

## 自适应抖动调制图像水印算法

肖俊<sup>①</sup> 王颖<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

<sup>②</sup>(福建师范大学网络安全与密码技术重点实验室 福州 350007)

**摘要:** 量化步长是影响量化水印算法性能的最关键因素之一。该文根据 JPEG 量化表自适应地选择抖动调制中的量化步长, 提出了一种新的自适应量化水印算法; 并将 JPEG 量化表和 Watson 感知模型相结合提出了另一种新的自适应量化水印算法。实验结果表明该文提出的两种算法对噪声干扰和常见的图像处理具有较好的鲁棒性。此外, 研究还表明 JPEG 量化表和 Watson 模型均可以用于缓解量化水印算法对噪声的敏感程度, 而结合了两者的水印算法可以获得最佳性能。

**关键词:** 量化水印; 抖动调制; Watson 模型; JPEG 量化表; 自适应量化

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0552-04

## Adaptive Dither Modulation Image Watermarking Algorithm

Xiao Jun<sup>①</sup> Wang Ying<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>②</sup>(Key Lab of Network Security and Cryptology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Quantization step is one of the key factors affecting the performances of quantization watermarking. In this paper, a new quantization watermarking algorithm is proposed using the JPEG quantization table to choose the quantization step of dither modulation adaptively, and another new adaptive quantization watermarking algorithm is proposed by combining the JPEG quantization table and the Watson model. Experimental results show that the proposed two algorithms are robust to noise and image transformations. Besides, the results also show that both the JPEG quantization table and the Watson model can be used to reduce the sensitivity of quantization watermarking to noise, and the best performance can be achieved when both of them are used.

**Key words:** Quantization watermarking; Dither modulation; Watson model; JPEG quantization table; Adaptive quantization

### 1 引言

数字水印因其在知识产权保护等方面的重要应用价值, 已成为信号处理领域最热门的研究课题之一, 而其中含边信息的数字水印系统由于具有良好的性能, 成为目前数字水印技术的研究热点。量化索引调制(Quantization Index Modulation, QIM)是一种典型的含边信息数字水印嵌入方案<sup>[1]</sup>, 而抖动调制(Dither Modulation, DM)<sup>[1]</sup>作为 QIM 水印方案的一种典型实现, 由于其容量大、容易实现盲检测等特性已成为研究和应用最多的方法之一。

由于抖动调制等 QIM 方案都是基于量化器的, 量化步长是影响嵌入失真和系统鲁棒性的最关键因素之一, 在 QIM 方案提出后诸多研究者提出了对量化步长进行优化的方案。这些方案通常利用心理视觉模型自适应地确定量化步长<sup>[2-6]</sup>, 尤其是利用 Watson 模型中的对比度掩蔽阈值来确

定量化步长以提高系统的保真度<sup>[2-4]</sup>。此外, 也有根据载体特性或者小波系数特性确定量化步长的方法<sup>[7,8]</sup>。

根据视觉心理学实验确定的 JPEG 压缩的亮度量化表<sup>[9]</sup>已用于提高抗 JPEG 压缩的鲁棒性<sup>[10]</sup>, 但仅局限于用 JPEG 量化表来确定加性水印算法中的加权系数。而利用 Watson 模型可以提高水印系统的保真度, 结合 JPEG 量化表可以提高水印系统对抗 JPEG 压缩的鲁棒性, 若能将两者有机结合可使水印系统的保真度和鲁棒性等性能得到进一步提升。有鉴于此, 本文将 JPEG 量化表用于量化水印方案中, 提出了两种基于 JPEG 量化表的自适应抖动调制水印算法。

本文第 2 节介绍 DM 的基本原理; 第 3 节给出基于 JPEG 量化表的自适应量化水印算法; 第 4 节给出已有算法和本文提出算法的实验结果, 并进行比较与分析; 第 5 节总结全文。

### 2 抖动调制水印算法

抖动调制首先将水印信息或由水印信息确定的抖动量加到载体上, 然后进行量化以嵌入水印信息; 水印提取时一般采用最小距离解码。下面分别介绍水印嵌入和提取的基本原理。

2007-10-22 收到, 2008-03-18 改回

国家自然科学基金(60772155)和网络安全与密码技术福建省重点实验室开放课题(07A006)资助课题

根据抖动调制的定义, 水印嵌入过程可用下式描述:

$$x_w = Q_{\Delta}^m(x) = q((x + d(m)) / \Delta) \times \Delta - d(m) \quad (1)$$

