

# 客观评估彩色图像质量的超复数奇异值分解法

叶 佳, 张建秋, 胡 波  
(复旦大学电子工程系, 上海 200433)

**摘 要:** 本文利用超复数直接对彩色图像建模, 保存了彩色图像完整的信息; 基于超复数奇异值分解(也称四元数奇异值分解(QSVD))提出一种全新的图形化与数值化相结合的彩色图像质量评估测度, 不仅能判断图像失真等级, 还能判断不同的失真类型. 测试结果表明, 本文提出的算法比传统的 MSE、PSNR 以及 MSSIM 等算法性能更优.

**关键词:** 图像质量评估; 图像失真; 四元数; 超复数; 超复数奇异值分解

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)01-0028-06

## Hypercomplex Singular Value Decomposition Approach to Objectively Assessing Color Image Quality

YE Jia, ZHANG Jian qiu, HU Bo

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** We employ hypercomplex to describe a color image directly so that all information of the color image can be modeled. Based on hypercomplex singular value decomposition also called quaternion singular value decomposition (QSVD), we present a novel color image quality measure that can be used as a graphical or a scalar measure to predict the distortion introduced by a wide range of noise sources. It reliably measures the distortion not only within a distortion type at different distortion levels, but also across different distortion types. We compare its performance with MSE, PSNR and MSSIM, the test results show that QSVD performs better.

**Key words:** image quality measure; image distortion; quaternions; hypercomplex; QSVD

### 1 引言

在图像的获取、压缩、存储、传输和再现过程中数字图像往往会产生大量的不同类型和不同级别的失真, 这些失真将导致图像质量的严重下降. 如何对图像质量进行准确的评估已经成为图像处理领域里一个极具挑战性的课题.

在过去的 30 年中, 大量的文章提出许多方法试图解决这个问题<sup>[1]</sup>. 根据这些文章, 可将图像质量的评估分为两类: 主观评估和客观评估<sup>[2]</sup>. 主观方法受到包括环境条件、动机以及情绪等多种因素的影响, 而且耗时耗力、代价昂贵. 客观评估方法包括双变量法, 如最小均方误差(MSE)或者  $L_p$  范数<sup>[3-5]</sup>, 此外还有模仿人类视觉系统(HVS)的测度<sup>[4,7-20]</sup>和绘图的测度<sup>[19,21]</sup>等. 一些文章针对图像的压缩<sup>[13,14,16,18,21,22]</sup>、图像的噪声和图像的模糊性<sup>[13,23]</sup>比较了上述提及的评估方法, 发现最常用的客观图像质量评估 MSE 非常不可靠, 它与 HVS 的相关性很差<sup>[24]</sup>. 此外, 基于 HVS 客观测量的算法非常复杂, 效果却并不比 MSE、峰值信噪比(PSNR)或 RMSE 方法更好<sup>[24]</sup>.

最近的文献提出了一些新方法, 例如通用图像质量指标(UQI)<sup>[20]</sup>及其改进算法空间结构类似性测度(SSIM)<sup>[26]</sup>等. 文

献<sup>[24]</sup>提出将原始图像和待评估图像分块, 并将对应块进行奇异值分解. 通过对二者奇异值的处理获得图像质量图, 提出了一种局部和全局评价图像质量的方法. 但该方法只能应用于灰度图片, 而不是视频和彩色图像.

目前, 彩色图像质量客观评估都是通过某种变换提取出彩色图像的亮度层信息, 再用灰度图像质量的客观评估方法对该亮度层信息进行处理从而实现彩色图像质量的客观评估. 显然, 这种做法忽略了图像的色彩信息, 使其对于一些失真度不大的受损彩色图像无法做出有效判断, 也不能有效地分辨出不同受损彩色图像的失真类型.

针对上述问题, 本文作者提出了一种全新的彩色图像质量评估方法——超复数或四元数奇异值分解(QSVD)法. 利用超复数直接对彩色图像进行建模, 并对图像进行超复数奇异值分解从而获得失真映射图谱, 从该图中可以直观地分辨出不同的失真类型以及同一失真类型中不同的失真级别. 由于该法利用了彩色图像完整的信息, 故其质量评估结果比目前仅提取亮度信息处理的结果更为精准. 测试结果表明, QSVD 法比 MSE、PSNR 以及 MSSIM 更直观, 且其与人的主观评价结果更为吻合.

