

## 结构信息最优的静止图像压缩算法研究

杨春玲 高文瑞 曹端武

(华南理工大学电子与信息学院 广州 510640)

**摘要:** JPEG2000 是基于小波变换的新一代静止图像压缩标准, 与以往的压缩标准相比, 其具有很多优点。但是 JPEG2000 以 MSE 作为图像失真评价标准, 而 MSE 不能很好的符合人眼主观评分, 进而极大地影响了 JPEG2000 的压缩性能。该文在 JPEG2000 标准框架下, 提出了以结构相似度作为失真评价标准的静止图像压缩算法 (SJPEG2000)。该算法以系数对图像结构信息贡献量的大小作为准则来截取码流, 使压缩后的图像尽量保存原图像的结构信息。实验结果表明, 该算法压缩得到的图像很好地保留了图像结构信息, 压缩图像的主观质量得到提高, 结构相似度值较原 JPEG2000 也有一定提高。

**关键词:** 图像压缩; JPEG2000; 结构相似度; 小波变换

**中图分类号:** TN919.81

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2010)07-1574-06

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2009.00983

## Still Image Compression Algorithm Based on Structural Information Optimization

Yang Chun-ling Gao Wen-rui Cao Duan-wu

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** JPEG2000 is a new still image compression standard based on wavelet transform. Compared with previous compression standards, it has a lot of advantages. However, in JPEG2000 the image distortion evaluation criteria is MSE, and MSE can not correlate very well with subjective ratings. So compression performance of JPEG2000 is affected greatly. In this paper, a still image compression algorithm SJPEG2000 that uses SSIM (Structural SIMilarity) as the distortion evaluation criteria is proposed under the framework of JPEG2000 standard. In order to let the compressed images retain more structural information, the algorithm intercept stream according to the contribution of the image structural information. Experimental results show that the images compressed by this algorithm retain much more structural information than original JPEG2000 and the corresponding SSIM value is also improved.

**Key words:** Image compression; JPEG2000; SSIM(Structural SIMilarity); Wavelet transform

### 1 引言

新一代静止图像编码标准 JPEG2000 是一种基于小波变换的图像压缩方法, 相比 JPEG 有着良好的性能如: 压缩率比 JPEG 高约 30%左右; 同时支持有损和无损压缩; 能实现渐进传输等。JPEG2000 这些优异特性的实现除了依赖于小波变换的良好性能外, 最主要的是依靠 EBCOT(Embedded Block Coding with Optimized Truncation)算法的良好表现。

由于 EBCOT 算法的性能表现直接影响着 JPEG2000 压缩算法整体的表现, 一直以来对

JPEG2000 的研究主要集中在对 EBCOT 算法的优化上。对 EBCOT 算法的研究主要集中在编码通道扫描时间的优化和 PCRD(Post-Compression Rate-Distortion)性能的改进, 如: Masuzaki 等首先提出了基于训练图像的 JPEG2000 快速码率控制算法<sup>[1]</sup>, Chang 等提出了基于舍弃最小率失真斜率的 MSD(Minimal Slope Discarding)算法<sup>[2]</sup>和 Yeung 等提出了基于优先级扫描编码的 PSRA(Priority Scanning Rate Allocation)算法<sup>[3]</sup>等。对 EBCOT 算法中的图像质量评价方法的研究相对较少, 只有近期由 Richter 和 Kim 提出的基于 MS-SSIM 的 JPEG2000 编码算法<sup>[4]</sup>。对此进行了相关研究。而图像质量评价算法在 EBCOT 中起着很重要的作用, 直接影响着 PCRD 部分对码流的选取, 进而影响压缩后图像的质量。