其中  $x$  表示原始载体数据;  $x_w$  表示嵌入水印之后的数据;  $q(\bullet) = \text{round}(\bullet)$  为四舍五入取整函数;  $\Delta$  表示量化步长;  $m$  表示水印信息;  $d(m)$  是与  $m$  相对应的抖动量;  $Q_{\Delta}^m(\bullet)$  是与  $m$  相对应的量化器, 对于二进制水印, 有两类量化器:  $Q_{\Delta}^0(\bullet)$  和  $Q_{\Delta}^1(\bullet)$ 。其实现如图 1 所示。

当采用最小距离解码器来提取水印信息时, 如果接收到的数据距离量化器 0 得到的数据最近, 解码器认为嵌入的水印信息为 0; 否则, 解码器认为嵌入的水印信息为 1, 即

$$\hat{m} = \arg \min_{l \in \{0,1\}} (y - y[l])^2 \quad (2)$$

其中  $y$  表示解码器接收到的数据;  $\hat{m}$  是提取的水印信息;  $y[0]$  和  $y[1]$  分别表示采用量化器 0 和量化器 1 对接收到的数据  $y$  进行抖动调制所得到的量化值, 其提取过程如图 2 所示。

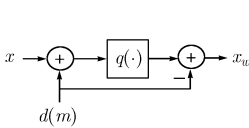


图 1 抖动调制水印算法的嵌入框图

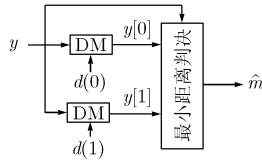


图 2 抖动调制水印算法的提取框图

从上述水印嵌入和提取过程可见, 量化步长  $\Delta$  是影响抖动调制水印系统性能的关键因素之一, 但非自适应抖动调制的量化步长与载体无关。而载体特性可以用于选择量化步长, 例如, 对于人眼敏感度较低的纹理丰富区域可以采用较大的量化步长, 反之采用较小的量化步长。本文正是从此角度出发, 综合利用载体和信道等特性来自适应地确定量化步长。

### 3 基于 Watson 感知模型和 JPEG 量化表的自适应量化

Watson 感知模型是 Watson 于 1993 年提出的一个测量视觉保真度的模型<sup>[11]</sup>; 而 JPEG 则是一种典型的图像压缩标准。本节首先简单介绍 Watson 模型和 JPEG 量化表, 然后给出优化的自适应量化水印算法。

#### 3.1 Watson 感知模型与 JPEG 量化表

(1) Watson 感知模型 Watson 模型由敏感度函数、两个基于亮度和对比度掩蔽的掩蔽部分以及一个合并部分组成。下面仅介绍本文用到的敏感度、亮度掩蔽和对比度掩蔽。

(a) 敏感度 在 Watson 模型定义的频率敏感度表中, 每一个元素  $t[i, j]$  ( $1 \leq i, j \leq 8$ ) 表示图像每一个不相交  $8 \times 8$  像素块中, 在无任何掩蔽噪声的情况下可被察觉的离散余弦变换(DCT)系数的最小幅度, 这个值越小说明人眼对该频率越敏感, 具体数值可参见文献<sup>[11]</sup>。

(b) 亮度掩蔽 如果  $8 \times 8$  像素块的平均亮度较大, DCT

系数就可以被较大的数值修改而不被察觉, 因而根据各块 DC 项  $C_0[0, 0, k]$  调整敏感表中的  $t[i, j]$  获得亮度掩蔽函数门限  $t_L[i, j, k]$ , 即

$$t_L[i, j, k] = t[i, j] \left( C_0[0, 0, k] / C_{0,0} \right)^{\alpha_T} \quad (3)$$

式中  $\alpha_T = 0.649$ ,  $C_0[0, 0, k]$  为原图中第  $k$  块的 DC 系数,  $C_{0,0}$  为原图中 DC 系数的平均值。

(c) 对比度掩蔽 对比度掩蔽指的是由某一频率中的能量引起的该频率发生变化时的可见度降低, 即

$$s[i, j, k] = \max \left\{ t_L[i, j, k], |C_0[i, j, k]|^{w[i, j]} t_L[i, j, k]^{1-w[i, j]} \right\} \quad (4)$$

式中  $w[i, j]$  都被取为 0.7。  $s[i, j, k]$  估计的是块 DCT 的各项在一个 JND(Just Noticeable Difference) 范围内可进行的变化大小, 亦称为间隙。

(2) JPEG 压缩的亮度标准量化表 观察者的主观测试表明各个 DCT 系数并非同等重要, 利用人眼对于各个频率分量所不同的视觉敏感性, 可以对“高频”系数进行较为粗略的量化以更合理地利用有限的编码比特。为此用具有 64 个独立量化阶的量化分层表(亦称量化矩阵)分别规定 DCT 域中 64 个系数的量化精度。理论上, 对不同的彩色坐标系、空间分辨率、数据精度和应用场合, 应采用不同的表, 所以 JPEG 并未规定一张“标准表”, 但建议采用表 1 所示的量化表, 记为  $t_{\text{JPEG}}$ 。

表 1 JPEG 建议的量化表

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

#### 3.2 基于 JPEG 量化表的自适应量化水印算法

由于 JPEG 量化表反映了人的心理视觉特点, 而且是 JPEG 压缩攻击中的失真源, 因此利用 JPEG 压缩来自适应地选择水印量化步长, 可以提高量化水印系统的性能。本节给出结合 JPEG 量化表来确定量化步长的抖动调制水印算法。

与第 2 节介绍的常规抖动调制算法不同的是量化步长根据 JPEG 量化表确定, 其水印嵌入过程如图 3 所示, 下面给出水印嵌入的具体过程。

为了更有效和方便地利用 JPEG 量化表, 首先对原始载体图像进行  $8 \times 8$  的块 DCT 变换得到 DCT 系数  $x[i, j, k]$ , 其中  $1 \leq i, j \leq 8$ ,  $k$  由原始载体图像的大小决定, 假设原始载体图像大小为  $M \times N$ , 则  $1 \leq k \leq \lceil M \times N / (8 \times 8) \rceil$ , 其中  $\lceil \cdot \rceil$

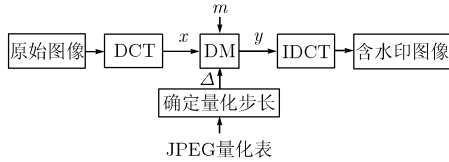


图 3 基于 JPEG 量化表的抖动调制水印嵌入过程

表示向下取整操作。

其次根据 JPEG 量化表  $t_{\text{JPEG}}$  确定抖动调制中量化器的量化步长  $\Delta$ 。值得注意的是,在根据 JPEG 量化表  $t_{\text{JPEG}}$  确定量化步长  $\Delta$  时,需要一个全局常数  $G$  来调整水印强度,  $G$  在自适应确定各个量化步长的基础上控制整体嵌入失真。根据 JPEG 量化表的量化分层特性,采用式(5)确定量化步长  $\Delta$

$$\Delta(i, j, k) = \frac{G}{t_{\text{JPEG}}(i, j)} \quad (5)$$

然后按照常规抖动调制算法实现水印信息  $m$  的嵌入,得到含水印系数  $y$ ;最后进行逆块 DCT 变换得到含水印图像。水印提取过程是嵌入过程的逆过程,这里不再赘述。

### 3.3 基于 Watson 模型和 JPEG 量化表的自适应量化水印算法

3.2 节中基于 JPEG 量化表的自适应量化水印算法在确定量化步长时,各个  $8 \times 8$  的 DCT 系数块对应位置的量化步长相同,不会随着不同图像块的像素值变化而改变。考虑到不同图像块具有不同的纹理等特性,本文结合 Watson 模型中的对比度掩蔽门限来进一步优化量化步长,从而获得性能更优的自适应量化水印算法,其嵌入过程如图 4 所示。