## 2 超复数(四元数)和超复数矩阵

早在 1843 年 Hamilton 就提出了四元数的概念<sup>[28]</sup>. 四元数是复数的拓展, 也称为超复数. 它由四个部分组成: 即  $q = a + bi + cj + dk$  其中,  $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ ,  $i, j, k$  为虚数单位, 且具有如下性质:

$$\begin{aligned} i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \\ ij = -ji = k \\ ki = -ik = j \\ jk = -kj = i \end{aligned} \quad (1)$$

超复数向量与超复数矩阵<sup>[29]</sup>的定义如下:

定义 1 给出一个超复数向量  $x \in H^N$  ( $H$  为 Hilbert 空间), 表示为:  $x = x_1 + x_2j$ , 其中  $x_1, x_2 \in \mathbb{C}^N$  ( $\mathbb{C}$  为复数域). 它与四元数的关系可由 Cayley-Dickson 变换得到. 定义超复数域到复数域的变换  $f: H^N \rightarrow \mathbb{C}^{2N}$  为:

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ -x_2^* \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } * \text{ 为共轭符号} \quad (2)$$

该定义表明: 超复数是复数的复数. 即在普通复数表达式中, 其实部和虚部还是复数.

定义 2 给出一个超复数矩阵  $A \in H^{N \times M}$ , 可表示为  $A = A_1 + jA_2$ , 其中  $A_1, A_2$  为两个复数矩阵 ( $A_1, A_2 \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ). 定义复数伴随矩阵  $x_A \in \mathbb{C}^{2N \times 2M}$  可以由超复数矩阵  $A$  表示为:

$$x_A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ -A_2^* & A_1^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

该定义表明了复数矩阵与超复数矩阵的关系, 提出了利用复数矩阵的处理方法解决超复数矩阵问题的思路.

## 3 彩色图像的模型和它的特征

我们知道, 彩色图像由  $R, G, B$  三个分量组成, 由此可利用超复数对彩色图像建模<sup>[31, 32]</sup>:

$$f_{(q)}(m, n) = f_R(m, n) + j f_G(m, n) + k f_B(m, n) \quad (4)$$

其中  $f_R(m, n), f_G(m, n), f_B(m, n)$  分别代表彩色图像的  $R, G, B$  分量的元素,  $m$  和  $n$  分别代表象素所在矩阵行和列的位置. 可见, 一幅彩色图像可以表示为一个超复数矩阵.

又已知, 一个矩阵  $A$  的能量  $E$  可以用它的 Frobenius 范数表示. 即

$$E = \|A\|_F \quad (5)$$

那么, 彩色图像的能量  $E$  就可以用超复数矩阵  $A$  的 Frobenius 范数来表示.

文献<sup>[30]</sup>已证明超复数矩阵可以做奇异值分解, 根据超复数奇异值分解的定义<sup>[27]</sup>: 对于任何秩为  $r$  (超复数矩阵  $A$  的秩为  $r$ , 当且仅当其复数矩阵  $x_A$  的秩为  $2r$ ) 的超复数矩阵  $A \in H^{N \times M}$ , 存在两个单位超复数矩阵  $U, V$ , (一个超复数单位矩阵  $W \in H^{N \times N}$  具有如下性质:  $WW^T = W^T W = I_N, I_N \in \mathbb{R}^{N \times N}$  为单位矩阵.) 使得:

$$A = U \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T \quad (6)$$

其中上标“ $T$ ”表示共轭转置,  $\Sigma_r$  为实对角矩阵, 并有  $r$  个非零

的值(即  $A$  的奇异值).  $U \in H^{N \times N}, V \in H^{M \times M}$ .

由式(5)和(6), 可将彩色图像的能量  $E$  表示为:

$$\begin{aligned} E = \|A\|_F &= \left\| U \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T \right\|_F \\ &= \|U\|_F \left\| \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right\|_F \|V^T\|_F = \left\| \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right\|_F \quad (7) \end{aligned}$$

由于  $U, V$  为单位超复数矩阵, 故其 Frobenius 范数为 1, 从式(7)可以看出, 彩色图像的能量可以完全由超复数矩阵的奇异值 Frobenius 范数来表示. 换言之, 超复数矩阵的奇异值代表了彩色图像的能量特征, 可以作为衡量彩色图像质量的标准, 这为我们提出的彩色图像质量评估算法提供了理论依据.

## 4 彩色图像质量评估及其评价结果

### 4.1 图形化方法

#### 4.1.1 算法介绍

首先给出原始彩色图像及其失真彩色图像, 利用超复数对每一幅彩色图像建模. 然后, 将彩色图像按照一定规则进行分块(注意, 在本文所有仿真中都将图像分解为  $8 \times 8$  的小块, 因为在 JPEG 压缩以及其他图像处理应用中  $8 \times 8$  是标准的单位尺寸, 另外在 MSSIM 算法中用到的滑窗大小也为  $8 \times 8$ ).

再利用超复数矩阵的奇异值分解算法<sup>[27]</sup>分别计算出原始彩色图像块及其对应失真彩色图像块的奇异值  $\sigma_i$  和  $\sigma_i'$ .

定义原始彩色图像块与失真彩色图像块奇异值之间的距离如式(8).

$$D_i = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_i')^2} \quad (8)$$

其中  $\sigma_i$  为原始彩色图像块的奇异值,  $\sigma_i'$  为失真彩色图像块的奇异值,  $n$  为每个图像块的尺寸. 若整幅图像大小为  $k \times k$ , 则该幅图像被分割为  $\left(\frac{k}{n}\right) \times \left(\frac{k}{n}\right)$  小块. 根据第三节的分析, 我们知道超复数矩阵的奇异值是彩色图像能量的度量, 式(8)实际上就反映了原始图像与失真图像之间能量特征的差异, 我们定义式(8)为失真度评价标准.

根据由式(8)计算出的奇异值距离可以产生一幅大小为  $\left(\frac{k}{n}\right) \times \left(\frac{k}{n}\right)$  的失真映射图谱.

最后, 根据该图谱对彩色图像不同的失真类型以及同一失真类型里不同的失真等级做出判断.

#### 4.1.2 测试结果

我们对六幅大小为  $512 \times 512$  的彩色图像进行处理, 如图 1 所示.

这里以 Lena 和 Baboon 图像为例, 首先对 Lena 以及 baboon 图像进行不同类型, 不同级别的失真处理, 如表 1 所示.

表 1 中 JPEG 表示对图像进行 JPEG 压缩, G. noise 表示对图像加高斯噪声(在  $R, G$  和  $B$  分量上分别加入具有相同方差的高斯噪声), DG shifting 表示在  $R, G, B$  分量每个象素点上加上等量的数值. 以上都是通过 MATLAB 处理得到的, 而 G. blur 是对图像进行高斯模糊处理, Sharpening 对图像做锐化处理. 这两种失真处理是在 Adobe Photoshop 7.0 中完成的.

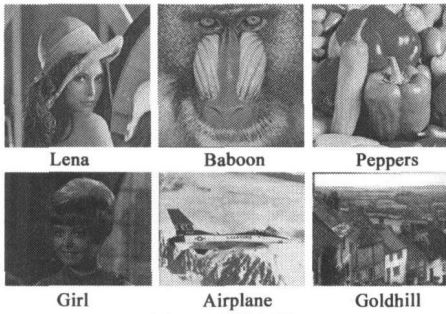


图 1 原始图像

表 1 中 JPEG 行的参数表示图像压缩率; G. noise 行的参数表示高斯噪声方差; DC shifting 行的参数表示每个象素点所加上的值; 而 G. blur 和 Sharpening 行的参数则是根据 Adobe Photoshop7.0 的参数调整而得, 代表模糊或锐化的半径, 单位为像素.

表 1 图像失真类型及失真级别

失真类型 \ 级别	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
JPEG	10/1	30/1	50/1	70/1	90/1
G. blur	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
G. noise	3	6	9	12	15
Sharpening	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
DC shifting	2	4	6	8	10

现对原始彩色图像以及引入各种失真的彩色图像分别进行分块处理, 将每幅图像按  $8 \times 8$  的尺寸分为  $64 \times 64$  个小块, 利用超复数矩阵对每一块图像进行建模, 用 QSVD 的方法计算出每块图像的奇异值并求出原始彩色图像块与失真彩色图像块对应位置上奇异值间的距离  $D_i$ , 由此产生一幅大小为  $64 \times 64$  的失真映射图谱.

结果如图 2~ 图 5 所示, 图 2 为 Lena 图像不同类型不同级别的失真图像集合, 图 3 为每幅失真 lena 图像相对于原始图像的失真映射图谱; 图 4 为 Baboon 图像在不同类型不同级别的失真图像集合, 图 5 为每幅失真 baboon 图像相对于原始图像的失真映射图谱.

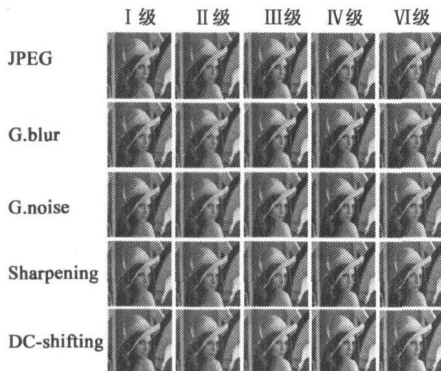


图 2 不同类型不同级别的 Lena 失真图像集合

从两组图像失真映射图谱与不同失真类型和失真级别的图像的对应关系可以看出:

JPEG: 随着失真级别的增加, 图像格形化程度越来越重.

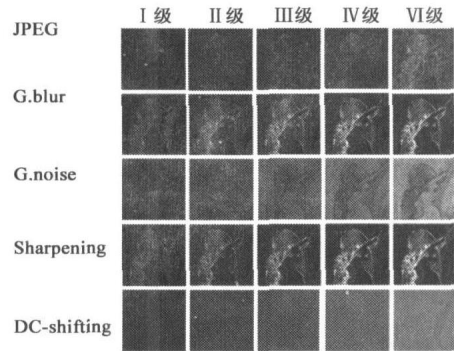


图 3 Lena 失真图像相对于原始图像的失真映射图谱

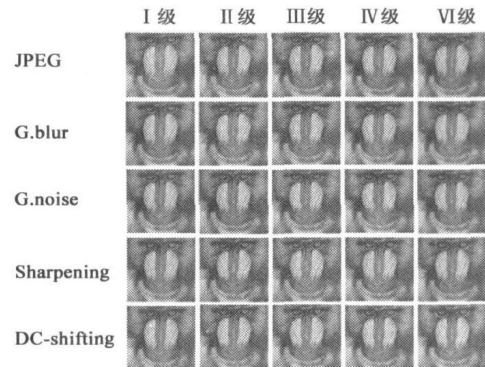


图 4 不同类型不同级别的 Baboon 失真图像集合

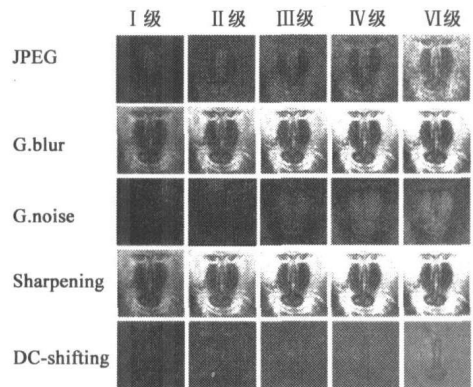


图 5 Baboon 失真图像相对于原始图像的失真映射图谱

G. blur: 这种类型的失真明显表现在边缘和高频区域, 会产生较为严重的模糊现象, 随着模糊程度的加深, 边缘及高频的失真轮廓会越来越明显.

G. noise: 这种类型的失真是可见噪声均匀分布于整个图像上, 且在高频, 低频和纹理的区域明显可见.

Sharpening: 这种类型的失真使得图像有纹理的部分和高频区域更加尖锐和明显, 而在低频区域没有明显噪声.

DC shifting: 若一个确定的值加在每个象素点上, 那么图像会均匀变亮, 反之则均匀变暗.

这样, 根据不同失真类型的不同特点就可以从失真映射图谱中区分出失真类型, 然后再在同一失真类型当中辨别不同的失真级别就相对比较容易了.

文献[24]中提到, 可以将彩色图像的亮度信息提取出来做 SVD 分解, 产生出对应于标准彩色图像的失真映射图谱.

这里同样以大小为  $512 \times 512$  的 Lena 和 Baboon 彩色图像为例: 首先, 我们分别用文献[24]中提到的方法和 QSVD 法对特定失真类型的彩色图像进行处理。图 6 分别给出了 Lena 和 Baboon 图像在用两种方法经过 DC shifting 处理后的失真映射对比图谱, 而图 7 则分别给出了 Lena 和 Baboon 图像在用两种方法经过 G. noise 处理后的失真映射对比图谱。

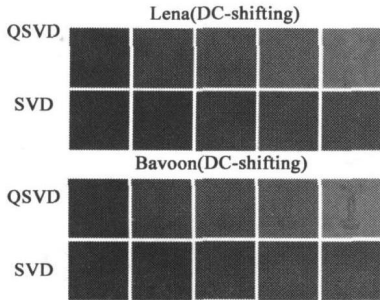


图 6 SVD 法与 QSVD 法分别经过 DC-shifting 处理后的失真映射图谱

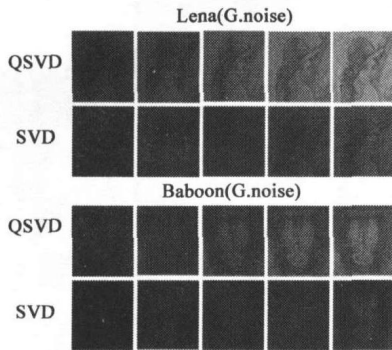


图 7 SVD 法与 QSVD 法分别经过 G.noise 处理后的失真映射图谱

从图 6、图 7 中可以明显看出, 采用 SVD 方法对从彩色图像中提取出的亮度信息进行处理, 丢失了很多信息以至于无法直观准确地表现出图像失真程度, 而采用 QSVD 方法之后, 失真映射图谱得到了明显改善, 可以清晰分辨同一失真类型里不同的失真等级。

下面, 我们再在每种失真类型里分别挑选一幅失真图像: JPEG(70 1), G. blur(0.3), G. noise(9), Sharpening(0.2), DG shifting(6); 然后分别用 QSVD 法和 SVD 法计算出失真图像对应于标准图像的失真映射图谱, 如图 8 所示。

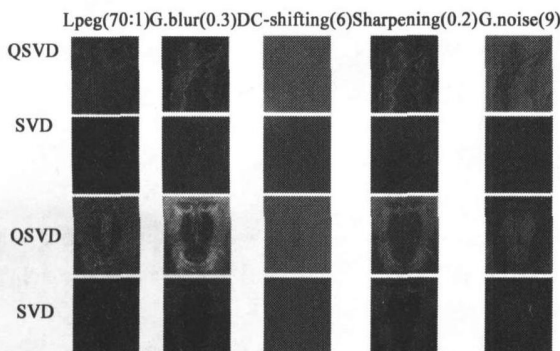


图 8 SVD 法与 QSVD 法经过不同类型失真处理后的失真映射图谱

从图 8 中可以明显看出, 对于失真等级比较低的图像, 利用 QSVD 做出的失真映射图谱能够反应出灰度 SVD 法无法反应的失真信息, 由此可见 QSVD 法处理结果携带的信息量更加完整, 故而其对图像质量做出的判断更加可靠。

#### 4.2 数值化方法

数值方法是基于图形化方法提出的一种方法, 它根据不同的失真类型计算彩色图像奇异值距离间的全局误差, 最后得到一个值:

$$M_{-QSVD} = \frac{\sum_{i=1}^{(k/n) \times (k/n)} |D_i - D_{mid}|}{(k/n) \times (k/n)} \quad (9)$$

(9)式(9)中  $D_{mid}$  表示整个奇异值距离  $D_i$  的中值,  $k$  为整幅图像的尺寸,  $n$  为图像分块的尺寸。M<sub>-QSVD</sub> 这个值实际上就是对图像整体质量的一个描述。

现在, 我们将从两个角度对 QSVD 的数值化方法与传统的 MSE, PSNR 以及 MSSIM 方法作出比较:

其一, 分别计算 R, G, B 三个单色分量上的 MSE, PSNR, 以及 MSSIM, 然后做平均得到最终的数值与用 M<sub>-QSVD</sub> 方法测得的数值进行比较(在以下测试过程中称为“三色均值比较法”);

其二, 采用传统的彩色图像质量评估方法, 即将彩色图像的亮度层信息提取出来, 然后用灰度图像处理的 MSE, PSNR, 以及 MSSIM 方法对该亮度层信息进行处理, 得到的数值再与用 M<sub>-QSVD</sub> 方法测得的数值进行比较。(在以下测试过程中称为“亮度层比较法”)

首先, 我们用“三色均值比较法”的思路分别对四种方法做出对比分析, 图 9 给出了 Lena 图像不同类型不同级别的失真图像, 及各种方法计算得到的数值。图 9(a) 中的 INF 表示无限大的值。

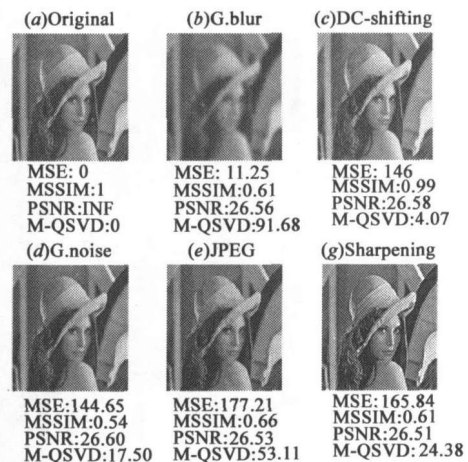


图 9 利用“均值比较法”将各种评估方法应用于 Lena 图像中的比较结果

根据不同方法的定义, 我们知道: MSE 的数值越小, 表明图像质量越好; PSNR 的数值越大, 图像质量越好; 对于 MSSIM 方法来说也是数值越大, 图像质量越好; 而对于 M<sub>-QSVD</sub> 而言, 数值越小, 图像质量越好。

我们通过主观判断不难发现: 图 9(b) 的质量明显比图 9(c) 差, 但图 9(b) 中 MSE 的值为 11.25, 而在图 9(c) 中为 146,

说明图 9(b) 质量远远比图 9(c) 好, 显然与我们的主观判断不符. 而由 M-QSVD 计算图 9(b) 和图 9(c) 得到的数值分别是 91.68 和 4.07, 说明图 9(c) 的质量远好于图 9(b), 该结论与我们的主观评价结果相符.

图 9(c) 和图 9(e) 的 PSNR 的数值几乎没有差异, 说明是这两幅图像质量应该一致; 而我们的主观结论是图 9(c) 质量优于图 9(e). 从两图 M-QSVD 的数值可以发现图 9(c) 的 M-QSVD 值远小于图 9(e) 的值, 说明图 9(c) 图像质量比图 9(e) 图像质量好, 符合主观评价结果.

图 9(d) 中 MSSIM 值小于图 9(e) 的值, 说明图 9(d) 质量比图 9(e) 差, 显然与我们的主观判断不符, 而图 9(d) 和图 9(e) 计算得出的 M-QSVD 值则说明图 9(d) 质量比图 9(e) 好, 与主观评价结果相符.

同样根据这种“三色均值比较法”的思路, 我们分别用四种方法对 Baboon 图像在不同类型不同级别的失真图像进行处理, 也得到了类似的结果. 所以, 在“三色均值比较法的思路”下, M-QSVD 法较之于 MSE, PSNR 以及 MSSIM 法而言, 更加符合人眼主观视觉评价.

接下来, 我们用“亮度层比较法”的思路分别对 MSE, PSNR, MSSIM 以及提出的 M-QSVD 法做出对比分析, 图 10 给出了 Baboon 图像不同类型不同级别的失真图像, 及各种方法计算得到的数值. 图 10(a) 中的 INF 表示无限大的值. 我们通过主观判断不难发现: 图 10(c) 的质量明显比图 10(e) 好, 但 MSE 值在图 10(c) 中为 675.86, 而在图 10(e) 中为 661.54, 说明图 10(e) 的质量比图 10(c) 好, 显然与我们的主观判断不符. 而由 M-QSVD 计算图 10(c) 和图 10(e) 得到的数值分别是 7.89 和 97.26, 说明图 10(c) 的质量远好于图 10(e), 该结论与主观评价结果相符.

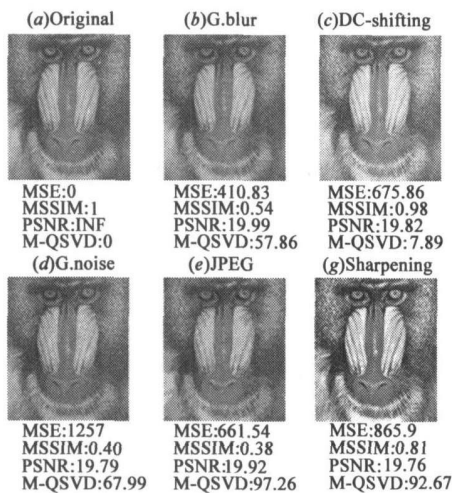


图 10 利用“亮度层比较法”将各种评估方法应用于 Baboon 图像中的比较结果

图 10(d) 和图 10(f) 的 PSNR 的数值几乎没有差异, 即 PSNR 数值判别的结论是这两幅图像质量一致; 而我们主观感觉图 10(d) 质量优于图 10(f). 比较二图中 M-QSVD 的数值可以发现, 图 10(d) 的 M-QSVD 值远小于图 10(f) 的 M-QSVD 值. 说明图 10(d) 质量比图 10(f) 好, 符合主观评价结果.

图 10(b) 的 MSSIM 值小于图 10(f) 的值, 说明图 10(b) 质

量比图 10(f) 差, 显然与我们的主观判断不符, 而图 10(b) 和图 10(f) 的 M-QSVD 值则说明图 10(b) 质量比图 10(f) 好, 与主观评价结果相符.

我们同样根据这种“亮度层比较法”的思路对 Lena 图像进行处理, 也得到了类似的结果. 说明在“亮度层比较法的思路”下, M-QSVD 法较之于 MSE, PSNR 以及 MSSIM 法更符合人眼主观视觉评价.

我们根据图 1 的图像在各种失真情况下进行了大量的测试, 其结果都与上述结果类似. 由于文章篇幅的限制, 我们没有列出全部的结果. 我们的结论是: 无论在何种情况下, 提出的 M-QSVD 法较之于 MSE, PSNR 以及 MSSIM 法而言都更加符合人眼主观视觉评价. QSVD 法应用于彩色图像质量评估能够比较客观、准确地反应出图像质量的高低, 其图形化的方法使得评估过程变得更加简单直观, 其数值化的评估结果也与人类主观评价结果较吻合.

## 5 结论

本文提出的彩色图像质量评估方法: 超复数奇异值分解 (QSVD) 法摆脱传统方法仅仅提取彩色图像亮度层信息进行处理的束缚, 直接用超复数对彩色图像进行建模, 并且提取出彩色图像固有的稳定的能量特征——超复数奇异值作为图像质量评估的依据, 采用图形化与数值化相结合的方法, 不仅能很好地分辨出图像的失真等级, 还能分辨出图像的失真类型. 与目前已知的彩色图像质量的客观评估方法 (如 MSE, PSNR 和 MSSIM 等) 的比较结果表明: 提出的方法优于它们.

## 参考文献:

- [1] A M Eskicioglu. Quality measurement for monochrome compressed images in the past 25 years [A]. Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. Istanbul, Turkey: IEEE ICASSP, 2000. 1907–1910.
- [2] A M Eskicioglu and P S Fisher. A survey of image quality measures for gray scale image compression [A]. Computing in Aerospace Conference [C]. San Diego, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993. 49–61.
- [3] W K Pratt. Digital Image Processing [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1991.
- [4] J O Limb. Distortion criteria of the human viewer [J]. IEEE Transactions on Systems, 1979, 9(6): 778–793.
- [5] H L Snyder. Image Quality: Measures and Visual Performance [M]. New York: Flat Panel Displays and CRTs, L E Tannas Jr, Ed Van Nostrand Reinhold, 1985. 70–90.
- [6] A K Jain. Fundamentals of Digital Image Processing [M]. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989.
- [7] J L Mannos, D J Sakrison. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(4): 525–536.
- [8] D J Sakrison. On the role of the observer and a distortion measure in image transmission [J]. IEEE Transactions on Communications, 1977, 25(11): 1251–1267.