2009-07-07 收到, 2009-12-18 改回

国家自然科学基金(60972135, 60402015)和广东省自然科学基金(06025642)资助课题

通信作者: 杨春玲 eeclyang@scut.edu.cn

MSE 因其计算简单, 意义直观一直作为 EBCOT 算法中默认的图像质量评价标准, 而 MSE 作为图像质量评价标准得到的结果与主观评价得到结果一致性比较差<sup>[5]</sup>, 从而影响 JPEG2000 压缩图像的质量。所以研究一个和主观评分相关性高的评价标准替代 MSE 作为 JPEG2000 的图像质量评价标准有重要的意义。

Wang 等提出的结构相似度(SSIM)图像质量评价方法<sup>[6]</sup>, 具有计算简单, 易于实现等特点, 并且已通过大量实验证明 SSIM 是和主观评分相关性很高的图像质量评价方法。由于 SSIM 具有计算简单和主观评分相关性高等优点, 受到了很大的关注, 很多学者对其进行了深入研究, Wang 提出了多尺度结构相似度 MS-SSIM 和复数小波域结构相似度 CW-SSIM<sup>[7]</sup>, 本研究小组也提出了基于梯度信息的结构相似度 GSSIM<sup>[8]</sup>和小波域的结构相似度 DWTSSIM<sup>[9]</sup>。由于结构相似度的优越性, SSIM 已经被国际视频质量专家组(VQEG)推荐为主要的图像和视频质量评价方法之一<sup>[10]</sup>, 并被国际视频压缩专家组采纳, 用来评价最新的国际视频压缩标准 H.264 的视频压缩质量<sup>[11]</sup>。在静止图像压缩中, Richter 和 Kim 提出的基于 MS-SSIM 的 JPEG2000 编码算法<sup>[4]</sup>和 Wang 提出的基于 SSIM 的 SPIHT 编码算法<sup>[12]</sup>也都很好地提高了压缩图像的主观质量。但是 Richte 算法中所使用的 MS-SSIM 和 Wang 算法中所使用的 SSIM 都是空间域的质量评价算法, Wang 在算法中进行了频繁的频域和空间域之间的转换使得算法非常复杂, Richte 在算法中对空间域和小波域进行了近似, 从而使得算法比较复杂且存在一定的不准确性。

为了将 SSIM 直接应用于小波域静止图像压缩编码算法中, 避免编码过程中图像在频域和空间域之间转换的复杂性和不准确性, 文献[9]研究并提出的小波域的 SSIM(DWTSSIM), 取得了较好的图像质量评价效果。在此基础上, 本文把 DWTSSIM 应用在 JPEG2000 编码算法中作为图像质量评价标准提出了基于 SSIM 的 JPEG2000 图像压缩编码算法(SJPEG2000)。

## 2 基于结构相似的图像质量评价方法

### 2.1 结构相似度

文献[6]认为, 人在观察图像时, 主要提取结构信息, 因此结构信息的失真大小是评判图像失真质量的重要度量, 可用SSIM评价图像质量。

$$\text{SSIM}(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (1)$$

其中  $l(x, y)$ 、 $c(x, y)$ 、 $s(x, y)$  分别为亮度比较、对比

度比较和结构信息比较, 参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为3个部分的权重系数(详见文献[6][6])。

对整幅图像进行质量评判时, 把该图像和其相关的原图像分为重叠或不重叠的图像块, 对每个图像块利用式(1)进行评分, 得到该图像块的结构相似度, 取平均得到整幅图像的结构相似度为

$$\text{MSSIM}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \text{SSIM}(x_j, y_j) \quad (2)$$

$\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$ 分别表示原图像和降质图像,  $x_i$ 、 $y_i$ 分别表示原图像和降质图像的第*i*个图像块,  $M$ 为图像块数。MSSIM值越大, 表明图像质量越好。

### 2.2 小波域的SSIM(DWTSSIM)

为了在小波域研究结构信息最优的静止图像压缩方法, 我们已研究了图像的结构信息在小波域的表现特性, 提出了小波域的结构相似度(DWTSSIM)<sup>[9]</sup>。DWTSSIM的具体实现方法为: 对失真图像和原图像进行多级小波变换, 得到该图像的小波变换系数; 利用式(1)和式(2)计算每个频带的结构相似度 DWTSSIM( $x_i, y_i$ ); 对所有频带的 DWTSSIM( $x_i, y_i$ ) 求加权和得到整幅图像的小波域结构相似度 DWTSSIM( $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ )为

$$\text{DWTSSIM}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i \text{DWTSSIM}(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad (3)$$

式(3)中,  $x_i$ 和  $y_i$ 分别表示原图像和失真图像的第*i*个分解级的小波系数,  $N$ 为图像的小波分解频带数,  $\omega_i$ 为各个频带的权值(参数的选择具体参见文献[9])。

由于充分利用了小波域不同频率成分的特点, DWTSSIM取得了很好的评判结果。本文把 DWTSSIM应用在 JPEG2000 编码算法中作为图像质量评价准则, 在 JPEG2000 框架下提出了基于 SSIM 的静止图像压缩编码算法(SJPEG2000)。

## 3 基于 SSIM 的 JPEG2000 图像压缩算法

由文献[9]可得, DWTSSIM 的评价结果和主观评分有非常好的一致性。因此将 DWTSSIM 作为图像失真的评价标准应用在 JPEG2000 压缩编码算法中, 能充分利用其和主观评分相关性高的优点, 使 JPEG2000 压缩图像的主观质量得到提高。

JPEG2000 中计算失真的度量公式为

$$D = G_b \times \sum_{i=1}^n (y_p[i] - y[i])^2 \quad (4)$$

式(4)中  $y_p$  为编码到  $p$  平面时解码后的 DWT 系数值,  $y$  是 DWT 系数原来的样本值;  $G_b$  为小波变换

子频带的能量增益,其值和具体的小波变换级数及所选取的小波有关; $n$ 为系数的个数。

从位平面  $p+1$  到  $p$  时失真改善大小的计算公式为

$$\Delta D = G_b \times \sum_{i=1}^n [(y_{p+1}[i] - y[i])^2 - (y_p[i] - y[i])^2] \quad (5)$$

$\Delta D$  为失真改善值,  $y_{p+1}$  为 DWT 系数编码到  $p+1$  平面时解码后的值,  $y_p$  为 DWT 系数编码到  $p$  平面时解码后的值。

由 SSIM 的定义得到 SSIM 的取值范围为  $0 \sim 1$ , 并且各个频带的 SSIM 变化是独立的。因此,各个频带 SSIM 值的变化不能代表该频带系数变化给整幅图像带来的失真值,也不能体现不同频带之间的差别。所以把 SSIM 应用在 JPEG2000 中不能利用式(4)和式(5),必须对它们进行修改以适应 SSIM 计算的特点。

图像数据经小波分解后,能量主要集中在最低分辨率的低频图像,分辨率级越低,其子图像系数对恢复图像质量的影响越大。低频图像的均值和方差都要比高频图像的大得多,最低频的均值和方差最大,最高频的均值和方差最小。这说明方差可以代表子频图像对重建图像的重要性。因此我们以方差和 SSIM 的乘积作为相应频带对整幅图像造成的结构失真值,以表示该部分系数的变化对重建图像质量的影响。

由以上结论定义结构信息失真度计算公式为

$$D_{ssim_{ip}} = G_b \times \sigma_i \times (1 - SSIM_{ip}) \quad (6)$$

$D_{ssim_{ip}}$  为第  $i$  个子频带编码到位平面  $p$  时的结构信息失真度,  $G_b$  同式(4),为小波子带能量增益,  $\sigma_i$  为第  $i$  子带的方差,  $SSIM_{ip}$  为编码到位平面  $p$  时第  $i$  子带的 SSIM 值。

随着编码位平面的增多,编码图像块相对于原图像块的结构信息失真度减小,可用不同位平面编码后结构信息失真度的差表示结构信息失真的改善程度,因此从位平面  $p+1$  到  $p$  时结构信息失真改善大小的计算可定义为

$$\Delta D_{ssim_i} = D_{ssim_{i(p+1)}} - D_{ssim_{ip}} \quad (7)$$

把式(6)代入式(7)得编码从位平面  $p+1$  到  $p$  时,结构信息失真改善值的计算公式:

$$\Delta D_{ssim_i} = G_b \times \sigma_i \times (SSIM_{ip} - SSIM_{i(p+1)}) \quad (8)$$

$\Delta D_{ssim_i}$  为第  $i$  频带的 SSIM 由  $p+1$  平面编码到  $p$  平面时的结构信息失真改善值,  $SSIM_{i(p+1)}$  为 DWT 系数编码到  $p+1$  平面时的 SSIM 值,  $SSIM_{ip}$  为 DWT 系数编码到  $p$  平面时的 SSIM 值。

由人眼的视觉特性知道人眼对不同的频带敏感

度不同,所以通过对小波域各频带加权可以提高压缩图像的主观质量。为了进一步提高压缩效果,在本算法中也对各频带进行了加权,权值的选取方法同文献[9]中一样。

由于 JPEG2000 的编码以编码块为单位,所以具体算法中以编码块为单位计算方差和 SSIM 值。基于 JPEG2000 中位平面编码为通道扫描编码,且失真贡献的计算为每次通道扫描前后的失真变化,所以具体算法中 SSIM 值的改进计算也以每次通道扫描为单位。

由 SSIM 取代 MSE 作为失真评价标准只涉及到 EBCOT 算法的 Tiler1 部分, Tiler2 部分不需改动,仍保持原来的算法。基于 SSIM 的 JPEG2000 压缩方法 Tiler1 部分具体实现如下:

(1)在对编码块进行通道扫描前先计算该编码块的方差  $\sigma_i$ ,并将其保存,供该编码块的所有通道使用。

(2)对每次通道扫描:通道扫描前计算该编码块的结构相似度  $SSIM_b$ ,通道扫描后再次计算该编码块的 SSIM 值  $SSIM_a$ ,然后计算两个 SSIM 值的差值  $\Delta SSIM$ ,计算公式见式(9),以  $\Delta SSIM$  取代式(8)中的 SSIM 差值计算( $SSIM_{ip} - SSIM_{i(p+1)}$ ),得到该通道编码比特对该编码块 SSIM 的贡献。

$$\Delta SSIM = SSIM_a - SSIM_b \quad (9)$$

(3)小波子带能量增益  $G_b$  仍按 JPEG2000 中原算法计算。

(4)计算通道的结构失真改善值  $\Delta D_{ssim}$ 。将以上各步计算得到小波能量增益  $G_b$ ,方差  $\sigma_i$  和该通道对编码块 SSIM 的贡献值  $\Delta SSIM$  代入式(8)计算得到该通道  $\Delta D_{ssim}$ 。

(5)最后,将得到的  $\Delta D_{ssim}$  乘以设定好的子带权值得到加权的通道结构失真贡献值,将其保存供 Tier-2 部分使用。

由于 SSIM 的计算较 MSE 稍复杂,且又增加了各编码块方差的计算,所以基于 SSIM 的 JPEG2000 压缩编码方法(SJPEG2000)比 JPEG2000 要复杂。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 实验环境

(1)文中提出的 SJPEG2000 压缩算法是在 JPEG2000 的参考软件 Jasper-1.900.1 的基础上修改而成,只对算法中 Tiler1 部分做了修改,其他部分保持了原算法。

(2)实验中选取的小波分解级为五级、编码块大小为  $32 \times 32$ 。

(3)实验中所用的子带系数与文献[7]中使用的

一样, 如五级小波变换下各个子带系数分别为  $W_i = \{0.1479, 0.1735, 0.1745, 0.1727, 0.1701, 0.1613\}$ ,  $i=0,1,\dots,5$  为子带编号。

(4) 实验中使用的电脑配置为: Pentium(R) Dual-Core CPU 2.6GHz, 2G内存, 操作系统为: Microsoft Windows XP SP3。

### 4.2 实验结果及分析

由于本文所提算法以提高压缩图像的主观质量

为目的, 所以本节采用和主观评分相关性高的 MSSIM 和 DWTSSIM 来对压缩后得到的图像进行质量评价。对 8 幅典型的测试图像在 9/7 小波压缩模式下进行了各种压缩比的实验, 图 1-图 4, 及表 1 给出了实验结果。

(1) 解码图像的视觉效果比较 压缩比为 33 时, SJPEG2000 和 JPEG2000 对 paintedhouse 的压缩图像分别示于图 1(b)和 1(c), 可以看到图 1(b)的房

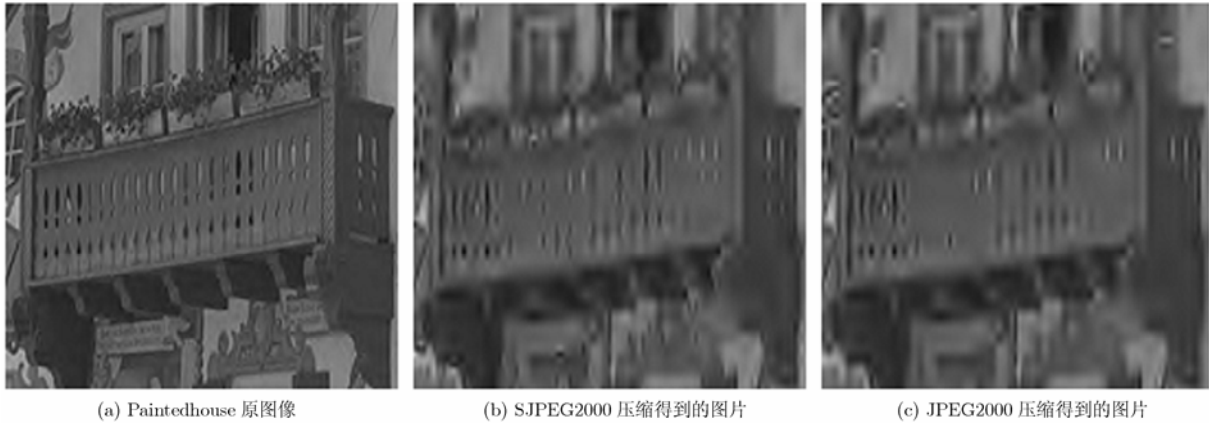


图 1 paintedhouse 9/7 小波压缩模式压缩比为 33, SJPEG2000 和 JPEG2000 压缩图像比较

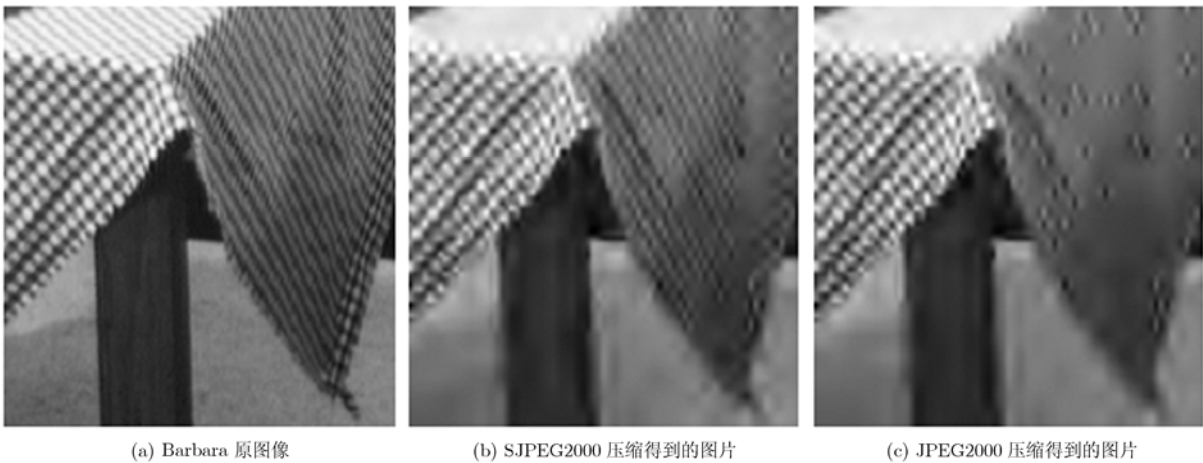


