

一种基于 WBCT 的自然图像质量评价方法

路 文, 高新波, 王体胜

(西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 部分参考型图像质量评价的性能依赖于图像的特征提取和稀疏表示. WBCT(Wavelet based Contourlet Transform)是一种无冗余度的图像稀疏表示方法,能有效地反映图像的视觉感知特性,可以用来捕捉由于图像失真而引起的视觉感知的变化.为此,结合部分参考型图像质量评价模型和WBCT,提出了一种自然图像质量客观评价方法.实验结果表明,利用该方法所得到的图像质量客观评价结果与主观评价结果之间具有很好的一致性,能准确地反映人眼对图像质量的主观感受.

关键词: 图像质量评价; 部分参考型; 视觉感知; WBCT

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)02-0303-06

A Natural Image Quality Assessment Metric Based on Wavelet-based Contourlet Transform

LU Wen, GAO Xir bo, WANG Tr sheng

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The performance of reduced reference (RR) image quality assessment depends on the feature extraction and sparse representation of the image. Wavelet based contourlet transform (WBCT), a non redundant sparse representation of image, can effectively reflect visual characteristics of the image, such that it is often used to capture the variation of visual perception to result from image distortion. Hereby, an objective image quality assessment metric is proposed by combining the WBCT with RR model. Experimental results illustrate that the proposed method has a good consistency with the subjective assessment of human beings, thus can be used to describe the visual perception of the image effectively.

Key words: image quality assessment; reduced reference model; visual perception; wavelet-based contourlet transform (WBCT)

1 引言

在图像压缩、通信、存储、增强以及图像水印等应用中都会涉及到图像质量的评价问题,其评价指标可以作为一种准则或测度用来校准处理系统,或用于算法优化及参数优选.因此,图像质量的客观评价^[1]越来越受到人们的关注.

根据对原始图像的参考程度,图像质量客观评价方法可分为三种:全参考型(FR, Full Reference)^[2,3]、部分参考型(RR, Reduced Reference)^[4]和无参考型(NR, No Reference)^[5].一般来说,全参考型方法是三种方法中最准确的,但它要求有完整的原始图像作为参考,这在很多实际应用中都是难以达到的.无参考型方法无需原始图像作为参考,完全依赖于对人类视觉感知系统的认识程度,目前还处于研究的初级阶段.现有的无参考型

方法主要用来评价图像的模糊、分块效应和振铃效应等已知模型的退化,所以适用范围比较窄.部分参考型方法^[6,7]是一种介于全参考型和无参考型之间的图像质量评价方法.该方法只利用参考图像的部分信息来估计失真图像的视觉感知质量,需要传输或存储的数据量小且具有较高的可靠性,因而成为该领域的研究热点^[8].

近年来,人们开始利用已知的一些人类视觉系统(HVS, Human Visual System)的特性来研究图像质量评价的新方法,但这些方法相对于峰值信噪比(PSNR, Peak Signal to Noise Ratio)的评价性能并没有显著的改善. Zhou Wang 等认为:人眼的主要作用是为了提取视场中的结构信息,而且人类视觉系统也非常适用于这一目的.据此提出了基于结构相似度(SSIM, Structural Similarity)的全参考型图像质量评价方法^[2,3],实验结果表明该方法与主观评价具有很好的相关性.进而,在文献[4]中

收稿日期: 2007-07-10; 修回日期: 2007-10-19

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(No. NCEF040948); 教育部长江学者和创新团队支持计划(No. IRT0645); 国家自然科学基金(No. 60771068, No. 60702061)

©1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

又利用小波变换提出了一种基于统计模型的部分参考型图像质量评价方法 (RR-WISM, Reduced Reference Image Quality Assessment Using a Wavelet-domain Natural Image Statistic Model). 该方法针对自然图像的小波子带系数满足广义高斯分布的特性, 用失真图像的小波子带系数来逼近^[9]该分布, 然后根据拟合误差对失真图像质量进行估计, 取得了良好的评价结果.

部分参考型图像质量评价方法的实质是统计失真图像相对参考图像的某种或某些特征信息的变化. 所以, 如何有效的提取和统计图像的特征信息成为对图像质量评价的关键. WBCT (Wavelet-based Contourlet Transform)^[10]是一种用于稀疏表示高维空间中曲线或曲面奇异性的多方向多分辨率变换, 它可以有效地表示轮廓和纹理丰富的图像, 能充分利用图像本身特有的几何特征, 形成最稀疏的图像表示, 很好的反映图像的视觉特性.

鉴于此, 本文基于 WBCT 提出了一种统计图像特征信息变化的部分参考型图像质量评价方法, 该方法首先对参考图像和失真图像分别进行 WBCT 分解, 然后根据人类视觉感知特性比较参考图像与失真图像之间对应特征信息的变化程度, 从而得到一种能有效评价失真图像质量的部分参考型方法.

2 WBCT 分解

2002 年, Minh. N. Do 和 Martin Vetterli 提出了一种有效的图像稀疏表示方法: Contourlet 变换^[11], 也称塔形方向滤波器组 (PDFB, Pyramidal Directional Filter Bank). 这是一种多分辨率局部图像表示方法, 具有良好的方向感知性. 它将尺度分析和方向分析分别进行, 首先由 LP (Laplacian Pyramid) 变换对图像进行多尺度分解以“捕获”点奇异, 然后由完全重构方向滤波器组 (DFB, Directional Filter Bank)^[12]将分布在同方向上的奇异点进行合并. 其最终结果就是用类似于线段 (Contour segment) 的基结构来逼近原图像. 尽管 Contourlet 变换是一种有效的图像稀疏表示方法, 但第一阶段的 LP 变换中存在 4/3 的冗余度. 因此并不是一种理想的图像稀疏表示方法. 2004 年, Ramin Eslami 和 Hayder Radha 提出了一种新的无冗余的图像稀疏表示方法——基于小波分析的 Contourlet 变换 (WBCT)^[10].

WBCT 具有类似于 Contourlet 变换的迭代结构: 首先由小波实现对图像的多尺度分解, 然后对小波分解得到的每个高频子带应用 DFB 进行进一步的方向分解. 由于小波和 DFB 都是非冗余完全重构的变换, 所以 WBCT 也是一种非冗余完全重构的变换. 与 Contourlet 变

换相比, WBCT 可以进一步挖掘图像的方向纹理特征, 更加有效地反映图像的视觉特性.

3 基于 WBCT 分解的部分参考型图像质量评价方法

为了设计一种有效的图像质量评价方法, 本节利用 WBCT 对图像进行子带分解, 然后统计各子带内视觉感知系数的变化情况, 以此实现图像质量的合理评价. 在发送端, 首先对参考图像进行 WBCT 分解, 将参考图像分解成不同尺度和方向子带. 其次, 为了使不同尺度上的系数对于人类感知具有相同的意义, 对各个子带按其所在尺度进行对比敏感度 (CSF, Contrast Sensitivity Function) 掩模. 然后根据人眼视觉感知特性^[13], 确定合理的感知阈值, 分别统计视觉感知系数在各子带中所占的比重. 在接收端, 对失真图像进行同样的处理. 最后比较参考图像和失真图像的特征信息, 综合得到图像质量的客观评价. 如图 1 所示.

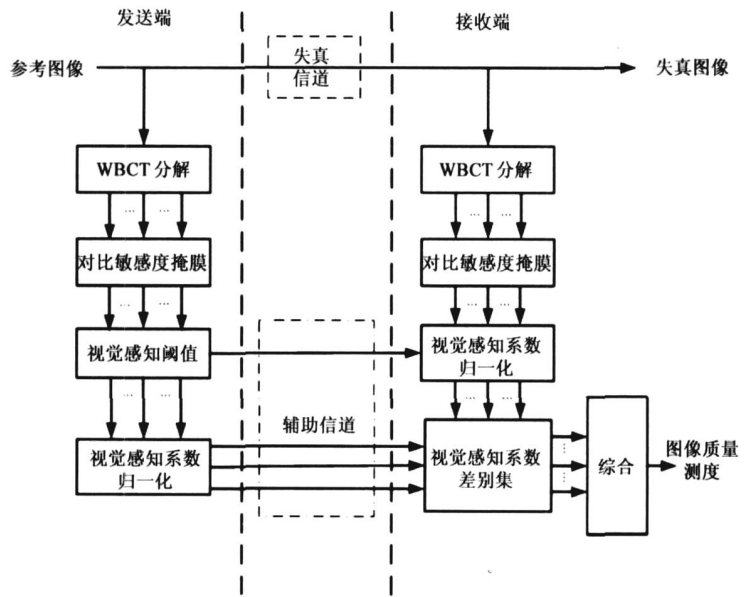


图 1 基于 WBCT 分解的图像质量评价系统模型

3.1 WBCT 分解

图像的 WBCT 分解采用两层小波分解和三级 DFB 分解相结合的方法. 小波变换采用 Daubechies“db1”滤波器. DFB 分解采用 McClellan 变换“9-7”滤波器. 这样, 由细到粗各个尺度上方向子带数均为 24. 为减小所要传

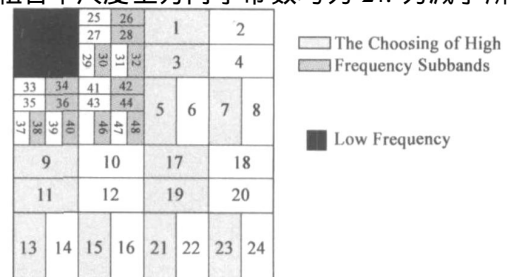


图 2 图像经 WBCT 分解后空域分解和子带选取的示意图

输的信息量, 根据 DFB 分解的性质, 如图 2 所示只在高频子带上选取一半的方向子带(即图 2 中灰色的子带)进行分析。

3.2 对比敏感度掩模

WBCT 将图像分解为不同的子带, 而人眼对不同空间频率信号的感知程度是不同的。为使不同尺度上的系数对于视觉感知具有相同的意义, 需要对不同子带的系数进行归一化加权。鉴于对比敏感度遮蔽效应可以使人眼对不同的频率具有相同的可视敏感度^[14], 本节利用对比敏感度掩模对 WBCT 分解后的图像子带进行可视敏感度归一化。

在文献[15, 16]中, Mannos 和 Sakrison 提出了 CSF 模型。其数学表达式为

$$H(f) = 2.6(0.192 + 0.114f)e^{f - (0.114f)^{11}} \quad (1)$$

其中 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$, 单位为 cycles/degree。 f_x 和 f_y 分别为水平和垂直方向的空间频率。由图像的采样频率 f_s 和归一化频率 f_n 可求得信号的实际频率 $f = f_n \cdot f_s$ 。由下式求得^[17]:

$$f_s = \frac{2v \cdot \tan(0.5^\circ) \cdot r}{0.0254} \quad (2)$$

其中, v 为观测距离, 单位为米, 这里取显示器高度的 2 - 2.5 倍(文中取 0.8 米), r 为显示器的分辨率, 单位为像素/英寸。这里显示器的尺寸为 21 英寸, 分辨率为 1024×768 , 则有 $r = \sqrt{1024^2 + 768^2} / 21 = 61$ 像素/英寸。

3.3 视觉感知阈值

由上述分析可知, 通过对各子带系数的对比敏感度掩模可以使不同方向子带系数具有相同的视觉感知意义。而人类视觉系统只对方向子带内幅值较大的系数敏感。据此式(3)定义了一个视觉感知阈值 T , 将大于该阈值的子带系数定义为视觉感知系数。

$$T = \frac{\alpha}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2} \quad (3)$$

其中, $x_{i,j}$ 为最精细尺度上第 i 个方向子带的第 j 个系数, \bar{x}_i 为第 i 个方向子带系数的均值; M 为所选方向子带的数目, N 为每个子带中的系数的总个数。

3.4 视觉感知系数归一化

分别计算参考图像和失真图像各方向子带中视觉感知系数所占的比重。

$$P_R(n) = \frac{R_T(n)}{R(n)} \quad (4)$$

$$P_D(n) = \frac{D_T(n)}{D(n)} \quad (5)$$

其中 $R_T(n)$ 和 $D_T(n)$ 分别为参考图像和失真图像的第 n 个子带中视觉感知系数的个数。 $R(n)$ 和 $D(n)$ 为其对应子带中所有系数的个数。

3.5 图像质量评价测度

为减小数据传输量, 我们只将视觉感知阈值 T 和 $P_R(n)$ 作为参考图像的特征信息传输到接收端, $P_D(n)$ 在接收端求得。然后由式(6)统计所选子带中 $P_R(n)$ 和 $P_D(n)$ 的绝对差和 S

$$S = \sum_{n=1}^L |P_R(n) - P_D(n)| \quad (6)$$

L 为被选取子带的总个数, 实验中取 $L = 24$ 。据此定义图像质量的评价测度 Q

$$Q = \frac{1}{1 + \log_2 \left[\frac{S}{Q_0} + 1 \right]} \quad (7)$$

其中, Q_0 为 Q 动态范围的调节因子, 实验中取 $Q_0 = 0.1$ 。

4 实验结果与分析

为测试本文提出的图像质量评价方法的性能, 我们设计了以下三组实验分别验证了该方法的可行性、合理性和敏感性。

4.1 本文方法与主观感知一致性实验

本实验是在美国 TEXAS 大学 LIVE(Lab of Image and Video Engineer) 图像质量评估数据库^[18]上进行的。数据库包含 29 幅高分辨率的 RGB 图像和通过 JPEG 和 JPEG2000 压缩得到的一系列失真图像, 其中 JPEG 图像 175 幅, JPEG2000 图像 169 幅, 同时还给出了每幅图像的主观评价(MOS, Mean Opinion Score)等信息。为了测试本文提出的图像质量客观评价结果与主观感知的一致性, 我们选择了以下三种度量准则^[9]: (1) 相关系数(CC, Correlation Coefficient), 反映了客观评价方法预测的精确性; (2) Spearman 等级次序相关系数(ROCC, Rank Order Correlation Coefficient), 反映了客观评价成绩预测的单调性; (3) 离出率(OR, Outlier Ratio), 反映了客观评价方法估计的稳定性。

表 1 PSNR、MSSIM、RR-WISM 和本文提出方法 Q 的主客观一致性评价对比

		JPEG			JPEG2000		
MODEL	Type	CC	ROCC	OR	CC	ROCC	OR
PSNR	FR	0.9229	0.8905	0.1886	0.933	0.9041	0.0947
MSSIM	FR	0.9674	0.9485	0.04	0.949	0.9368	0.0651
RR-WISM	RR	0.9291	0.9069	0.1486	0.9261	0.9135	0.1183
Q	RR	0.9728	0.9527	0.0457	0.9565	0.9390	0.0414

表 1 和图 3 给出了本文方法与全参考型的 PSNR、MSSIM^[2,3]和 RR-WISM 方法^[4]的对比实验结果。由表 1 可以看出, 本文方法相对现有方法与主观感知有较大的相关系数, 较低的离出率。图 3 显示本文方法相对现有方法与主观 MOS 值的非线性拟合曲线逼近效果最

优.因此本文提出的方法较已有的方法有较大的改进,

且与主观评价价值具有较好的一致性.

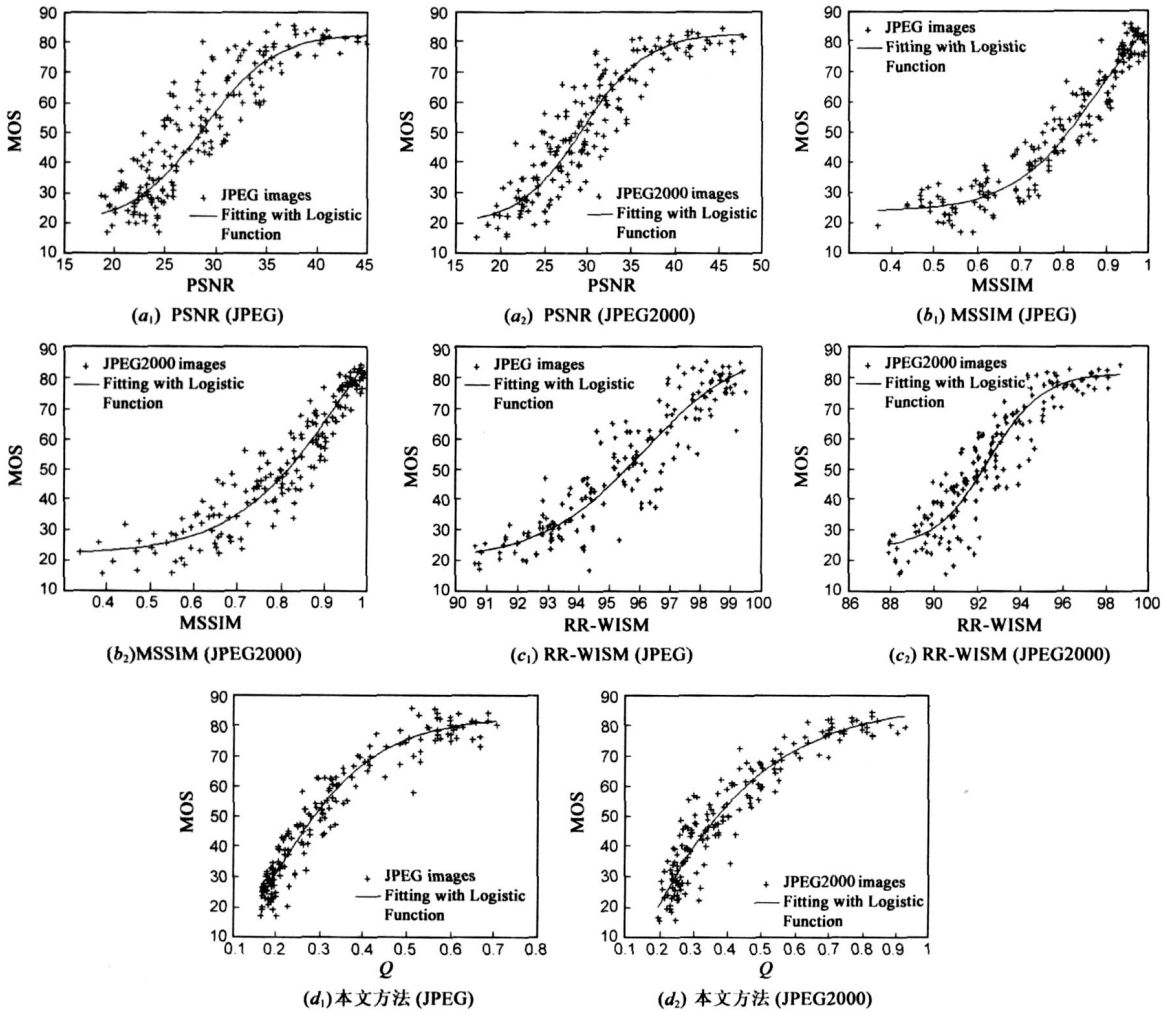
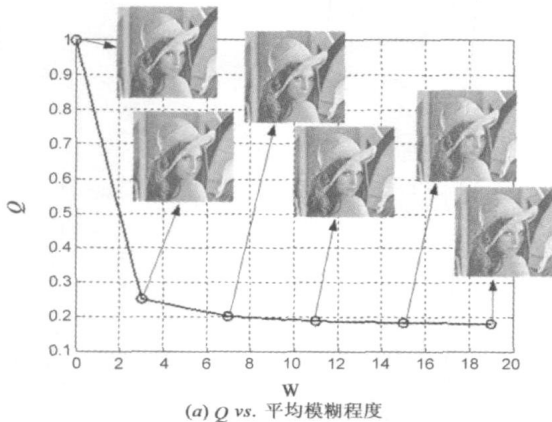


图 3 四种图像质量评价方法与主观 MOS 值的非线性拟合曲线图

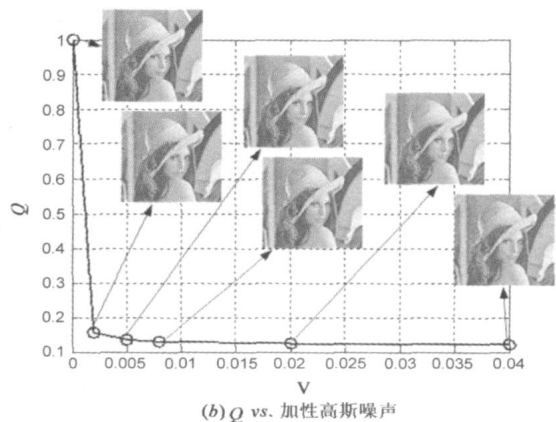
4.2 本文方法的合理性测试实验

为了测试本文方法的合理性, 本实验利用“Lena”图像构造了以下四组退化图像: (1) 平均模糊图像(窗口大小为 $W \times W$); (2) 高斯噪声污染图像(零均值, 方差为 V); (3) 椒盐噪声污染图像(密度为 D); (4) JPEG 压

缩图像(压缩比为 R). 图 4 给出了随着失真程度的增加, 本文方法对图像的评价值逐渐下降的曲线图. 结果表明, 随着图像视觉质量的下降, 本文提出方法对图像的评价值也跟着下降, 这充分表明了本文提出方法的合理性.



(a) Q vs. 平均模糊程度



(b) Q vs. 加性高斯噪声

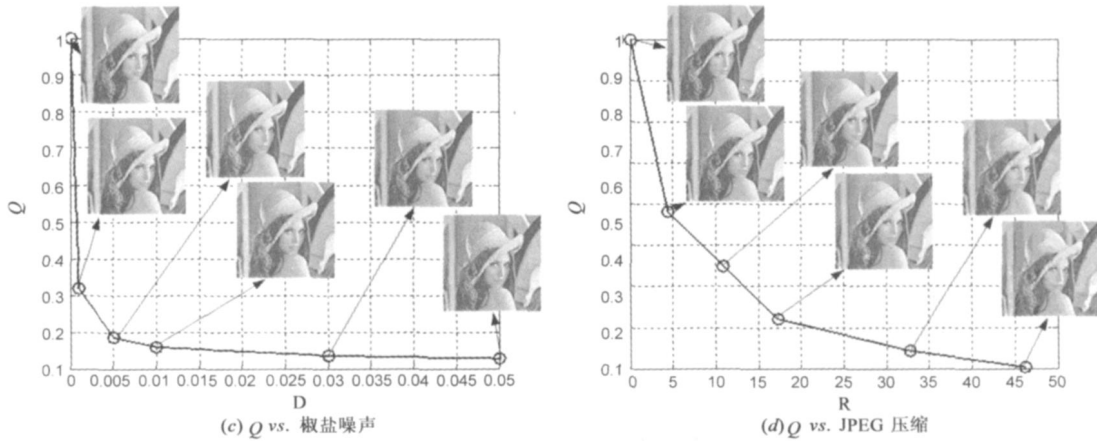


图 4 本文提出方法在不同图像失真下的线性变化曲线

4.3 本文方法的敏感性测试实验

目前,最常用的图像评价方法依然是 PSNR. 然而,在很多情况下 PSNR 并不能真正有效地反映图像的视觉效果. 图 5 给出几种“Lena”的退化图像,其 PSNR 基本相同,但我们可以明显地感觉到其视觉效果有较大差异. 表 2 给出了本文方法对这几幅图像的评价值,显然能有效地反映不同退化图像的视觉效果差异,表明了本文方法良好的敏感性.



图 5 “Lena”图像具有相同的 PSNR 而视觉效果不同的几幅图像

表 2 图 5 中图像的质量评价价值比较

MODEL	(b)	(c)	(d)
PSNR	24.8022	24.8013	24.8041
本文方法	1	0.2345	0.1929

5 结论

本文提出了一种基于 WBCT 的部分参考型图像质量客观评价方法. 基于图像失真会导致视觉感知系数变化的特点, 利用一种能有效反映图像视觉感知的变换 WBCT, 来统计失真过程中图像的视觉感知系数的变

化情况, 从而得到了一种与人类主观感知度有更好一致性的图像质量评价方法. 为了进一步优化和改进本文的方法, 我们将从图像感知信息的表示入手, 寻找更优的稀疏表示方法, 获取更好的图像质量评价方法.

参考文献:

- [1] Z Wang, A C Bovik. Modern Image Quality Assessment[M]. New York: Morgan and Claypool Publishing Company, 2006.
- [2] Z Wang, A C Bovik, H R Sheikh, E P Simoncelli. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Trans Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [3] Zhou Wang, Eero P Simoncelli, Alan C. Bovik. Multi-scale structural similarity for image quality assessment[A]. IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers[C]. Pacific Grove, CA: IEEE Press, 2003. 1398-1402.
- [4] Wang Zhou, Simoncelli E P. Reduced-reference image quality assessment using a wavelet domain natural image statistic model[A]. Annual Symposium on Electronic Image[C]. San Jose, CA: SPIE Press, 2005. 149-159.
- [5] H R Sheikh, A C Bovik, L Comack. No-reference quality assessment using natural scene statistics: JPEG 2000[J]. IEEE Trans Image Processing, 2005, 14(11): 1918-1927.
- [6] Zhou Wang, Guixing Wu, Hamid R Sheikh, Eero P Simoncelli, Erhui Yang, Alan C Bovik. Quality aware image[J]. IEEE Trans Image Processing, 2006, 15(6): 1680-1689.
- [7] Patrick Le Callet, Christian Viard Gaudin, Dominique Barba. A convolutional neural network approach for objective video quality assessment[J]. IEEE Trans Neural Networks, 2006. 17(5): 1316-1327.
- [8] Video Quality Expert Group, RRNR TV Group Test Plan Draft Version 1. 9[R]. <http://www.vqeg.org>, 2006.
- [9] P Moulin, J Liu. Analysis of multiresolution image denoising schemes using a generalized gaussian and complexity priors [J]. IEEE Trans Information Theory, 1999, 45(3): 909-919.
- [10] R Eslami, H Radha. Wavelet based contourlet transform and

- its application to image coding[A]. International Conference on Image Processing[C]. Singapore: IEEE Press, 2004. 3189– 3192.
- [11] M N Do, M Vetterli. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Trans Image Processing. 2005, 14(12): 2091– 2106.
- [12] R H Bamberg, M J T Smith. A filter bank for the directional decomposition of images[J]. IEEE Trans Theory and Design, 1992, 240(4): 882– 893.
- [13] A Brian, Wandell. Foundations of Vision[M]. Sunderland MA: Sinauer Associates, Inc, 1995.
- [14] S A Karunasekera, N G Kingsbury. A distortion measure for blocking artifacts in images based on human visual sensitivity [J]. IEEE Trans Image Processing, 1995, 4(6): 713– 724.
- [15] Imgeun Lee, Jongsik Kim, et al. Wavelet transform image coding using human visual system[A]. IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems [C]. Taipei, Taiwan: IEEE Press, 1994. 619– 623.
- [16] M Miloslavski, Y Sung Ho. Zerotree wavelet image coding based on the human visual system model[A]. IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems[C]. Chiangmai, Thailand: IEEE Press, 1998. 57– 60.
- [17] J N Marcus, R Julien, K Murat. Wavelet based color image compression: exploiting the contrast sensitivity[J]. IEEE Trans Image Processing. 2003, 12(1): 58– 70.
- [18] H R Sheikh, Z Wang, A C Bovikand, L K Cormack. Image and Video Quality Assessment Research at LIVE[DB/OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality/>, 2003.

- [19] VQEG. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment [R]. <http://www.vqeg.org/>, 2000.

作者简介:



路文男, 1981 年生于陕西咸阳, 西安电子科技大学电子工程学院博士研究生. 研究方向为视频增强与通信、影像质量的评价.
E-mail: luwen@mail.xidian.edu.cn



高新波男, 1972 年生于山东莱芜. 现任西安电子科技大学教授、博士生导师、学科带头人, IEEE 高级会员、中国图象图形学学会常务理事, 陕西省图象图形学学会副理事长. 目前主要从事影像处理、分析和理解、模式识别和机器学习等领域的研究.



王体胜男, 1981 年生于河南鹤壁, 西安电子科技大学电子工程学院硕士研究生. 研究方向为视频/图像质量的评价.