

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2012.03.008

# 印刷品水印图像的半色调算法比较

冯起芹, 曹小龙, 单武扬, 谢 勇, 薛继武

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 对 Bayer 抖动、误差扩散和绿噪声 3 种半色调算法进行了分析比较。利用离散小波变换将水印信息嵌入宿主图像, 采用峰值信噪比对 3 种算法生成的半色调图像质量进行客观评价; 用归一化相关系数衡量半色调图像提取的水印质量; 以 Matlab 程序运行时间判断 3 种算法的计算效率; 同时, 结合人眼视觉对半色调图像质量进行主观评价。综合各种评价, 结果表明: 误差扩散是最适合小波水印图像的半色调算法。

**关键词:** 小波水印; 半色调算法; Bayer 抖动; 误差扩散; 绿噪声

中图分类号: TS801.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2012)03-0034-05

## Comparison Study of Halftoning Algorithm for Printed Watermarking Image

Feng Qiqin, Cao Xiaolong, Shan Wuyang, Xie Yong, Xue Jiwu

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** With the aim of finding the appropriate halftoning algorithms for watermarking of the printed image, three commonly used types of halftoning algorithm i.e. Bayer dithering, error diffusion and green noise are compared. The watermark information is embedded in the host image using discrete wavelet transform. PSNR is used to evaluate the quality of halftone images generated by the three algorithms, NC to measure the quality of extracted watermark, and the running time of halftoning to determine the computational complexity. Combined with human visual subjective, the comprehensive evaluation has been presented for the halftone image. The experimental results show that error diffusion has the best performance for wavelet watermark image.

**Key words:** wavelet watermark; halftoning algorithm; Bayer dithering; error diffusion; green noise

## 0 引言

在印刷半色调图像中嵌入数字水印, 可有效实现对印刷品的版权保护<sup>[1]</sup>。考虑到印刷制版及工艺的特殊性, 通常先将水印信息嵌入印刷图像, 再进行半色调处理。而对含有水印信息的图像进行半色

调化(网点离散化)处理, 实质上是对水印的一种攻击, 可能导致水印信息丢失。因此, 选择合适的半色调算法是保证水印信息正常提取及提高半色调印刷图像质量的重要前提。

数字半色调处理方法主要包括调幅(amplitude modulation, AM)、调频(frequency modulation, FM)

收稿日期: 2012-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170101)

作者简介: 冯起芹(1985-), 女, 黑龙江牡丹江人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为包装防伪技术,

E-mail: fengqiqin1@yahoo.com.cn

通信作者: 谢 勇(1964-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为包装防伪技术与防振缓冲材料,

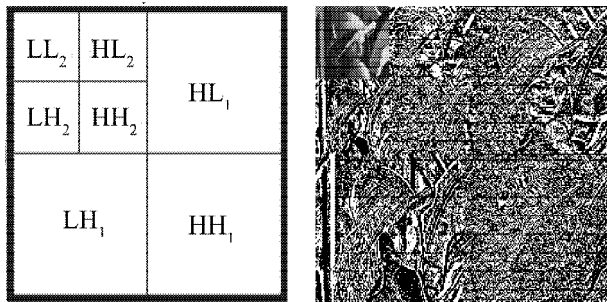
E-mail: hutxy@126.com

和AM/FM混合3种<sup>[2]</sup>: AM采用点聚集态网点技术,主要为有理正切、无理正切、Bayer抖动以及超细胞等技术;FM采用点离散态网点技术,主要为误差扩散、直接二值搜索和蓝噪声等技术;AM/FM将AM和FM两者相结合,其主要技术有绿噪声、Hybrid、SambaFlex、Sublima晶华网点等。综合考虑应用频率,本文主要对Bayer抖动、误差扩散、绿噪声3种具有代表性的算法进行分析比较。

在Matlab环境下,首先,利用离散小波变换<sup>[3]</sup>将置乱后的水印信息嵌入宿主图像中;然后,分别使用上述3种半色调算法对测试图像进行半色调处理;其后,对生成的半色调图像及水印质量采用如下方法<sup>[4]</sup>进行评估:采用峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)对半色调图像质量进行客观评价,使用Matlab程序运行时间来判断算法的计算效率和实用性,用归一化相关系数(normalized correlation, NC)来衡量经过半色调处理后提取的水印质量<sup>[5]</sup>;最后,结合人眼视觉对图像质量进行主观评价<sup>[6]</sup>。综合考虑以上各种评估结果,将其作为评判算法优劣的依据。

## 1 水印嵌入

使用Mallat算法<sup>[7]</sup>对宿主图像(Lena灰度图像,  $512 \times 512$  像素)进行小波分解,图1a为小波二级分解示意图,LL<sub>2</sub>, HH<sub>2</sub>和HH<sub>1</sub>分别表示低频、中频和高频部分,下标则表示经过的分解级数;图1b为Lena图像经小波二级分解的效果图。



a) 示意图 b) 效果图

图1 小波二级分解图

Fig. 1 Wavelet two decomposition of the image

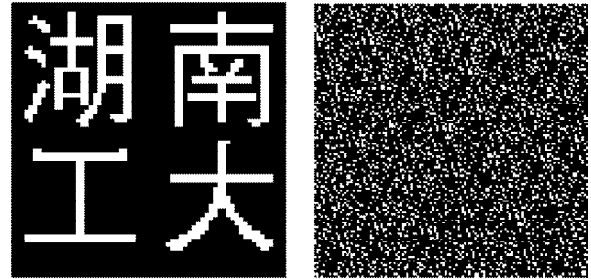
水印嵌入方程为

$$W'(i, j) = W(i, j) + \alpha w(i, j), \quad (1)$$

式中:  $W'(i, j)$ 和  $W(i, j)$ 分别表示水印嵌入前后的小波系数,  $\alpha$ 为强度因子,  $w(i, j)$ 为水印信息。

由于人眼视觉系统相当于低通滤波器,对中频率段的能量并不敏感,故本文水印的嵌入位置选择小波变换后的中频部分,即图1a所示的HH<sub>2</sub>部分。为

了让水印具有较好的鲁棒性,保证图像经过半色调处理后仍能提取出水印,故先将水印进行Arnold置乱变换<sup>[8]</sup>,如图2所示。其中,图2b为图2a通过Arnold变换得到的置乱图像,原始水印图像的大小为  $128 \times 128$  像素,水印嵌入强度 $\alpha$ 为0.5。

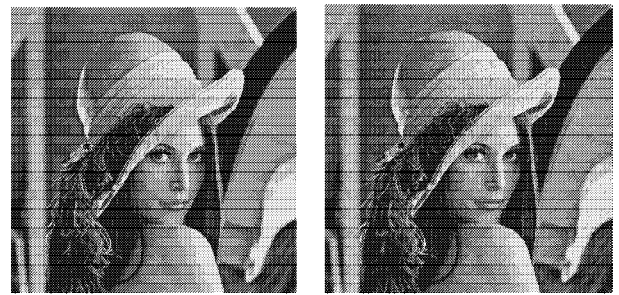


a) 原始水印图像 b) Arnold置乱水印图像

图2 水印嵌入

Fig. 2 Watermark embedding

图3为嵌入水印前后的Lena灰度图像,其中,图3a为原宿主图像,图3b为嵌入水印后的图像。



a) 原宿主图像 b) 嵌入水印后图像

图3 嵌入水印前后的图像对比

Fig. 3 Contrast of images before and after watermark embedding

## 2 半色调算法

### 2.1 Bayer抖动

Bayer抖动半色调算法是将图像中每个像素的值与抖动矩阵中相对应元素的值进行比较。本文采用的Bayer抖动矩阵<sup>[9]</sup>如图4所示。

0	32	8	40	2	34	10	42
48	16	56	24	50	18	58	26
12	44	4	36	14	46	6	38
60	28	52	20	62	30	54	22
3	35	11	43	1	33	9	41
51	19	59	27	49	17	57	25
15	47	7	39	13	45	5	37
63	31	55	23	61	29	53	21

图4 Bayer抖动矩阵

Fig. 4 Bayer dithering matrix

经模8运算,原图  $I(i, j)$ 中的像素被分成8个  $8 \times 8$

的子块, 得到图像矩阵  $M(i, j)$ ,

$$M(i, j) = M(\text{imod}8, \text{jmod}8). \quad (2)$$

各子块按式 (3) 与 Bayer 矩阵对应元素相比较,

$$B(i, j) = \begin{cases} 0, & I(i, j) \leq M(i, j); \\ 1, & I(i, j) > M(i, j). \end{cases} \quad (3)$$