图 2 Barbara 9/7 小波压缩模式压缩比为 50, SJPEG2000 和 JPEG2000 压缩图像比较

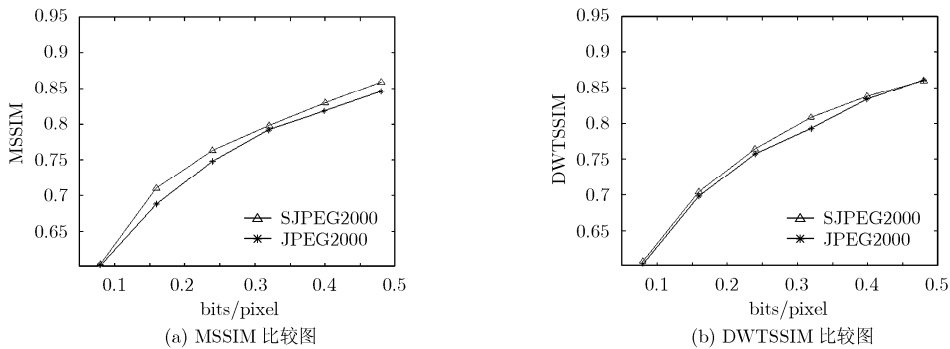


图 3 paintedhouse 图像各种压缩比下的 SJPEG2000 和 JPEG2000 压缩性能比较

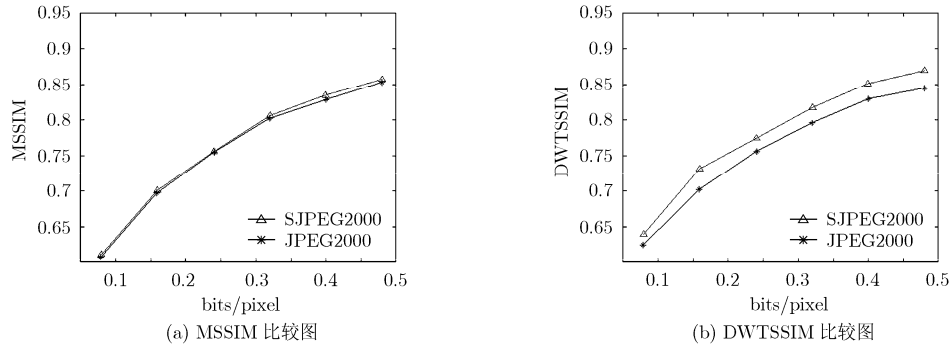


图 4 sailing 图像各种压缩比下的 SJPEG2000 和 JPEG2000 压缩性能比较

表 1 压缩比为 25 时, SJPEG2000 和 JPEG2000 的性能比较

图像	基于 SSIM 的 JPEG2000		JPEG2000	
	MSSIM	DWTSSIM	MSSIM	DWTSSIM
buildings	0.7534	0.7624	0.7458	0.7567
caps	0.9287	0.9367	0.9268	0.9284
cemetery	0.7463	0.7810	0.7349	0.7752
lena	0.9101	0.9159	0.9095	0.9162
lighthouse	0.8384	0.8497	0.8281	0.8462