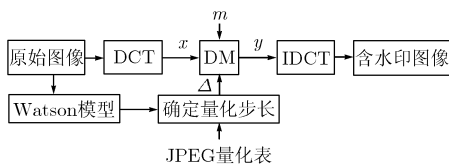


图 4 结合 JPEG 量化表和 Watson 模型的抖动调制水印算法

与 3.2 节所述算法类似,首先对原始载体图像进行  $8 \times 8$  的块 DCT 变换得到 DCT 系数  $x[i, j, k]$ ,并根据式(3)和式(4)计算 Watson 模型中的对比度掩蔽门限  $s[i, j, k]$ ;其次根据 JPEG 量化表和间隙  $s[i, j, k]$  确定抖动调制中量化器的量化步长  $\Delta$ 。值得注意的是,在确定量化步长  $\Delta$  时,同样需要一个全局常数  $G$  来调整水印强度,如式(6)所示

$$\Delta(i, j, k) = \frac{Gs(i, j, k)}{t_{\text{JPEG}}(i, j)} \quad (6)$$

然后根据常规抖动调制算法实现水印信息  $m$  的嵌入,得到含水印系数  $y$ ;最后进行逆 DCT 变换得到含水印图像。水印提取过程仍然是嵌入过程的逆过程。

## 4 实验结果与分析

为了检验第 3 节所提出水印算法的性能,本节对以下 4

种算法进行比较测试,算法 A:原始的非自适应抖动调制算法;算法 B:利用 Watson 模型的自适应抖动调制算法;算法 C:本文提出的利用 JPEG 量化表的自适应抖动调制算法;算法 D:本文提出的结合 Watson 模型和 JPEG 量化表的自适应抖动调制算法。

本文对大小为  $256 \times 256$  的 1000 幅灰度图像进行了测试。实验中,采用 4 种水印算法分别在每个图像中嵌入大小为  $32 \times 32$  的二值水印信息,在每个  $8 \times 8$  块上嵌入 1bit 水印信息(每个  $8 \times 8$  DCT 系数块的中低频系数上重复嵌入相同的 1bit 信息),并设置 4 种算法嵌入水印后的含水印图像的峰值信噪比为 40dB。

4 种算法对抗 JPEG 压缩和高斯噪声攻击的鲁棒性比较结果如图 5 和图 6 所示,曲线上的点是 1000 幅图像的平均误码率,  $Q$  表示 JPEG 压缩因子,  $\text{var}$  表示高斯噪声方差, BER 代表误码率。可见,在 JPEG 压缩和高斯噪声攻击下,利用了 JPEG 量化表的算法 C 和算法 D 鲁棒性更强,误码率低于原始的算法 A 和利用 Watson 模型的算法 B。在噪声强度较小时,算法 C 的误码率比算法 D 的误码率低,算法 A 的误码率比算法 B 的误码率低;随着噪声强度的增加,算法 D 误码率变的比算法 C 的低,算法 B 的误码率也变的比算法 A 的低。

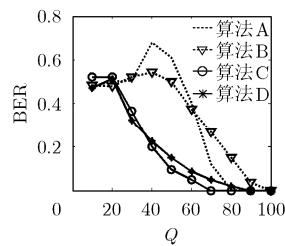


图 5 4 种算法对抗 JPEG 压缩的误码率

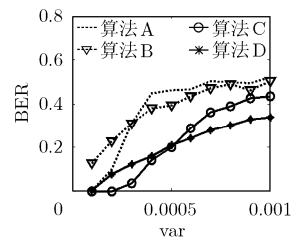


图 6 4 种算法对抗高斯噪声的误码率

值得注意的是,算法 C 和算法 D 的误码率上升比算法 A 和算法 B 慢,并且算法 D 的误码率上升最慢,算法 A 的误码率上升最快。而王颖等<sup>[12]</sup>的研究表明:量化水印算法在噪声强度逐渐增加的过程中,当噪声强度增加到一定值时,量化水印系统的性能迅速变差。因此,实验结果表明利用 Watson 模型和 JPEG 量化表自适应地确定量化步长均可以缓解量化水印算法对噪声的敏感程度,尤其是利用 JPEG 量化表的算法。

4 种算法对抗其他常规信号处理攻击的鲁棒性比较结果如表 2 所示。从表 2 可见,仅在放大 2 倍和剪切 1/8 攻击下算法 A 可以获得略低的误码率;对于大多数攻击而言,利用了 JPEG 量化表的算法 C 和算法 D 可以获得更低的误码率,并且算法 C 和算法 D 各有优缺点。