式中: 输出值  $B(i, j)$  为 Bayer 抖动半色调图像, 0 表示输出黑点, 1 表示输出白点。

该半色调图像具有 AM 半色调的特性, 输出图像点数与输入图像点数相同, 实现过程简单, 计算复杂性较低。

## 2.2 误差扩散

误差扩散半色调算法是将输出图像  $Q(i, j)$  与输入图像  $I(i, j)$  之间的误差  $E(i, j)$  分散到相邻点中, 其计算过程<sup>[10]</sup>如下:

1) 阈值化

$$Q(i, j) = \begin{cases} 0, & I(i, j) \leq 128; \\ 1, & I(i, j) > 128. \end{cases} \quad (4)$$

2) 计算误差值

$$E(i, j) = I(i, j) - Q(i, j). \quad (5)$$

3) 误差分割

按误差扩散表进行误差分割, 误差扩散表为

$$\begin{bmatrix} * & X & 7/16 \\ 3/16 & 5/16 & 1/16 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中: \* 为已访问过的像素,  $X$  为当前像素  $I(i, j)$ 。

先将  $X$  的误差值分别乘以  $3/16, 5/16, 1/16, 7/16$ , 添加到  $I(i-1, j-1), I(i-1, j), I(i+1, j+1), I(i, j+1)$  4 个相邻像素上, 再对相邻像素值进行阈值处理, 最后得到二值结果图像, 其原理如图 5 所示。

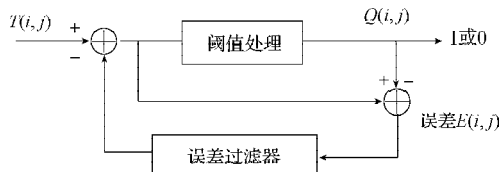


图 5 误差扩散半色调原理图

Fig. 5 Schematic diagram of error diffusion halftoning

误差扩散算法具有 FM 半色调的特性, 保存了一定的局部量化误差, 对临近的像素而言是一种补偿, 使处理前后图像的总灰度保持一致。

## 2.3 绿噪声

绿噪声是白噪声的中频部分, 具有非周期性及不相关性, 没有低频颗粒; 它将 AM 与 FM 相结合, 以簇点为单位进行半色调处理, 每个簇点由一定数

量的像素点聚集组成, 可同时调制簇点大小和簇点随机分布, 是一种混合半色调技术。图 6 为理想绿噪声模型的  $R(r)$  图<sup>[11-12]</sup>。

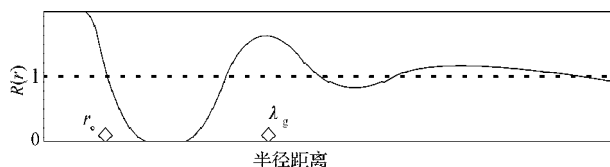


图 6 理想绿噪声模型的  $R(r)$  图

Fig. 6 Ideal green-noise model  $R(r)$

$R(r)$  是在样本  $m$  为像素点的条件下, 位于圆环  $R_m(r) = \{n: r < |n-m| < r+dr\}$  中的像素点的条件期望值与其无条件期望值之间的比例。 $n$  为样本  $m$  以外的像素点。

$$\lambda_g = \begin{cases} D/\sqrt{g/M}, & 0 \leq g < 0.5; \\ D/\sqrt{1-g/M}, & 0.5 \leq g < 1. \end{cases} \quad (6)$$

$$\overline{M} = \pi r_c^2. \quad (7)$$

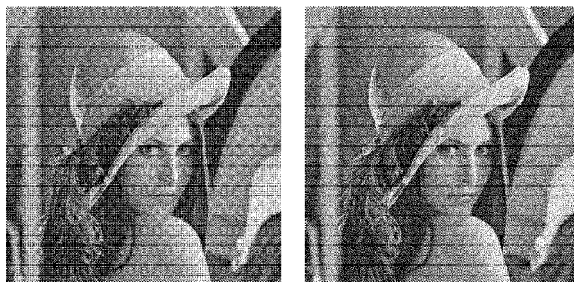
式 (6) ~ (7) 中:  $\lambda_g$  为基本波长,  $r_c$  为簇点半径,  $\overline{M}$  为以  $r_c$  为半径的圆面积表示簇点内像素点的平均数目;  $D$  为输出系统中可放置两像素间的最小距离;  $g$  为归一化灰度等级, 当  $0 \leq g < 0.5$  时, 为白色像素, 当  $0.5 \leq g < 1$  时, 为黑色像素。

