-134.
- [6] CUNHA A L, ZHOU J P, DO M D. The nonsub-sampled contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [7] XU Y S, JOHN B, WEAVER. Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994, 3(6): 747-758.
- [8] PIERRE, SOILLE. *Morphological Image Analysis: Principles and Applications* [M]. New York: Springer-Verlag and Tsinghua University Press, 2008: 103-105
- [9] 同武勤, 凌永顺, 黄超超. 数学形态学和小波变换的红外图像处理方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1): 138-144.
TONG W Q, LING Y SH, HUANG CH CH. Processing method of IR image based on mathematical

morphology and wavelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(1):138-144. (in Chinese)

- [10] 贾建,焦李成,项海林. 基于双变量阈值的非下采样 Contourlet 变换图像去噪[J]. 电子与信息学报, 2009,31(3):532-536.
JIA J, JIAO L CH, XIANG H L. Using bivariate threshold function for image denoising in NSCT domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009,31(3):532-536. (in Chinese)
- [11] 贾建,焦李成. 利用方向特性实现非下采样 Contourlet 变换阈值去噪[J]. 西安电子科技大学学报, 2009,36(2):269-273.
JIA J, JIAO L CH. Image denoising using the directional property in the NSCT domain[J]. *Journal of Xidian University*, 2009,36(2):269-273. (in Chinese)
- [12] 贾建,焦李成,魏玲. 基于概率模型的非下采样 Contourlet 变换图像去噪[J]. 西北大学学报(自然科学版),2009,39(1):13-18.
JIA J, JIAO L CH, WEI L. Image denoising in NSCT domain based on probability model[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2009,39(1):13-18. (in Chinese)

- [13] 边策,钟桦,焦李成. 基于非下采样 Contourlet 变换和双变量模型的图像去噪[J]. 电子与信息学报,2009,31(3):561-565.
BIAN C, ZHONG H, JIAO L CH. Image denoising based on nonsubsamped contourlet transform and bivariate model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009,31(3):561-565. (in Chinese)
- [14] 陈志刚,尹福昌. 基于 Contourlet 变换的遥感图像增强算法[J]. 光学精密工程, 2008,16(10):2030-2037.
CHEN ZH G, YIN F CH. Enhancement of remote sensing image based on contourlet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):2030-2037. (in Chinese)
- [15] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R. Image quality assessment; from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2004,13(4):600-612.
- [16] 周景超,戴汝为,肖柏华. 图像质量评价研究综述[J]. 计算机科学,2008,35(7):1-5.
ZHOU J CH, DAI R W, XIAO B H. Overview of image quality assessment research[J]. *Computer Science*, 2008,35(7):1-5. (in Chinese)

作者简介:



徐鑫(1980—),男,重庆人,博士研究生,主要研究方向为信息光学、图像处理等。E-mail:fox_foxy@sohu.com



姬艳丽(1982—),女,河南人,博士研究生,主要从事图像处理、压缩编码方面的研究。E-mail:jyl@ccee.cqu.edu.cn



陈建军(1978—),男,重庆人,博士研究生,讲师,主要从事图像信息处理、小波分析方面的研究。E-mail:cjj@ccee.cqu.edu.cn



田逢春(1963—),男,重庆人,博士生导师,教授,主要从事图像信息处理、小波分析方面的研究。E-mail:tfc@ccee.cqu.edu.cn

导师简介: