

包装印刷

基于 DWT-SVD 的可伸缩图像渐进性水印算法

陈青, 熊蒙, 周广州
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 提出基于 DWT-SVD 的可伸缩图像渐进性水印算法, 可用于可伸缩图像的版权保护, 对可伸缩图像的安全技术具有重要的意义。**方法** 对载体图像进行三级小波分解, 确保能量的集中, 减小因攻击对水印信息的影响; 对各个小波分解的子带都进行 $H \times H$ 不重复分块, 对每个子块进行奇异值分解, 并计算第 1 个奇异值, 以便选取合适的嵌入强度, 经综合考虑, 该算法中嵌入强度选为 5; 将灰度水印图像进行 8 个位平面分解, 根据重要性降低的次序依次嵌入到载体图像三级小波分解和量化后的重要性排序降低的分辨率子带中。**结果** 压缩比从 90~20, 随着压缩比的减小, 提取灰度水印图像的位平面增加, 图像质量不断改善, NC 值逐渐增大。当压缩比在 70 以下时, 对最低频子带系数无影响; 当压缩比增大至 80 以上时, 对最低频子带信息产生一定的影响, 但水印图像依然可以提取。不同攻击和常规的信号处理攻击后各级分辨率均可提取到水印信息, 水印质量随着分辨率增加逐渐变好。**结论** 渐进性提取和鲁棒性仿真实验表明该算法能很好地抵抗压缩攻击和剪切攻击, 并对常规的信号处理攻击具有很好的鲁棒性。

关键词: JPEG2000; 小波; 渐进提取; 信号处理攻击

中图分类号: TS801.3; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0129-05

Progressive Watermarking Algorithm of Scalable Image Based on DWT-SVD

CHEN Qing, XIONG Meng, ZHOU Guang-zhou
(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to put forward the progressive watermarking algorithm of scalable image based on DWT-SVD, which can be used to protect the copyright of the scalable image and has great signification for security technology of the scalable image. A three-level wavelet of carrier images was decomposed to ensure the energy concentration, thus reducing the impact of attacks on watermark information. The $H \times H$ non-repetitive blocking of sub-bands decomposed by each wavelet was conducted. The singular value of each sub block was decomposed. Then the first singular value was calculated to help select the proper embedding strength. Through comprehensive consideration, the embedding strength of the algorithm was 5. Finally, according to the descending order of importance, the eight bit-plane decomposition of the gray scale watermark image was done to embed it into the three-level wavelet decomposition of carrier image and into the resolution ratio sub-band after quantization. Compression ratio decreased from 90 to 20. With the decrease of compression ratio, the bit plane extracted from gray watermark image was increased, thus image quality was improved and NC value was increased gradually. When the compression ratio was below 70, it would have no influence on the lowest frequency sub-band coefficient. When the compression ratio was increased to above 80, it would have certain effect on the lowest frequency sub-band information, but the watermark image could still be extracted. After different attacks and regular signal processing attacks, watermark information could be extracted from resolution ratios at different levels, while the watermark quality would become better with the resolution ratio increased. The progressive extraction and robustness simulation experiment indicate that this arithmetic can well resist the compression attack and shear attack and it also has better robustness of regular signal processing.

KEY WORDS: JPEG2000; wavelet; progressive extraction; signal processing attacks

收稿日期: 2016-06-30

基金项目: 上海自然科学基金 (12ZR1420800); 国家 863 计划 (2012AA050206)

作者简介: 陈青 (1962—), 女, 博士, 上海理工大学副教授、硕导, 主要研究方向为信号处理。

JPEG2000 由于在低码率下具有良好的压缩性能,同时具有无损、有损压缩和渐进性传输的特点,在互联网及通信技术不断发展的新时代得到了广泛的应用^[1]。渐进传输能允许用户根据其不同需求,对传输的图像进行选择,接收到足够的分辨率或质量后就可以停止传输,进行重构,节省了用户的等待时间,也减少了网络的占用率,因此,设计 JPEG2000 可伸缩图像渐进性的水印技术成为水印研究的一个新的热点。

薛青晨^[2]和于海娇^[3]等提出的水印算法是将 DWT-SVD 变换用于 QR 码中使用,使含水印图像具有很好的鲁棒性,但与 JPEG2000 编解码无关。Subramanyam^[4]和 Chen^[5]提出的水印算法是在 JPEG2000 编码码流中嵌入水印,在解码码流中提取水印,虽有较好的鲁棒性,但经过可伸缩结构压缩后水印会破坏。J.-H Seo^[6]等提出的水印算法是在载体图像小波分解后的所有频带中嵌入水印,但这是一种非盲的水印方式,且没有与 JPEG2000 编解码相结合。Piper^[7]等提出可利用人类视觉系统的特性,改进现有某些分辨率的水印算法,从而达到提升算法性能,使其既具有质量可伸缩又具有分辨率可伸缩的特性,并从一种具有分辨率可伸缩特性的非自适应的算法开始,利用 HVS 的对比度敏感性和纹理掩蔽特性提升算法性能,取得水印算法的质量和分辨率双重可伸缩性。T.P.-C.Chen^[8]等针对 JPEG 图像实现水印的渐进性提取提出的算法,原始图像经过分块后作离散余弦变换,每块 DCT 系数分为 64 个台阶,将水印嵌入每块 AC 系数的前 N 个台阶,在传输过程中 AC 系数优先传送,随着 JPEG 图像渐进性传输,水印信息也能渐进性提取,但算法不适用于 JPEG2000 分辨率可伸缩编码系统。B.Deepayan^[9]等通过修改并设置不同的量化步长的压缩参数,在量化的过程中嵌入非盲的水印,评估 JPEG2000 质量可伸缩图像经过不同的压缩比对水印鲁棒性的影响,该算法在扩大量化步长时会丢弃更多的低位的比特平面,水印图像在给定的压缩率下,具有很好的鲁棒性,但同时水印容量也会下降;当量化步长不变,增加压缩率时,水印算法鲁棒性降低。针对 JPEG2000 在整个图像中加水印,导致水印检测失败;只在数字媒体的最低分辨率中嵌入水印,使高精度的媒体数据得不到保护等问题,文中提出了与 JPEG2000 分辨率可伸缩相适应的渐进性水印算法,即将灰度的水印图像进行位平面分解,根据水印图像的位平面重要性递减的次序依次嵌入到载体图像三级小波分解和量化后的重要性排序降低的分辨率子带中。使得传输不同分辨率码流的 JPEG2000 图像时,都能检测到水印信息,随着图像分辨率增加,检测水印效果逐渐改善。

1 图像及水印处理

1.1 载体图像的三级小波分解

JPEG2000 编码标准提供 2 组小波变换基,其中不可逆的小波是利用 Daubechies(9,7)滤波器组进行处理,可逆的小波是利用(5,3)滤波器组进行处理^[10]。在该压缩标准中,一维行变换和列变换都是采用提升滤波方法^[11]。可逆小波变换的提升算法分解如下:

$$Y(2n+1) = X_{\text{ext}}(2n+1) - \left[\frac{X_{\text{ext}}(2n) + X_{\text{ext}}(2n+2)}{2} \right] \quad (1)$$

$$Y(2n) = X_{\text{ext}}(2n) + \left[\frac{Y(2n-1) + Y(2n+1) + 2}{4} \right] \quad (2)$$

式中: X_{ext} 为输入信号,是已经过周期对称延拓的 LL 子带的列/行数据; Y 为输出信号,仍储存在 X 数据原来的位置上。不可逆小波变换的提升算法^[12]为:

$$\begin{cases} Y(2n+1) \leftarrow X_{\text{ext}}(2n+1) + (\alpha \times [X_{\text{ext}}(2n) + X_{\text{ext}}(2n+2)]) \\ Y(2n) \leftarrow X_{\text{ext}}(2n) + (\beta \times [Y(2n-1) + Y(2n+1)]) \\ Y(2n+1) \leftarrow Y(2n+1) + (\gamma \times [Y(2n) + Y(2n+2)]) \\ Y(2n) \leftarrow Y(2n) + (\delta \times [Y(2n-1) + Y(2n+1)]) \\ Y(2n+1) \leftarrow -K \times Y(2n+1) \\ Y(2n) \leftarrow -(1/K) \times Y(2n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha = -1.5861343$; $\beta = -0.052980118$; $\gamma = 0.882911$; $\delta = 0.4435068$; $K = 1.2301741$ 。

JPEG2000 的有损压缩在高频量一定程度的衰减后容易发生失真^[13],为了确保水印的完整性,文中的可伸缩图像渐进性水印算法选择 5/3 小波变换。Lena 的 RGB 彩色原图图像和经过小波基变换后的三级图像分解见图 1。