- [9] C F Hall. Subjective evaluation of a perceptual quality metric [A]. Proceedings of SPIE. Image Quality [C]. USA: SPIE, Patrick S. Cheatham, 1981. 200– 204.
- [10] D J Granrath. The role of human visual models in image processing[J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(5): 552– 561.
- [11] F X J Lukas, Z L Budrikis. Picture quality prediction based on a visual model[J]. IEEE Transactions on Communications, 1982, 30(7): 1679– 1692.
- [12] N B Nil. A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment[J]. IEEE Transactions on Communications, 1985, 33(6): 551– 557.
- [13] H Marmolin. Subjective MSE measures[J]. IEEE Transactions on Systems, 1986, 16(3): 486– 489.
- [14] C S Stein, A B Watson, L E Hitchner. Psychophysical rating of image compression techniques[A]. Proceedings of SPIE. Human Vision, Visual Processing, and Digital Display [C]. USA: SPIE, Bernice E. Rogowitz, 1989. 198– 208.
- [15] S J P Westen, R L Legendijk, J Biemond. Perceptual image quality based on a multiple channel HVS model[A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. Detroit USA: IEEE ICA SSP, 1995. 4: 2351– 2354.
- [16] M P Eckert, A P Bradley. Perceptual quality metrics applied to still image compression[J]. Signal Processing, 1998, 70(3): 177– 200.
- [17] P Franti. Blockwise distortion measure for statistical and structural errors in digital images[J]. Signal Processing on Image Communication, 1998, 13(2): 89– 98.
- [18] T Eude, A Mayache. An evaluation of quality metrics for compressed images based on human visual sensitivity[A]. Proceedings of 4th International Conference on Signal Processing [C]. Beijing, China: ICSP, 1998. 1: 779– 782.
- [19] K J Hermiston, D M Booth. Image quality measurement using integer wavelet transformations[A]. Proceedings International Conference on Image Processing [C]. Kobe, Japan: ICIP, 1999. 293– 297.
- [20] Z Wang, A Bovik. A universal image quality index[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81– 84.
- [21] A M Eskicioglu, P S Fisher. Image quality measures and their performance [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(12): 2959– 2965.
- [22] D R Fuhmann, J A Baro, J R Cox Jr. Experimental evaluation of psychophysical distortion metrics for JPEG- encoded images [J]. Journal of Electronic Imaging, 1996, 4(4): 397– 406.
- [23] R J Beaton. Quantitative models of image quality[A]. Proceedings of the Human Factors Society 27th Annual Meeting [C]. Santa Monica, USA: Human Factors & Ergonomics Society, 1983. 41– 45.
- [24] A Shnayderman, A Gusev, A M Eskicioglu. An SVD-based grayscale image quality measure for local and global assessment[J]. IEEE Transactions on Image Process, 2005, 14(2): 422– 429.
- [25] S Wolf, M Pinson, C Jones, A Webster. A summary of methods of measurement for objective video quality parameters based on the sobel filtered image and the motion difference image [OL]. <http://www.its.bldrdoc.gov/n3/video/pdf/t1a93152.pdf>, 1993 08/ 2006 05 10.
- [26] Z Wang, A C Bovik, H R Sheikh, E P Simoncelli. Image quality assessment: From error measurement to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Process, 2004, 13(4): 600– 612.
- [27] Nicolas Le Bihan, Jerome Mars. Singular value decomposition of quaternion matrices: a new tool for vector sensor signal processing[J]. Signal Processing, 2004, 84(7): 1177– 1199.
- [28] W R Hamilton. Elements of Quaternions[M]. London: Longmans, Green and CO, 1866.
- [29] L A Wolf. Similarity of Matrices in which Elements are Real Quaternions [D]. USA: University of Wisconsin Madison, Bull. Amer. Math. Soc., 1936. 737– 743.
- [30] F Zhang. Quaternions and matrices of quaternions[J]. Linear algebra and its applications, 1997, 251(1): 21– 57.
- [31] S C Pei, J J Ding, J H Chang. Efficient implementation of quaternion Fourier transform, convolution, and correlation by 2-D FFT[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(11): 2783– 2797.
- [32] C J Evans, S J Sangwine, T A Ell. Color sensitive edge detection using Hypercomplex filters[A]. European Signal Processing Conference [C]. Tampere, Finland: Processing EUSIPCO, 2000.

#### 作者简介:



叶 佳 女, 1982 年 6 月出生于四川成都, 2004 年毕业于电子科技大学电子工程专业, 现为复旦大学电子工程系硕士研究生. 主要从事数字信号与图像处理等的研究.

E-mail: queena606@hotmail.com



张建秋 男, 1962 年生于湖南省隆回县, 教授、博士生导师, IEEE 高级会员. 1982 年在华东工程学院(现南京理工大学)获得学士学位, 于 1982 年在兵器工业部 544 厂参加工作任助理工程师, 自 1987 年至 1998 年 1 月在哈尔滨工业大学电气工程系学习和工作; 获硕士学位(1992 年)和博士学位(1996 年); 任讲师(1989)和副教授(1995 年), 1998 年 2 月至 1998 年 12 月在芬兰赫尔辛基工业大学智能功率电

子研究院工作, 任职 Visiting Research Scientist; 1999 年 1 月至 2002 年 7 月在英国格林威治大学工程学院工作, 任职 Postdoctoral Research fellow (博士后)和 Senior Research Fellow. 现任复旦大学电子工程系教授、博士生导师, 主要研究领域有信息处理理论及其在测量和仪器、新型传感器、控制和通信中的应用. E-mail: jzhang01@fudan.edu.cn