

复眼图像超分辨率重构的噪声分析与消除

刘世瑛, 胡江涛, 黄 峰, 张 维, 刘秉琦

(军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘要: 分析了复眼图像超分辨率重构结果图像中噪声来源及主要表现形式, 为优化重构结果, 提出一种基于 Wiener-Butterworth (W-B) 滤波器的重构噪声消除方法。通过叠加不同数量高斯噪声的低分辨率图像重构实验, 研究了该滤波器对算法引入噪声和原始图像噪声的滤除效果, 并在频域对实验结果作了相关分析; 验证实验验证了该滤波器在噪声类型和大小均未确定时改善图像质量的有效性。实验结果表明: 针对算法引入噪声, 该滤波器使重构结果的 PSNR 提高 4 dB; 当施加均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声时, 滤波后重构结果 PSNR 提高 6.9 dB。W-B 滤波器能有效消除复眼超分辨率重构图像中的噪声和方块效应、振铃效应和梳边效应, 改善重构图像质量。

关键词: 复眼超分辨率重构; 重构噪声; W-B 滤波器

中图分类号: HN911.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2015)09-0746-05

Analysis and Filtering of Noise for Compound Eye Super Resolution Reconstruction

LIU Shi-ying, HU Jiang-tao, HUANG Feng, ZHANG Chu, LIU Bing-qi

(Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The sources and manifestation of noise in result of the compound eye super resolution reconstruction are analyzed. In order to optimize the results of the reconstruction, a filtering method based on the wiener-Butterworth filter is proposed to eliminate the impact of noise in the processing of reconstruction. The performance of the wiener-Butterworth filter for eliminating the introduction noise of algorithm and the original noise is analyzed through the simulation, and the result of reconstruction is analyzed in frequency domain. The wiener-Butterworth filter can improve the quality of the reconstruction distinctly when the type and number of noise can not be determined. The result shows that the wiener-Butterworth filter increases the PSNR of the reconstruction 4 dB when the low resolution images with no noise and increases the PSNR of the reconstruction 6.9 dB when the low resolution images with Gaussian noise with the mean is 0 and the variance is 0.01. The Wiener-Butterworth filter can eliminate the blocks effect, comb effect and ringing effect of the reconstruction effectively and improve the quality of the reconstruction.

Key words: compound eye super resolution reconstruction, reconstruction noise, W-B filter, filtering method

0 引言

高分辨率图像包含更多的图像细节, 为图像分析等提供更加准确的信息, 因此在遥感、定位、监控、医学等领域有广泛的应用前景。现阶段, 受到应用环境和制造工艺的限制, 通过增大光学镜头尺寸或成像器件像元密度来获取高分辨率图像的方法, 已不满足系统小型化的要求。仿生复眼以其体积小、质量轻、视场大、分辨率高等特点, 为解决这一问题提供了新

的思路^[1-2]。其中基于超分辨率图像重构的平面复眼成像系统是复眼成像系统的研究热点之一, 典型如 Vikrant R 等人提出的 TOMBO 成像系统^[3]和 M. P. Christensen 研究小组的 PANOPTES 系统^[4], W. S. Chan 等对复眼图像超分辨率重构技术也有较为深入的研究^[5]。

噪声是影响数字图像质量的重要因素, 对重构结果有较大影响。陈博洋等^[6]从消除噪声的角度, 研究了多种单一滤波器对改善图像质量的效果; 聂笃宪等^[7]

收稿日期: 2015-03-26; 修订日期: 2015-05-25.

作者简介: 刘世瑛 (1991-), 男, 硕士, 研究方向: 光电系统设计与应用。

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目, 编号: F2014506004

从超分辨率重构算法的角度，将改善图像质量的算法加入到重构迭代的每一步，进而获取更好的视觉效果；浦利等针对振铃效应将后小波去噪处理加入到重构算法中，处理后图像峰值信噪比提高 0.4 dB^[8]。

本文在基于超分辨率图像重构的复眼成像系统研究的基础上，首先分析了重构结果中噪声的组成部分及主要表现形式，然后分析了维纳-巴特沃斯（Wiener-Butterworth, W-B）滤波器消除重构噪声、改善重构效果的基本原理，最后通过仿真实验研究该滤波器对算法引入噪声和原始图像噪声的滤除效果，并通过验证实验验证该滤波器在噪声类型和大小均未确定的情况下消除重构噪声的有效性。

1 超分辨率重构复眼成像系统

基于复眼图像的超分辨率重构是将复眼结构与超分辨率重构技术相结合，如图 1 所示为 SRR 复眼成像系统原理。过程为：首先，复眼成像系统对同一目标物体成像获取多幅低分辨率图像，然后通过超分辨率重构算法估计低分辨率图像间的亚像素位移，最后将亚像素位移信息融合到一幅图像中而获得高分辨率图像。一方面，基于超分辨率重构的复眼成像系统可以使用小面阵 CCD/CMOS 代替大面阵 CCD/CMOS，减少成本；另一方面可以使用小孔径光学镜头或微透镜阵列代替大孔径光学镜头，使系统小型化，因此复眼超分辨率重构技术在诸多领域有广阔的应用前景。

2 复眼 SRR 重构噪声分析

由经典成像模型可知，低分辨率图像序列可以表述为：

$$g = Bf + n \quad (1)$$

式中： g 为低分辨率图像； f 为高分辨率图像； n 为噪声； B 为除噪声外的降质矩阵。理论上高分辨率图像的估计为：

$$f = B^{-1}(g - n) \quad (2)$$

采用 POCS 法迭代过程中一般要根据噪声特性对迭代余量进行定义，定义余量 r 为：

$$R = g - Hf \quad (3)$$

式中： H 为降质矩阵估计。

通过迭代获得的高分辨率图像为：

$$f = H^{-1}(g - r) \quad (4)$$

则迭代后的误差为：

$$\|f - f\| = \|H^{-1}(g - n) - B^{-1}(g - r)\| \quad (5)$$

整理后：

$$\|f - f\| \leq \|(H^{-1} - B^{-1})g - H^{-1}n + B^{-1}r\| \quad (6)$$

可见图像的噪声来源包含 2 部分：一部分来自图像估计过程中的余量，定义为算法引入噪声；另一部分是原始图像噪声的放大，定义为原始图像噪声。在超分辨率重构过程中，余量估计越大，实际测量得到的噪声越大，即图像质量越差^[9]；超分辨率重构图像中噪声主要表现为方块效应、梳边效应和振铃效应，严重影响图像质量^[10]。

3 W-B 滤波器分析

高斯噪声是数字图像获取过程中最常见的噪声，电子电路噪声、低照度度或者高温带来的传感器噪声都是高斯噪声。Wiener 滤波器是一种针对高斯噪声的滤波器，其基本原理是：首先假定噪声类型为高斯噪声，然后通过计算局部方差来消除高斯噪声的影响，且 Wiener 滤波器具有一定的平滑效果，因此对方块效应具有一定消除作用。

Butterworth 滤波器又称为最大平坦滤波器，这种滤波器的通带和阻带之间没有明显的锐截止，因此它的空间响应没有振铃现象发生，并减少模糊和改善图像细节清晰度。其传递函数为：

$$H(u, v) = 1 / (1 + [D(u, v) / D_0]^{2n}) \quad (7)$$

式中： D_0 为截止频率； n 为滤波器的阶数。控制滤波器的衰减速度。相对于通带和阻带之间有明显的锐截止的滤波器，Butterworth 滤波器保留相对多的高频信息，因此能更好的消除振铃效应和梳边效应。

因此，理论上 W-B 滤波器能有效消除高斯噪声且保留更多的图像细节，消除重构图像中的方块效应、振铃效应和梳边效应，改善重构图像质量。

4 实验与结果分析

图 2 所示为基于 SRR 的复眼成像系统实验样机和重构结果。图 2(a) 为于 SRR 的复眼成像系统的实验样机，在其设计研究过程中发现，重构结果图像中，图 2(b) 中大量图像细节被噪声淹没，严重影响图像质



(a) target object (b) compound eye imaging system (c) low resolution iamgs (d) low resolution iamgs (e) result of reconstruction

图 1 SRR 复眼成像系统原理

Fig.1 Compound eye imaging system based on SRR

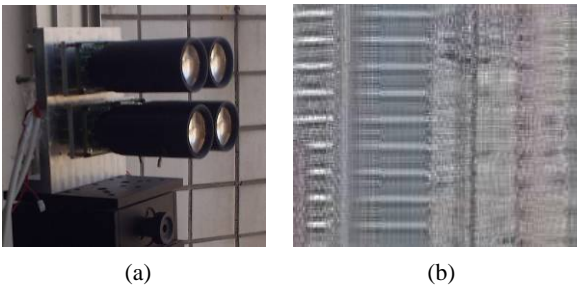


图2 基于SRR的复眼成像系统实验样机和重构结果

Fig.2 The experimental prototype of compound eye imaging system based on SRR and the result of reconstruction

量和视觉效果,为消除噪声,改善重构结果图像质量,提高系统性能,设计该实验研究 W-B 滤波器消除算法引入噪声和原始图像噪声的有效性。

4.1 仿真实验

表1为不同滤波器的滤波数据,图3所示为不同滤波器的滤波结果。仿真实验采用512×512的Lena图像,通过下采样产生16幅128×128的低分辨率图像序列集,为研究W-B滤波器对于重构算法引入噪

声和原始图像噪声的抑制作用,设计了两部分仿真实验:对低分辨率图像不施加噪声和对低分辨率图像中施加均值为0、方差为0.01的Gaussian噪声。通过计算得到:当未施加任何噪声时采用5×5的维纳滤波器结合 $n=5$,截止频率为0.34时滤波效果最佳;在施加均值为0、方差为0.01的Gaussian白噪声时采用4×5的维纳滤波器结合 $n=3$,截止频率为0.31时滤波效果最佳。为更加直观地反映实验结果,文中截取实验结果的相同部分作对比。

为客观地评价重构滤波前后图像质量,采用信噪比(SNR)、峰值信噪比(PSNR)、均方根误差(RMSE)对重构图像进行数值评价。

分析图表可知,当低分辨率图像不包含噪声时,W-B滤波器使重构结果的PSNR提高4dB,相对于单独使用Wiener滤波器提高1.25dB,相对于Butterworth滤波器提高0.178dB;均方根误差提高4.9,相对于Wiener滤波器提高0.8,相对于Butterworth滤波器提高1.12;可知W-B滤波器能有效滤除算法引入噪声。

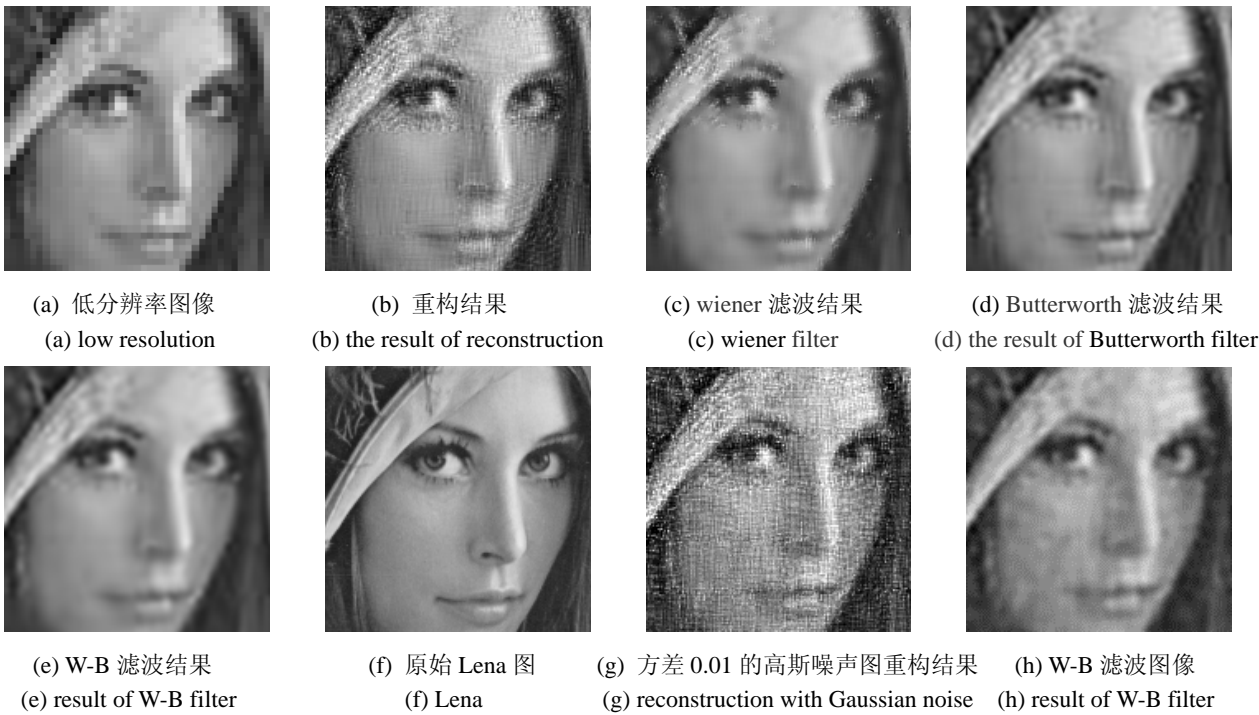


图3 不同滤波器的滤波结果

Fig.3 Images with different filters

表1 不同滤波器的滤波结果

Table 1 result with different filter

	Reconstruction	Wiener	Butterworth	W-B
SNR	19.2269	21.6068	22.6749	22.8523
SNR with noise	14.2112	19.0648	20.4247	21.0943
PSNR	24.5017	27.2440	28.3121	28.4895
PSNR with noise	19.8561	24.7097	26.0696	26.7392
RMSE	17.6747	13.9674	13.1100	12.7596
RMSE with noise	28.1365	17.5110	16.3360	15.0061

当低分辨率图像中包含均值为0、方差为0.01的 Gaussian 噪声时, W-B 滤波器使重构结果的 PSNR 提高 6.9 dB, 相对于 Wiener 滤波器提高 2 dB, 相对于 Butterworth 滤波器提高 0.67 dB。均方根误差相对于重构结果提高 13, 相对于 Wiener 滤波器提高 2.5, 相对于 Butterworth 滤波器提高 0.65; 可知 W-B 滤波器能有效滤除原始图像噪声。

在视觉效果上, W-B 滤波器比 Wiener 滤波器能更好地消除方块效应和梳边效应; 尽管相对于 Butterworth 滤波器 W-B 滤波器滤波后图像的 PSNR 提高较少, 但能更好地消除振铃现象和梳边效应, 改善图像质量明显。

4.2 验证实验

在复眼超分辨率重构过程中, 噪声模型的建立和噪声大小的确定比较困难, 在这种情况下从噪声角度分析重构结果就比较困难。但是, 此时噪声的主要表现形式依然是方块效应、梳边效应和振铃效应, 为验证该滤波器在噪声类型及大小均未确定情况下的有效性, 设计了该验证实验, 对比研究了 Wiener 滤波器和 W-B 滤波器对重构效果的改善情况。

从图4三组图中可以明显地看出原始低分辨图像中图像细节少, 层次感较差; 重构后图像细节明显增加, 但被噪声淹没, 方块效应和梳边效应明显, 图像细节模糊; 通过 Wiener 滤波器图像效果改善不明显; W-B 滤波器滤波后方块效应和梳边效应明显减轻, 图像细节清晰, 图像最右侧楼层能够区分。可见在图像

噪声类型与噪声大小均为确定的情况下, W-B 滤波器也能较大程度地改善图像的质量。

4.3 实验结果分析

结合图像的频谱图, 在频域内分析滤波效果。在图像的频谱图像中, 图像细节对应频谱图中的高频分量, 图像平坦区域对应频谱图的低频分量。

当低分辨率图像中不包含噪声时, 对比图5(a)和图5(b)可知复眼超分辨率重构在恢复原始图像信息时, 也引入了大量的高频噪声, 主要表现为振铃效应、锯齿效应和方块效应; 对比图5(b)和图5(c)可知, 经过 Wiener 滤波器滤波后频谱更加接近原始图像, 但其中的高频成分依然大量存在, 主要原因是图像细节边缘依然存在大量方块效应。对比图5(a)、(b)和(d)可知 W-B 滤波器滤除了大部分的高频信息, 只保留低频信息和部分高频信息, 但总体上看, W-B 滤波器滤波后频谱更加接近原始图像, 因此图3(e)相对于图3(c) PSNR 提高 1.25 dB, 振铃和锯齿效应明显减轻, 视觉效果更好。

当低分辨率图像中包含均值为0、方差为0.01的 Gaussian 噪声时, 对比图5(b)和图5(e)可知高斯噪声的存在使重构结果中高频成分更加分散, 主要表现为方块效应更加明显; 对比图5(a)、图5(e)和(f)可知 W-B 滤波器滤除了大部分的高频信息, 只保留低频信息和部分高频信息, 消除了大部分噪声, 因此图3(g)相对于图3(h)方块效应明显减轻, 视觉效果更好。

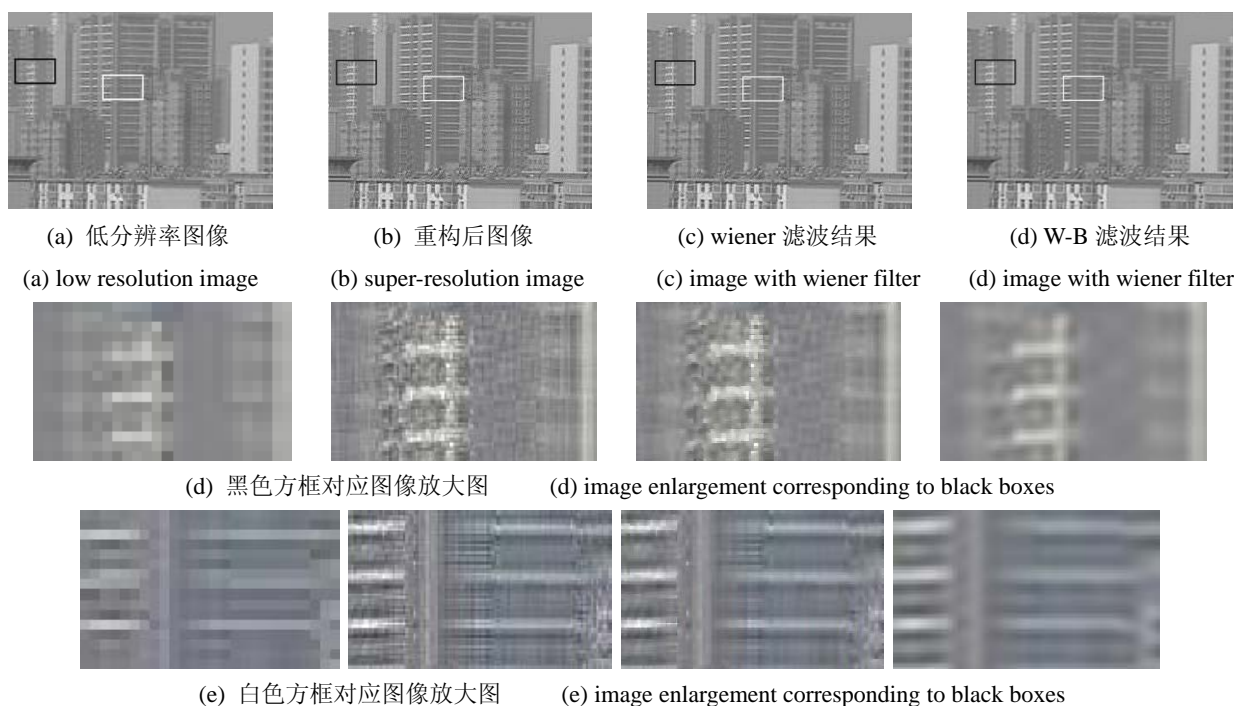
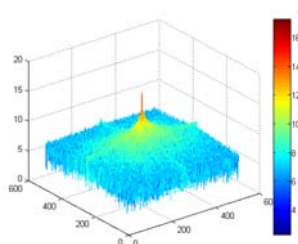


