

基于颜色计算显著特征的彩色图像质量评价方法

王晓红, 况盛坤

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 从颜色这个角度研究新的全参考图像质量评价方法。**方法** 首先在 Lab 色空间内基于颜色信息提取 2 个图像特征, 即颜色和对比度特征。然后将颜色特征和图像梯度相结合, 对比度特征和图像局部范围相结合, 分别提出不同的图像质量评估方法。**结果** 采用该领域内 4 种常用的参数来评估文中算法和 14 种其他经典算法的表现, 结果显示文中提出的 2 种基于图像彩色信息的算法总体上优于其他算法。**结论** 从颜色计算显著特征出发来研究图像质量评价方法是一个有效的途径。**关键词:** 全参考图像质量评价方法; 彩色显著特征; 对比度显著特征; 图像局部范围
中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)15-0183-06

Color Image Quality Assessment Based on Color Visual Saliency Feature

WANG Xiao-hong, KUANG Sheng-kun

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to study new full reference image quality assessment methods in view of color. First, two image features like color and contrast saliency were extracted from Lab color space based on color information. Then color feature was combined with gradient map and contrast ratio was combined with local scope of image to propose different image quality assessment methods respectively. The mentioned algorithms and 14 other classic algorithms were evaluated by four common indexes. The assessment result showed that the proposed two new algorithms were generally better than all other ones. In conclusion, it is an effective way to study image quality assessment from aspect of color visual saliency feature.

KEY WORDS: full reference image quality assessment; color saliency feature; contrast saliency feature; local scope of image

图像作为一种能够更高效地描述、传递信息的载体, 越来越多地被人们所使用。数字成像系统和图像处理技术的高速发展革新了人们获取、存储、接收、使用和分享图像的方式, 给人们带来了极其便捷的生活。图像在获取、传输、存储、处理的过程中很容易受到各种影响而失真。尽管目前不能保证图像的质量在生产和使用的过程中永不退化, 但了解、量化、控制图像的质量是非

常有必要的, 因此图像质量评价(IQA)是多年来图像处理研究的热门。

全参考 IQA 方法(FR)的研究是在 IQA 研究领域内最热门的一种, 其成果也是最多的。均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)是最常用的全参考质量评价方法。2002 年, Zhou Wang 等人综合亮度信息、对比度信息、结构相似度信息这 3 种指标提出基于结构相似度(SSIM)的全参考图像质量

收稿日期: 2016-01-27

作者简介: 王晓红(1971—), 女, 陕西人, 博士, 上海理工大学教授, 主要研究方向为色彩学与色彩应用、印刷质量检测与控制 and 数字印刷技术。

评价方法^[1-3], 该方法基本引领了随后十几年内 IQA 研究的热潮, 涌现出了很多基于 SSIM 算法改进的图像质量评价方法, 如 MS-SSIM 算法^[4]、GSSIM 算法^[5]、3-SSIM 算法^[6]、FSIM 算法^[7]、IW-SSIM 算法^[8]、SR-SIM 算法^[9]以及 VSI 算法^[10]。还有一些其他类型的算法, 如基于自然场景分析的 IFC 算法^[11]和 VIF 算法^[12]; 基于小波域提出的 VSNR 算法^[13]; 基于最显性失真的 MAD 算法^[14]。

对以上方法的分析发现, 除了 FSIM 算法和 VSI 算法以外, 其他的算法几乎都是仅仅考虑图像的灰度信息来研究图像质量的评估。彩色图像的颜色信息是极其重要的, 因此这里将从颜色信息这一点出发研究新的 IQA 方法。在以上的所有方法中精度表现最高的 2 个算法当属 SR-SIM 算法和 VSI 算法。这 2 个方法有一个共同特征, 即他们都是基于计算显著图提出的。2012 年, Lin Zhang 等人基于谱残差法(SR)提取的图像显著特征来比较参考图像和失真图像之间的相似性, 结合比较梯度信息计算得到 SR-SIM 值评价图像质量。2014 年, 他们又基于 GBVS 计算显著模型得到的显著信息、梯度信息、彩色信息这 3 个参数, 分别计算参考图和失真图之间的相似度, 然后加权得到最终的表示图像质量的 VSI 值, 同样获得了不俗的效果。

文中将依托图像的颜色信息提取的 2 个图像显著特征, 即对比度显著特征和彩色显著特征, 并结合一些基于亮度信息提取的图像特征提出 2 种新的 FR-IQA 算法。

1 图像颜色显著特征的提取

颜色的三属性中, 除了明度以外, 另外 2 个属性均是描述彩色信息的。这里首先基于颜色信息提取图像的颜色显著特征, 直接从彩色空间的彩色通道中提取颜色信息。其次, 除颜色以外, 图像的对比度也是一个极能体现图像特征的属性, 这里通过计算中央周边色差值来提取图像局部对比度信息。对于颜色和对比度这 2 个显著特征的提取均是在 Lab 色空间中进行的。

1.1 颜色显著特征

假设有图像 I , 将其转换到 Lab 色空间后为 I_A , I_A 和 I_B 分别表示其红绿、黄蓝两分通道图像。然后对各子通道进行一级小波变换操作, DWT 和

iDWT 分别表示小波变换及其逆变换操作, c_a, c_h, c_v, c_d 分别为对应通道分解后的小波系数。彩色特征的提取如下:

$$\begin{aligned} [c_{aA}, c_{hA}, c_{vA}, c_{dA}] &= \text{DWT}(I_A) \\ [c_{aB}, c_{hB}, c_{vB}, c_{dB}] &= \text{DWT}(I_B) \\ V &= \text{iDWT}(c_{aA} + c_{aB}; c_{hA} + c_{hB}; c_{vA} + c_{vB}; c_{dA} + c_{dB}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: V 为最终提取出的彩色特征。

1.2 对比度特征

由于黄斑的限制, 当人眼聚焦于目标物的时候, 能够清晰聚焦的视场只有 2° 左右^[15]。当人眼注释图像中某一区域时, 周边作为背景的其他区域是模糊虚化的。基于此, 文中提出一种能够有效提取对比度显著特征的方法, 其具体过程主要分为 3 个步骤。

1) 首先对图像做分块处理, 对比度特征也是分块来计算的。根据人眼清晰聚焦的范围来确定待分子块的大小, 计算公式:

$$R = \frac{2D \tan \frac{\alpha}{2}}{d} \quad (2)$$

式中: α 为清晰聚焦的视场; D 为人眼常规视距; d 为显示器点距。最终计算得到的像素个数 R 为 32, 即将原图细分为多个像素为 32×32 大小的子块。

2) 当计算某一子块的对比度特征时, 其他所有块作为背景。首先对背景块作高斯模糊操作, 求取各通道均值。当前子块对比度的计算公式:

$$C_i = (L_i - L_b)^2 + (A_i - A_b)^2 + (B_i - B_b)^2 \quad (3)$$

式中: L_i, A_i, B_i 分别表示当前子块的 L, A, B 三通道的颜色值; L_b, A_b, B_b 分别表示背景块在高斯模糊后三通道的颜色均值; C_i 表示第 i 个子块的对比度信息。

3) 图像整体的对比度特征图 C 则由式(4)计算得到:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

式中: n 为子块总数量。

2 基于颜色计算显著特征的 FR-IQA 方法

将颜色特征和对比度特征作为依托各提出一个全参考质量评价方法。由于图像的色彩信息是千

变万化的,考虑到评价方法的适用范围,对于彩色特征,文中将结合梯度信息提高其评价效果。对于对比度特征,则结合图像的局部范围特征来充分考虑图像的细节。

2.1 颜色特征评估图像质量

对于彩色图像,图像中的颜色信息包含了大量图像内容,而人眼能直观地感受到颜色的改变,同时梯度信息反映了图像中亮度的变化,能够很好地表现出图像的大体轮廓和结构信息,也同样能够很直观地被人眼所感受。这里采用 Prewitt 算子计算图像的梯度,其原理是在水平和垂直 2 个方向分别利用 1 个算子与图像邻域进行卷积操作来完成。其水平和垂直方向的算子如式(5)所示:

$$d_x = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 10 & -1 \\ 10 & -1 \\ 10 & -1 \end{bmatrix}, \quad d_y = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

如果将 m 和 n 分别代表参考图像和失真图像,则经过 Prewitt 算子卷积后,参考图像水平方向和垂直方向梯度分别为 $G_{m1}(x)$ 和 $G_{m2}(x)$;同理,失真图像在 2 个方向的梯度分别为 $G_{n1}(x)$ 和 $G_{n2}(x)$,那么图像梯度模定义为水平和垂直 2 方向梯度的绝对值之和, m 和 n 的梯度图分别为 $G_m(x)$ 和 $G_n(x)$,梯度结构相似度的计算如式(6)所示:

$$S_G(x) = \frac{2G_m(x) \cdot G_n(x) + C_1}{G_m(x)^2 + G_n(x)^2 + C_1} \quad (6)$$

根据提出的颜色特征,用 $V_m(x)$ 和 $V_n(x)$ 分别表示参考图像和失真图像的颜色特征图。颜色特征相似度的计算如式(7)所示:

$$S_V(x) = \frac{2V_m(x) \cdot V_n(x) + C_2}{V_m(x)^2 + V_n(x)^2 + C_2} \quad (7)$$

在式(6)—(7)中, C_1 和 C_2 取固定值(以及 C_3 和 C_4),防止分母为零,提高算法的稳定性。结合 $S_G(x)$ 和 $S_V(x)$, m 和 n 之间的局部相似度值的计算如式(8)所示:

$$V_S(x) = S_G(x) \cdot [S_V(x)]^\alpha \quad (8)$$

式中: α (以及 β)是用来调节 $S_G(x)$ 和 $S_V(x)$ 之间的相对权重。

此方法中依托的是彩色信息,那么也就是说 $V_m(x)$ 和 $V_n(x)$ 之间相对更大的值表现更高的图像质量。将 $V_{\max}(x) = \max\{V_m(x), V_n(x)\}$ 作为权重来衡量局部相似度 $V_S(x)$ 在全局相似度值中的比例。相对于参考图像 m ,失真图像 n 的质量评估指标值

VSSIM 如式(9)所示:

$$VSSIM = \frac{\sum_{x \in \theta} V_S(x) \cdot V_{\max}(x)}{\sum_{x \in \theta} V_{\max}(x)} \quad (9)$$

式中: θ 表示在图像的整体空间域。

2.2 对比度特征评估图像质量

前文采用块操作的方式提取了图像的对比度特征图,丢失了图像的一些细节信息,因此,这里采用图像的局部信息来弥补这一点。所谓图像的局部信息,即将一个像素点周围的一个领域范围内的最大亮度值与最小亮度值之差赋值给该点,计算如式(10)所示:

$$L_x = \partial_{\max} - \partial_{\min} \quad (10)$$

式中: ∂ 表示每个像素点周围 3×3 的邻域范围,若用 $L_m(x)$ 和 $L_n(x)$ 分别表示参考图和失真图的局部范围特征图,则局部特征相似度的计算如式(11)所示:

$$S_L(x) = \frac{2L_m(x) \cdot L_n(x) + C_3}{L_m(x)^2 + L_n(x)^2 + C_3} \quad (11)$$

同样,用 $C_m(x)$ 和 $C_n(x)$ 分别表示参考图和失真图的对比度特征图的话,对比度相似度的计算则如式(12)所示:

$$S_C(x) = \frac{2C_m(x) \cdot C_n(x) + C_4}{C_m(x)^2 + C_n(x)^2 + C_4} \quad (12)$$

结合 $S_L(x)$ 和 $S_C(x)$, m 和 n 之间的局部相似度值的计算如公式(13)所示:

$$C_S(x) = S_C(x) \cdot [S_L(x)]^\beta \quad (13)$$

以 $C_{\max}(x) = \max\{C_m(x), C_n(x)\}$ 为权重来衡量局部相似度 $C_S(x)$ 在全局相似度值中的比例。失真图像 n 的质量评估参数值 CSSIM 如式(14)所示:

$$CSSIM = \frac{\sum_{x \in \theta} C_S(x) \cdot C_{\max}(x)}{\sum_{x \in \theta} C_{\max}(x)} \quad (14)$$

式中: θ 为图像整体空域。

3 实验结果及分析

3.1 标准图像库

为了验证文中基于图像中的颜色信息而提出的 2 种图像质量评价方法,选定美国 TEXAS 大学图像视频工程实验室提供的 LIVE 图像库和 CSIQ 图像库这 2 个在图像质量评价研究领域中常用的

标准图库进行评估分析实验。这 2 个图像质量评价数据库的参考图像数量分别为 29 幅和 30 幅,失真图像数量分别为 779 幅和 866 幅。其中 LIVE 图像库中的 5 种失真类型包括高斯模糊、白噪声、快速衰退、JPEG 2000 和 JPEG。CSIQ 则包括高斯模糊、两种噪声、对比度失真、JPEG 2000 和 JPEG 这 6 种类型。这 2 个图像库中所提供的所有图像均为彩图,2 个图库所采用的主观评分类型不同,不过每张失真图均有相应的 DMOS 值,该值越大,说明图像失真越严重。

3.2 评价指标

一般常用于评价主观评分与客观计算值之间相关性的参数有 4 类,即斯皮尔曼秩相关系数(SROCC)、肯德尔秩次相关系数(KROCC)、皮尔森线性相关系数(PLCC)和均方根误差相关系数(RMSE)。其中前 3 个相关系数越接近 1,表明算法与人眼评价越接近;RMSE 值越大,表明主观值与

客观值之间越离散,因此该值越小越好。

在前文中,4 个参数 C 和 2 个指数参数的设定是为了提高算法的稳定性和精度。在此处,将各算法中的参数值不断调节,直至以上 4 个评价参数的表现最稳定且最优为止。 C_1 , C_2 和 α 分别取值为 600, 0.4 和 0.003, C_3 , C_4 和 β 分别取值为 225, 0.4 和 0.5。

3.3 评价性能比较

将文中提出的 VSSIM 和 CSSIM 方法对以上 2 个图像库进行评估,以 SROCC, KROCC, PLCC 和 RMSE 这 4 个评价指标为依据,将文中的 2 种 IQA 方法与现有的全参考质量评价方法进行比较,结果见表 1。

针对 2 个图库数量不同,将 2 个图像库上的 SROCC, KROCC 以及 PLCC 做加权平均,求得个算法的综合值,结果见表 2。

表 1 图像质量评价方法性能比较
Tab. 1 Performance comparison of IQA models

方法	LIVE 图像库				CSIQ 图像库			
	SROCC	KROCC	PLCC	RMSE	SROCC	KROCC	PLCC	RMSE
PSNR	0.8756	0.6865	0.8723	13.3597	0.8058	0.6084	0.8	0.1575
UQI	0.8941	0.71	0.8987	11.9823	0.8098	0.6188	0.8312	0.146
VSNR	0.9274	0.7616	0.9231	10.5059	0.8106	0.6247	0.8002	0.1575
NQM	0.9086	0.7413	0.9122	11.1926	0.7402	0.5638	0.7433	0.1756
IFC	0.9259	0.7579	0.9268	10.2643	0.7671	0.5897	0.8384	0.1431
SSIM	0.9479	0.7963	0.9449	8.9455	0.8756	0.6907	0.8613	0.1334
MSSSIM	0.9513	0.8045	0.9489	8.6188	0.9133	0.7393	0.8991	0.1149
IWSSIM	0.9567	0.8175	0.9522	8.3473	0.9213	0.7529	0.9144	0.1063
MAD	0.9669	0.8421	0.9675	6.9073	0.9466	0.797	0.9502	0.0818
GSM	0.9561	0.815	0.9512	8.4327	0.9108	0.7374	0.8964	0.1164
RFSIM	0.9401	0.7816	0.9354	9.6642	0.9295	0.7645	0.9179	0.1042
FSIM	0.9634	0.8337	0.9597	7.678	0.9242	0.7567	0.912	0.1077
SRSIM	0.9618	0.8299	0.9553	8.0811	0.9319	0.7725	0.925	0.0997
VSI	0.9524	0.8058	0.9482	8.6816	0.9423	0.7857	0.9279	0.0979
FSIMC	0.9645	0.8363	0.9613	7.5296	0.931	0.769	0.9192	0.1034
VSSIM	0.9727	0.8576	0.9715	6.8326	0.9488	0.8023	0.9412	0.0921
CSSIM	0.9746	0.8689	0.972	6.7159	0.9594	0.8244	0.9571	0.0852

表 2 综合 2 个图像库进行比较
Tab. 2 Comprehensive comparison of IQA models

方法	加权平均值		
	SROCC	KROCC	PLCC
PSNR	0.838854225	0.681692036	0.834238116
UQI	0.84972079	0.661988328	0.863165046
VSNR	0.865911368	0.689529848	0.858400061
NQM	0.819946869	0.647856231	0.823283647
IFC	0.842300729	0.669352158	0.880262371
SSIM	0.909838116	0.740707538	0.900889301
MSSSIM	0.931295137	0.770175866	0.9226831
IWSSIM	0.938063891	0.783491733	0.932300426
MAD	0.956213191	0.818357386	0.958392523
GSM	0.932252097	0.774147964	0.922350881
RFSIM	0.934519696	0.772597812	0.926187234
FSIM	0.942763404	0.79316383	0.934588632
SRSIM	0.946059331	0.799682128	0.939348754
VSI	0.947082918	0.79521848	0.937513191
FSIMC	0.946864134	0.800870334	0.939136717
VSSIM	0.960117994	0.82848766	0.955548754
CSSIM	0.966598055	0.845473252	0.964155988