图 1 小波分解图像

Fig.1 Image based on wavelet decomposition

1.2 水印图像的设计

在 JPEG2000 编码技术中,水印图像的设计可以设置多种参数,如不同的小波滤波器、小波分解级数、

瓦片分割的大小、质量可伸缩、分辨率可伸缩、ROI 区域等^[14]，虽然这些参数能方便用户根据自己要求来编码图像，但对水印算法的隐蔽性、鲁棒性、容量有很大影响，因此文中使用合适小波滤波器和分解级数，并采用分辨率可伸缩方式解码来设计水印。具体方法如下：JPEG2000 的编解码系统较为复杂，为了不影响编解码系统的正常编解码，将水印嵌入在 JPEG2000 编解码系统的内部，降低水印嵌入和提取算法的复杂度；由于水印在提取时无法使用原始图像数据，因此采用盲水印算法。

1.3 水印内嵌结构

为了使得低分辨率包含水印图像的最高位平面，将最重要的第 8 个位平面信息嵌入载体图像经过 5/3 的三级小波变换后的 LL₃ 低频子带系数中；将第 7 和第 6 个位平面水印信息嵌入 LH₃ 及 HL₃ 子带低频子带系数中；将第 5 和第 4 个位平面水印信息嵌入 LH₂ 及 HL₂ 子带低频子带系数中；将第 3 和第 2 个位平面信息嵌入 LH₁ 及 HL₁ 频带系数中，第 1 位平面嵌入第 HH₁ 频带系数中。水印内嵌结构模型见图 2。

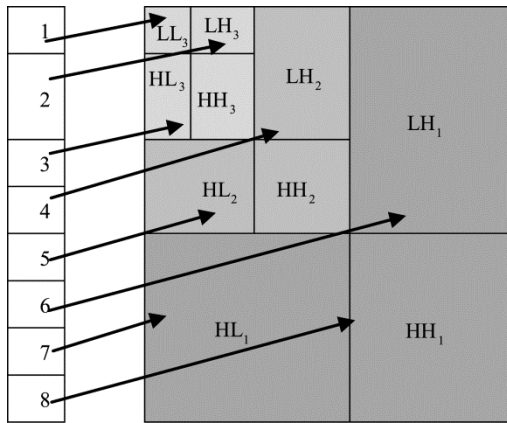


图 2 分辨率可伸缩系统的水印内嵌结构模型

Fig.2 The watermark embedded structure model of scalable system for resolution

2.1 水印的嵌入算法

1) 位平面分解。将维度为 $M \times M$ 的灰度水印图像 W 进行位平面分解，分解得到图像 8 个位平面数据。分别记为 W_i (水印的第 i 位平面值)，水印的位平面分层结构与 JPEG2000 分辨率分解结构相适应。

2) $H \times H$ 分块。输入载体图像小波分解级数为三级，将其经过 JPEG2000 编码器量化后，对各个小波分解的子带都进行 $H \times H$ 不重复分块。

3) 奇异值分解。将每个子带分块进行奇异值分解， $A=USV^T$ ，计算 $Q=\text{round}(S(1,1)/q)$ ，其中： $S(1,1)$ 为每块第一个奇异值； q 为嵌入强度； round 为四舍五入运算。

4) 计算 $\text{mod}(Q+W_i)$ 的值，各个子带分别嵌入位

平面水印信息。

$$S'(1,1) = \begin{cases} (Q-0.5) \times q & \text{if } W_i=1 \\ (Q+0.5) \times q & \text{if } W_i=0 \end{cases} \quad (4)$$

5) 对修改后的奇异值进行 SVD 逆变换，得到每个子带中嵌入水印的矩阵 A' 。

6) 将 A' 放回原来码块中对应的位置，在编码器中完成 EBCOT 编码，从而输出嵌入水印后的数据流，得到完整含水印的 JPEG2000 图像。

2.2 水印的提取算法

提取水印的算法提出一种渐进性检测的方法，在解码时根据分辨率可伸缩的图像，提取水印信息，提取的水印随着解码图像分辨率的增加，水印质量越来越好。

1) 嵌入水印图像经过 JPEG2000 解码系统熵解码后，将其进行 $H \times H$ 的分块。

2) 对每个子块进行奇异值分解 $A'=US'V^T$ ，并且计算 $d=\text{floor}(S'(1,1)/q)$ ，其中： floor 为向下取整； $S'(1,1)$ 为每个子块的第一个奇异值。