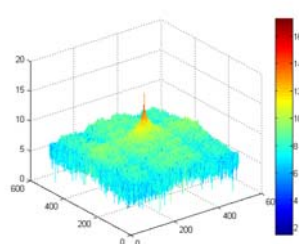
图4 噪声类型和大小均未确定下的滤波效果对比

Fig.4 Filtering results when the type and number of noise can not be determined



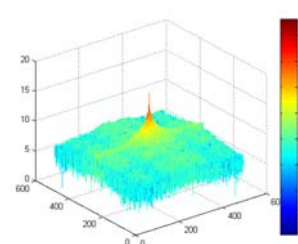
(a) Lena 频谱图

(a) frequency spectrum of Lena



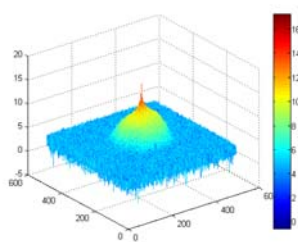
(b) 重构后频谱图

(b) frequency spectrum after reconstruction



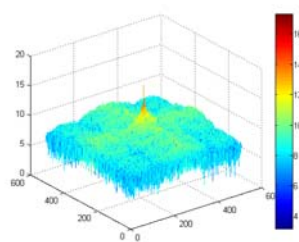
(c) Wiener 滤波后频谱图

(c) frequency spectrum with Wiener filter



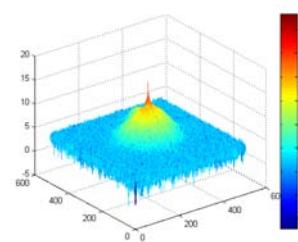
(d) W-B 滤波后频谱图

(d) frequency spectrum with W-B filter



(e) 加入高斯噪声的重构结果频谱图

(e) frequency spectrum with Gaussian noise



(f) W-B 滤波高斯噪声重构结果频谱图

(f) frequency spectrum with W-B filter with Gaussian noise

图5 不同情况下的频谱图

Fig.5 Frequency spectrum in different case

5 结论

本文针对复眼图像超分辨率重构噪声,提出了一种基于 W-B 滤波器的滤波方法。该滤波器能有效消除算法引入噪声和原始图像噪声,在均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声时,滤波后重构结果 PSNR 提高 6.9dB,且在图像噪声类型及大小均未确定的情况下,也能够较大幅度地改善重构图像质量;相对于 Wiener 滤波器能够更有效地消除方块效应和梳边效应,相对于 Butterworth 滤波器能更好的消除振铃现象,仿真实验和验证实验均验证了该结论的正确性。该实验结果对改善复眼图像 SRR 图像质量有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈健, 高慧斌, 王伟国. 超分辨率复原方法相关原理研究[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 897-910.
Chen Jian, Gao Hui-bin, Wang Wei-guo. Correlation theory of super resolution method[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 897-910.
- [2] 应莉莉, 安博文, 薛冰珍. 亚像元图像超分辨率重建研究[J]. 红外技术, 2013, 35(5): 274-278.
Ying Li-li, An Bo-wen, Xue Bing-fen. Research on super resolution reconstruction of sub-pixel images[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(5), 274-278.
- [3] Vikrant R Bhakta, Manjunath Somayaji, Scott C Douglas, et al. Experimentally validated computational imaging with adaptive multiaperture folded architecture[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10): B51-B58.
- [4] Esmail Faramarzi, Vikrant R. Bhakta, Dinesh Rajan, et al. Super resolution results in PANOPTES, and adaptive multi-aperture folded

architecture[C]//*IEEE 17th International Conference on Image Processing*, 2010: 2833-2836.

- [5] Wai-San Chan, Michael K. Ng, Edmund Y. Lam. Investigation of computational compound-eye imaging system with super-resolution reconstruction[C]//*Department of Electrical and Electronic Engineering*, 2006: 1177-1180.
- [6] 陈博洋, 郭强, 陈桂林, 等. 超分辨率图像重建引起的噪声放大与滤波[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(1): 15-20.
Chen Bo-yang, Guo Qiang, Chen Gui-ling, et al. Amplificatory noise raised by super resolution reconstruction and filter[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(1): 15-20.
- [7] 聂笃宪, 陈一梅, 陈鹤峰. 去混合噪声的超分辨率图像重建算法[J]. 红外技术, 2010, 30(10): 605-607.
Nie Du-xian, Chen Yi-mei, CHENG He-feng. Super-resolution Image Reconstruction Algorithm for mixed Noises Removal. *Infrared Technolohg*, 2010, 30(10): 605-607.
- [8] 浦利, 金伟其, 刘玉树. 基于后小波处理的超分辨率图像复原算法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 173-176.
Pu Li, Jin Wei-qi, LIU Yu-shu. Super-resolution algorithm based on posrwavelet treatment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 173-176.
- [9] Sally L Wood, Lee Shu-Ting, Yang Gao, et al. Impact of measurement precision and noise on super resolution image reconstruction[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(1): B128-B135.
- [10] 张地, 彭宏. 超分辨率重构图像的噪声分析与消除[J]. 韶关学院学报, 2006, 27(12): 31-34.
Zhang Di, Peng Hong. Noise analysis and reduction in the super-resolved image[J]. *Journal of Shaoguang University*, 2006, 27(12): 31-34.