从表 1 可以看出，对于 LIVE 图像库，文中提出的 VSSIM 和 CSSIM 算法在所有指标上均优于其他算法；对于 CSIQ 库，VSSIM 算法总体上优于其他所有算法，仅在 PLCC 和 RMSE 指标上略低于 MAD 算法，同样，CSSIM 算法在表现精度的 3 个指标上优于其他所有算法，仅仅在 RMSE 指标上略低于 MAD 算法。文中提出的 2 种算法在 2 个图像库以及 4 个评价参数上都要优于同样考虑了颜色信息的 FSIMC 算法和 VSI 算法。这一点在对 2

个图像库的各指标进行加权平均后也有同样的表现，从表 2 可以看出文中提出的 2 种算法总体上明显优于其他算法，尤其是 KROCC 指标值有了大幅度的提升。在 IQA 算法的研究中考虑颜色信息是一种极其有效的方法。

为了更直观地体现质量评价客观计算值与人眼主观评分 MOS 值之间的相关性，以上 2 组值之间的散点图以及拟合曲线见图 1，文中选定 FSIMC 算法进行比对。

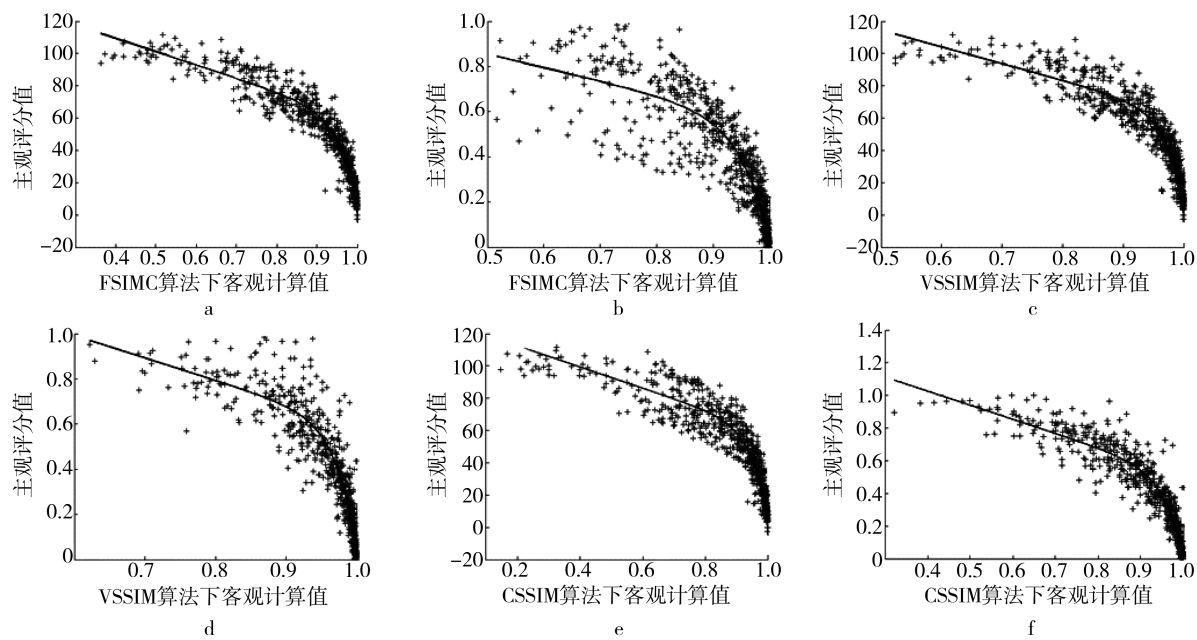


图 1 主客观评价散点
Fig.1 Scatter diagram of objective and subjective values

在图 1a, 1c 和 1e 分别表示 FSIMC 算法、VSSIM 算法和 CSSIM 算法在 LIVE 图库上的评估表现, 1b, 1d 和 1f 分别是这 3 个算法在 CSIQ 图库上的表现。从图 1 中可以看出, 就 LIVE 图库而言, 在散点图上类似, 但 RMSE 值的表现说明文中的 2 种算法要更符合人眼评价。对于 CSIQ 图库, 从散点图中可以很直观地看出文中 2 种算法要更加地聚合, 说明和人眼主观评价之间的相关性更高, 这一点在 RMSE 值上也有同样的表现。