3) 计算 $\text{mod}(d, 2)$ 的值，并采用奇偶判别，提取每分辨率的水印信息见式(5)。

$$W'_i = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{mod}(d, 2)=1 \\ 0 & \text{if } \text{mod}(d, 2)=0 \end{cases} \quad (5)$$

4) 将每级提取位平面的水印信息重组为灰度图像，从而得到检测的水印图像，同时解码系统完成 JPEG2000 图像的解码。

2.3 渐进性检测方法

在 JPEG2000 编解码系统中，计算提取出来的水印和原始水印之间的相似程度以判断水印系统的鲁棒性，采用相关运算检测各个分辨率水印的方法，其主要步骤如下：

1) 将不同分辨率提取水印 W'_i 与原水印 W 进行相关运算，见式(6)。

$$NC_i = \frac{\sum_i \sum_j W(i, j) \times W'_i(i, j)}{\sum_i \sum_j W^2(i, j)} \quad (6)$$

2) 对于分辨率可伸缩的渐进性传输，构造归一化相关值^[15]，并由此判断水印是否存在：

$$NC = \alpha_1 NC_1 + \alpha_2 NC_2 + \alpha_3 NC_3 + \dots + \alpha_i NC_i \quad (7)$$

式中： $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i = 1$ 且 $1 \geq \alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_i$ ； NC_i 为第 i 级分辨率解码图像检测得到的相关值； α_i 为其加权值。

随着分辨率可伸缩图像的渐进性传输，检测的 NC 值越大，说明提取水印的质量越好。分辨率可伸缩渐进性检测水印见表 1。表 1 表明嵌入水印编码后的 JPEG2000 图像，在未受到任何攻击时能完全提取水印；随着码流解码的增加，水印细节信息逐渐补充，

提取的水印的位平面数逐渐增加, 提取到的水印质量也不断改善。

3 实验结果

实验在 JPEG2000 编解码系统中, 输入为 512×512 的 pnm 格式的标准彩色载体图像(灰度亦可), 水印图像为 64×64 灰度图像。实验设置如下: $H \times H$ 分块为 2×2, 水印嵌入强度 q 可设置范围为 3~16, 该算法中嵌入强度选为 5。在无损压缩时嵌入水印。在不同 JPEG2000 压缩比下进行各分辨率提取渐进性水印图像及计算 NC 值, 结果见表 2。表 2 表明, 在嵌入水印时, JPEG2000 码率控制对编码的图像产生一定影响, 当压缩比在 70 以下时, 对最低频子带系数无影响, 压缩会影响中频子带系数和高频子带系数信息。使得第二级分辨率、第一级分辨率和完整提取水印 NC 值下降。当压缩比增大至 80 以上时, 对最低频子带信息产生一定的影响, 但水印图像依然可以提取。

表 1 分辨率可伸缩渐进性检测水印
Tab.1 Scalable image watermarking

































级数	解码图像	水印图像	NC值
第1级			0.562
第2级			0.894
第3级			0.976
完全			1.000





















表 2 在不同压缩比下渐进性水印图像及 NC 值
Tab.2 Watermarking image and NC value under different compression ratio

压缩比	第1级		第2级		第3级		完全	
	水印图像	NC值	水印图像	NC值	水印图像	NC值	水印图像	NC值
20		0.562		0.894		0.976		0.985
40		0.537		0.890		0.914		0.917
60		0.536		0.702		0.717		0.719
70		0.536		0.702		0.717		0.724
80		0.470		0.636		0.653		0.655
90		0.470		0.636		0.653		0.655

嵌入水印的图像对一些常见信息处理攻击和几何攻击的实验结果见表 3。表 3 表明, 对嵌入水印图像进行攻击, 各级提取水印信息依然可见, 实验可伸缩编码框架算法能抵抗常见攻击, 比如高斯滤波, 高

斯噪声, 剪切等。各级分辨率提取水印图像, 均可提取到水印信息, 而且随着分辨率增加, 水印质量渐好, 满足可伸缩水印的 2 点特性。

表 3 不同攻击的实验结果
Tab.3 Experimental results after different attacks

攻击类型	攻击参数	第 1 级		第 2 级		第 3 级		完全	
		水印图像	NC 值	水印图像	NC 值	水印图像	NC 值	水印图像	NC 值
无	0		0.562		0.894		0.976		1.000
高斯滤波	2×2		0.537		0.892		0.976		0.999
高斯噪声	0.004		0.516		0.826		0.894		0.911
剪接	256×256		0.524		0.786		0.847		0.865
旋转	30°		0.401		0.663		0.728		0.741