子阳台栏杆的结构轮廓比图 1(c)要更加丰富和清晰,这说明 SJPEG2000 压缩图像比 JPEG2000 压缩图像保留了更多的结构信息。

图 2 给出了 barbara 图像在压缩比为 50 时, SJPEG2000 和 JPEG2000 压缩图像。可以看到,由 SJPEG2000 压缩得到的图 2(b)比由 JPEG2000 压缩得到的图 2(c),保留了更多的桌布纹理信息。

(2) paintedhouse 和 sailing 图像压缩编码客观质量比较和分析 图 3 为 paintedhouse 图像在各种压缩比下的 SJPEG2000 和 JPEG2000 压缩性能比较,从图中可以看到在高压压缩比下 SJPEG2000 性能要优于 JPEG2000, MSSIM 值和 DWTSSIM 值都有一定提高,在压缩比较低的情况下 SJPEG2000 和 JPEG2000 的性能相当。原因是 SJPEG2000 以对图像结构的贡献量为选择标准,所以在高压压缩比下保留的对结构信息的贡献量大的系数要多于 JPEG2000,而随着压缩比的提高无论是 SJPEG2000 还是 JPEG2000 对图像结构影响较大的系数都能得到编码。还可以得到,对于图像 paintedhouse,其 MSSIM 的提高要高于 DWTSSIM,原因是 paintedhouse 的图像结构表现为宽大的块信息和纹理,在小波域主要表现为中低频系数,而高压压缩比下编码的主要是低频系数,所以 MSSIM 值要高于比较侧重于中高频的质量评价

的 DWTSSIM。

图 4 为 sailing 图像各种压缩比下的 SJPEG2000 和 JPEG2000 压缩性能比较。从图中可以得到, SJPEG2000 和 JPEG2000 的性能比较同图 3 基本相同,但是 MSSIM 值的提高不如图 3 提高的多,而 DWTSSIM 的提高相比来说提高幅度增大不少。这是因为 sailing 图像内容主要由宽阔的海面和天空组成,所以结构信息很少且结构都表现为非常细微的小边缘。Sailing 图像经小波变换后,它的结构信息主要分布在中高频,低频很少,所以在压缩比非常高的情况下 SJPEG2000 也不能保存很多结构信息,其性能和 JPEG2000 相比提高很少。同时也可以得到 sailing 图像 SJPEG2000 的 DWTSSIM 值提高高于 paintedhouse 图像的原因,即: DWTSSIM 图像质量评价方法比较侧重于中高频,而 sailing 图像的结构信息主要分布在中高频。

(3) 其余 5 幅图像实验结果 表 1 为压缩比 25:1 下 5 幅图像 SJPEG2000 和 JPEG2000 的性能比较。从表中可以看到,这 5 幅图像 SJPEG2000 的压缩性能也同样优于 JPEG2000, MSSIM 值和 DWTSSIM 值都有一定的提高。但是由于图像具体结构的不同, SJPEG2000 在每幅图像上的性能表现并不相同,有的提高较大有的提高较小,且 MSSIM 值和 DWTSSIM 值的提高也不相同。

通过上面的分析可以得到 SJPEG2000 的性能在 MSSIM 和 DWTSSIM 上优于 JPEG2000,在压缩比较高的情况下保留了较多的结构信息,从而提高了图像的主观质量。但同时也看到, SJPEG2000 和图像的结构信息相关性很大,对不同结构的图像性能表现不同,对结构轮廓较大的图像压缩性能要好于结构轮廓较小的图像。

(4) SJPEG2000 算法复杂度分析 虽然 SJPEG2000 的压缩性能在 MSSIM 和 DWTSSIM 上都优于 JPEG2000,但是由于 SSIM 的计算复杂度要高于 MSE,所以 SJPEG2000 的压缩编码计算