4 结语

通过研究历年来多种具有代表性的图像质量评价方法, 可以很明显地发现, 尽管用于研究 IQA 方法的各大标准图库中配备的全是彩色图像, 但该领域内却很少利用它们的颜色信息。在对比大部分算法的评价精度后, 发现基于计算显著图提出的算法在精度上要高于其他算法, 说明了图像的显著特征在 IQA 研究中的有效性。文中在 Lab 色空间中, 提取了 2 个考虑颜色信息的计算显著特征, 即彩色显著特征和对比度显著特征。基于这 2 个特征各提出了一个考虑图像颜色信息的全参考质量评价方法, 对比分析结果显示这 2 种方法均表现出与人眼客观评价有着极高的相关度, 总体上优于其他所有算法。在以后的研究中, 有效地提取图像中的颜色信息和显著特征未尝不是一个有效的方法。

参考文献:

- [1] 褚江, 陈强, 杨曦晨. 全参考图像质量评价综述[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(1): 13—22.
CHU Jiang, CHEN Qiang, YANG Xi-chen. Review on Full Reference Image Quality Assessment Algorithms[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(1): 13—22.
- [2] 王志明. 无参考图像质量评价综述[J]. 自动化学报, 2015, 41(6): 1062—1079.
WANG Zhi-ming. Review on No Reference Image Quality Assessment Algorithms[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(6): 1062—1079.
- [3] 刘书琴, 毋立芳, 宫玉, 等. 图像质量评价综述[J]. 中国科技论文在线, 2011, 6(7): 501—507.
LIU Shu-qin, WU Li-fang, GONG Yu, et al. Overview of Image Quality Assessment[J]. Science Paper Online, 2011, 6(7): 501—507.
- [4] WANG Z, SIMONCELLI E P, BOVIK A C. Multi-scale Structural Similarity for Image Quality Assessment[J]. Conference on Signals, Systems & Computers, 2003, 2(2): 1398—1402.
- [5] CHEN Guan-hao, YANG Chun-ling, XIE Sheng-li. Gradient-based Structure Similarity for Image Quality Assessment[C]// Proceedings of International Conference on Image Processing, 2006.
- [6] LI C F, BOVIC A C. Three-component Weighted Structural Similarity Index[C]// Proceedings of Spie, 2009.
- [7] ZHANG L, ZHANG L, MOU X Q, et al. FSIM: a Feature Similarity Index for Image Quality Assessment[J]. Transactions on Image Processing, 2011, 20(8): 2378—2386.
- [8] WANG Z, LI Q. Information Content Weighting for Perceptual Image Quality Assessment[J]. Transactions on Image Processing, 2011, 20(5): 1185—1198.
- [9] ZHANG L, LI H Y. SR-SIM: A Fast and High Performance IQA Index Based on Spectral Residual[C]// Proceedings of ICIP, 2012.
- [10] ZHANG L, SHEN Y, LI H Y. VSI: A Visual Saliency Induced Index for Perceptual Image Quality Assessment[J]. Transactions on Image Processing, 2014, 23(10): 4270—4281.
- [11] SHEIKH H R, BOVIK A C, VECIANA G. An Information Fidelity Criterion for Image Quality Assessment Using Natural Scene Statistics[J]. Transactions on Image Processing, 2005(12): 2117—2128.
- [12] SHEIKH H R, BOVIK A C. Image Information and Visual Quality[J]. Transactions on Image Processing, 2006(15): 430—444.
- [13] CHANDLER D M, HEMAMI S S. VSNR: A Wavelet-Based Visual Signal-to-noise Ratio for Natural Images[J]. Transactions on Image Processing, 2007(16): 2284—2298.
- [14] LARSON E C, CHANDLER D M. Most Apparent Distortion: Full-Reference Image Quality Assessment and the Role of Strategy[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(1): 143—153.
- [15] FAIRCHILD M D. Color Appearance Models[M]. Chichester: Wiley-IS&T, 2005.