4 结语

文中提出基于 DWT-SVD 的可伸缩图像渐进性水印算法, 针对 JPEG2000 可伸缩性质, 采用三级小波分解原始图像, 并进行奇异值分解; 位平面分解灰度水印图像, 将水印重要的位平面嵌入 JPEG2000 码流最前端的重要部分, 其他位平面分别嵌入后面的码流中, 形成内嵌结构的水印模型, 与 JPEG2000 分辨率可伸缩性匹配, 实现对渐进性编码图像的保护。为验证算法的可行性, 分别进行渐进性检测、鲁棒性实验, 由实验结果可得出该算法可行。算法的缺点为对高强度地嵌入比较敏感。

参考文献:

- [1] COX I J, MILLER M L, BLOOM J A, et al. Digital Watermarking and Steganography[M]. Morgan Kaufmann: San Francisco, 2007.
- [2] 薛青晨, 吴丹, 陈大庆, 等. 基于 DWT-SVD 和 QR 码的抗几何攻击数字水印技术[J]. 包装工程, 2016, 37(11): 158—163.
XUE Qing-chen, WU Dan, CHEN Da-qing, et al. Geometrical Attack Resistant Digital Watermarking Technology Based on DWT-SVD and QR Code[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(11): 158—163.
- [3] 于海娇, 孙刘杰, 李毓彬, 等. 基于 QR 码的 DWT-SVD 数字水印算法[J]. 包装工程, 2015, 36(23): 125—129.
YU Hai-jiao, SUN Liu-jie, LI Yu-bin, et al. Digital Watermark Algorithm with DWT-SVD Based on QR Code[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(23): 125—129.
- [4] SUBRAMANYAM A V, KANKANHALLI E S. Robust Watermarking of Compressed and Encrypted JPEG 2000 Images[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2012, 14(3): 703—716.
- [5] CHEN T S, CHEN J. A Simple and Efficient Watermark Technique Based on JPEG2000 Codec[J]. Multimedia Systems, 2014, 10: 16—26.
- [6] SEO J H, PARK H B. Data Protection of Multimedia Contents Using Scalable Digital Watermarking[C]//Proc of the Fourth Annual ACIS International Conference on Information Science, Sydney Australia, 2005: 376—380.
- [7] PIPER, SAFAVI N R, MERTINS A. Resolution and Quality Scalable Spread Spectrum Image Watermarking[C]// Proc of the 7th Workshop on Multimedia and Security, MMSEC '05 New York, NY, USA, ACM, 2005: 79—90.
- [8] CHEN T P C, CHEN T. Progressive Image Watermarking[C]//Proc. IEEE Intl Conf. on Multimedia and Expo, 2000.
- [9] BHOWMIK D, ABHAYARATNE C. The Effect of Quality Scalable Image Compression on Robust Watermarking[C]//International Conference on Digital Signal Processing, IEEE Press, 2009: 1—8.
- [10] 蒋勇. 数字水印在 JPEG2000 中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
JANG Yong. Digital watermark apply in JPEG2000 [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [11] 冯茂岩, 冯波, 沈春林. 基于分块 DCT 变换和 Arnold 置乱的自适应图像水印算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(1): 171—173.
FENG Mao-yan, FENG Bo, SHEN Chun-lin. Adaptive Image Watermarking Algorithm Based on Block DCT Transform and Arnold Shuffling[J]. Computer Application, 2008, 28(1): 171—173.
- [12] JAN Z, JAFFAR A, JABEEN F, et al. Watermarking Scheme Based on Wavelet Transform, Genetic Programming and Watson Perceptual Distortion Control Model for JPEG2000[C]//Emerging Technologies (ICET), International Conference, 2010, 8: 128—133.
- [13] 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 of No-reference Image Quality Assessment[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(6): 1062—1079.
- [14] 李继良. JPEG2000 图像编码的若干关键性技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
LI Ji-liang. Studies on Some Key Techniques of JPEG 2000 Image Coding[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [15] 钟尚平, 高庆狮. 矢量地图水印归一化相关检测的可行性分析与改进[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(3): 401—409.
ZHONG Shang-ping, GAO Qing-shi. The Feasibility Analysis of Normalized-correlation-based Vector Maps Watermarking Detection Algorithm and the Improved Watermarking Algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(3): 401—409.