复杂度要高于 JPEG2000。分别用 JPEG2000 和 SJPEG2000 算法对  $512 \times 512$  的 Barbara 灰度图像做仿真实验, 不同码率下 JPEG2000 的压缩编码时间一般在 0.3–0.4 s, 而 SJPEG2000 的压缩编码时间一般在 2 s 左右。产生如此大的编码时间差异原因有两个, 其一, SSIM 的计算确实比 MSE 的计算复杂度高; 其二, 在 jasper 软件中, JPEG2000 的实现算法已经过优化, MSE 失真通过直接查表得到的, 大大节约了压缩编码时间, 而 SJPEG2000 中的 SSIM 值需每次计算得到, 很大程度增加了压缩编码时间。

## 5 结论

本文在 JPEG2000 的压缩标准框架下提出了基于 SSIM 的静止图像压缩编码方法(SJPEG2000)。SJPEG2000 是一种以 SSIM 为失真评价准则的压缩编码算法, 优先编码对图像结构贡献大的系数, 从而尽量保留更多的图像结构信息, 提高压缩图像的主观质量。从实验结果来看 SJPEG2000 性能要比 JPEG2000 好, 压缩图像保留了更多的结构信息, 并且主观质量得到提高。但是 SJPEG2000 和图像的结构特性有很大的相关性, 对大轮廓图像性能改善较明显, 细节较多的图像性能改善不太明显。且由于 SSIM 的计算比 MSE 的计算相对复杂, SJPEG2000 的编码算法复杂度比 JPEG2000 要高。进一步提高 SJPEG2000 的编码性能、优化 SJPEG2000 程序, 将是下一步研究的重点。

## 参考文献

- [1] Masuzaki T, Tsutsui H, and Izumi T, *et al.* JPEG2000 adaptive rate control for embedded systems. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Arizona, USA, 26–29 May, 2002, (4): 333–336.
- [2] Chang Te-hao, Chen Li-lin, and Lian Chung Jr, *et al.* Computation reduction technique for loss JPEG2000 encoding through EBCOT tier-2 feedback processing. *Proc. IEEE International Conference on Image processing*, Rochester, NY, Jun., 2002, (3): 85–88.
- [3] Yeung Y M and Au O C. Efficient rate control for JPEG2000 image coding. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(3): 335–344.
- [4] Richter T and Kim Kil-Joong. A MS-SSIM optimal JPEG 2000 encoder. 2009 Data Compression Conference, Snowbird, UT, USA, March, 2009: 401–410.
- [5] Girod B. What's wrong with mean-squared error. *Digital Images and Human Vision*. MIT Press Cambridge, MA, USA 1993: 207–220.
- [6] Wang Z and Bovik A C. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600–612.
- [7] Wang Z and Simoncelli E P. Translation insensitive image similarity in complex wavelet domain. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Pennsylvania, Mar., 2005. Vol. 2: 573–576.
- [8] 杨春玲, 陈冠豪. 基于梯度信息的图像质量评判方法的研究. *电子学报*, 2007, 35(7): 1313–1317.  
Yang Chun-ling and Chen Guan-hao. Gradient information based image quality assessment. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(7): 1313–1317.
- [9] 杨春玲, 高文瑞. 基于结构相似度的小波域图像质量评价方法的研究. *电子学报*, 2009, 37(4): 845–849.  
Yang Chun-ling and Gao Wen-rui. Research on image quality assessment in wavelet domain based on structural similarity. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(4): 845–849.
- [10] Video Quality Experts Group(VQEG), SSIM index for image quality assessment. <http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/links/links.php>.
- [11] Suhring K. H.264/AVC Reference Software. <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/download/>, 2007.8.
- [12] Wang Z and Li S X. Perceptual image coding based on a maximum of minimal structural similarity criterion. *ICIP 2007*, Antonio, Texas, 2007, (2): 121–124.

杨春玲: 女, 1970 年生, 教授, 研究方向为图像/视频压缩、图像质量评价。

高文瑞: 男, 1984 年生, 硕士生, 研究方向为图像压缩。

曹端武: 男, 1986 年生, 硕士生, 研究方向为图像压缩。