## 5 结束语

本文在分析量化水印算法特点的基础上,利用 JPEG 压

表 2 4 种算法在常规信号处理下的误码率比较

算法	放大 2 倍	缩小 1/2	3×3 空域 低通滤波	4 领域平均	8 领域平均	3×3 中值滤波	1×3 中值 滤波	剪切 1/8
算法 A	0.0029	0.2900	0.3544	0.9150	0.7705	0.3291	0.1826	0.0400
算法 B	0.0449	0.3017	0.3691	0.8710	0.7636	0.3584	0.1962	0.0449
算法 C	0.0078	0.1572	0.2168	0.1923	0.2744	0.17578	0.0966	0.0498
算法 D	0.0102	0.1623	0.2239	0.2126	0.2622	0.17531	0.1152	0.0566

缩中的量化表来自适应地选择量化步长, 提出了基于 JPEG 量化表的自适应水印算法和结合 JPEG 量化表与 Watson 模型的自适应量化水印算法, 并利用实验对其性能进行了测试。研究表明, 利用了 JPEG 量化表的自适应量化水印算法可以获得更好的鲁棒性, 同时 JPEG 量化表和 Watson 模型均可以用于缓解量化水印算法对噪声的敏感程度, 而将两者相结合的方法可获得最佳效果。

### 参 考 文 献

- [1] Chen B and Wornell G W. Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2001, 47(4): 1423-1443.
- [2] 刘彤, 裘正定. 一种基于量化的图像水印方案[J]. *通信学报*, 2002, 23(10): 89-93.  
Liu Tong and Qiu Zheng-ding. A quantization based watermarking algorithm [J]. *Journal on Communications*, 2002, 23(10): 89-93.
- [3] Li Q and Cox I J. Using perceptual models to improve fidelity and provide invariance to valumetric scaling for quantization index modulation watermarking [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Philadelphia, PA, United States, Mar 18-23 2005, 2: 1-4.
- [4] Chou C H and Liu K C. Color image watermarking based on a color visual model [C]. *IEEE 4th Workshop on Multimedia Signal Processing*, Virgin Islands, USA, Dec. 9-11, 2002: 367-370.
- [5] 张专成, 张殿富, 闫小萍. 一种鲁棒的基于 DWT 域自适应量化步长的图像盲水印算法[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(6): 840-847.  
Zhang Zhuan-cheng, Zhang Dian-fu, and Yan Xiao-ping. A robust image blind watermarking algorithm based on adaptive quantization step in DWT [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(6): 840-847.
- [6] 王向阳, 杨红颖, 郭俊. 一种基于自适应量化的半脆弱图像水印算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2006, 27(5): 896-900.  
Wang Xiang-yang, Yang Hong-ying, and Wu Jun. New semi-fragile watermarking based on adaptive quantization [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2006, 27(5): 896-900.
- [7] 张力, 韦岗, 张基宏. 一种小波域自适应鲁棒闭环数字盲水印技术[J]. *电子学报*, 2003, 31(10): 1476-1480.  
Zhang Li, Wei Gang, and Zhang Jihong. A new adaptive closed loop robust blind image digital watermarking in wavelet domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(10): 1476-1480.
- [8] 张专成, 张殿富, 闫小萍. 一种鲁棒的基于 DWT 域自适应量化步长的图像盲水印算法[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(6): 840-847.  
Zhang Zhuan-cheng, Zhang Dian-fu, and Yan Xiao-ping. A robust image blind watermarking algorithm based on adaptive quantization step in DWT [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(6): 840-847.
- [9] 章毓晋. 图像处理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 172-174.  
Zhang Yu-jin. *Image Process and Analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 172-174.
- [10] 孙圣和, 陆哲明, 牛夏牧. 数字水印技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 474-476.  
Sun Sheng-he, Lu Zhe-ming, and Niu Xia-mu. *Techniques and Applications of Digital Watermarking* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 474-476.
- [11] Watson A B. DCT quantization matrices visually optimized for individual images [C]. *Human Vision, Visual Processing and Digital Display IV*, Bellingham, WA, USA, 1993, SPIE Vol. 1913: 202-216.
- [12] 王颖, 肖俊, 王蕴红. 数字水印原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 135-146.  
Wang Ying, Xiao Jun, and Wang Yun-hong. *Principles and Techniques of Digital Watermarking*[M]. Beijing: Science Press, 2007: 135-146.

肖 俊: 男, 1981 年生, 博士, 研究领域为图像处理与数字水印技术。

王 颖: 女, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为图像处理及信息安全等。