绿噪声算法具有 AM 与 FM 的混合特性, 在一定程度上可解决点增益现象, 而为此付出的代价是部分图像细节信息的丢失。

## 3 仿真实验与结果分析

### 3.1 半色调处理

在 Matlab 环境下, 先分别使用 Bayer 抖动、误差扩散、绿噪声 3 种算法对不含水印测试图像 (图 3a) 进行半色调处理, 处理结果如图 7a~c 所示。同样地, 对含水印测试图像 (图 3b) 分别进行半色调处理, 结果如图 7d~f 所示。



a) Bayer 抖动图像

b) 误差扩散图像



图7 不同算法生成的半色调图像

Fig. 7 Halftone images generated by different algorithms

利用人眼视觉观察图7中的6幅图像,可明显看出:误差扩散算法生成的半色调图像视觉效果最好,Bayer抖动算法生成的图像视觉效果最差。而对比观察水印嵌入前后采用相同算法得到的半色调图像,未发觉有明显变化,这说明本文水印嵌入算法对半色调处理的适应性较好。

### 3.2 半色调图像质量测试

分别对图7中的6幅半色调图像进行PSNR和程序运行时间的测试,为便于直观对比,将2项测试指标的数据绘制成直方图,如图8和图9所示。

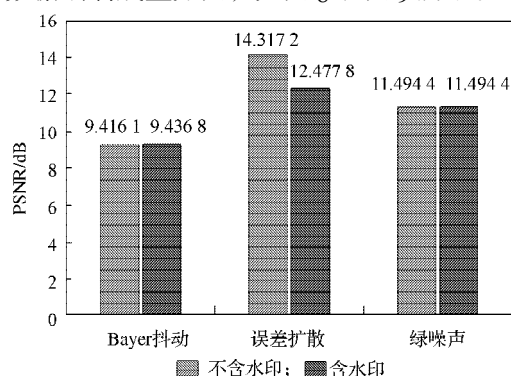


图8 半色调图像的PSNR值比较

Fig. 8 Comparison of halftone PSNR values

由图8可看出,误差扩散的PSNR值最高,这说明其半色调图像质量最好,这与本文3.1节中人眼视觉判断结论相同。同时,Bayer抖动和绿噪声算法中水印嵌入前后的PSNR值非常接近,说明水印的嵌入对这2种算法无明显影响;而误差扩散算法的PSNR值,含水印的值比不含水印的值下降了1.839 4,说明

误差扩散算法对水印较为敏感。

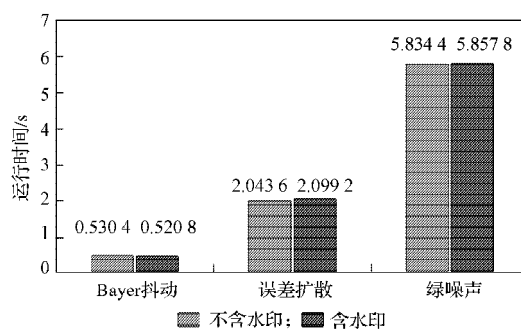


图9 半色调图像Matlab程序运行时间比较

Fig. 9 Comparison of halftone Matlab program running time

由图9可看出,Bayer抖动半色调程序运行的时间最短,不到1 s;绿噪声算法运行时间最长,超过5 s,约为Bayer抖动运行时间的10倍,是误差扩散运行时间的近3倍,这说明Bayer抖动算法的运行效率最高。同时,3种算法中,水印嵌入前后的程序运行时间均非常接近,这说明嵌入水印对半色调处理效率影响甚微。

### 3.3 水印质量测试

对含水印的半色调图像进行小波逆变换提取水印,并根据水印嵌入时的置乱算法做相应的反置乱变换,得到解密的水印图像,如图10所示。

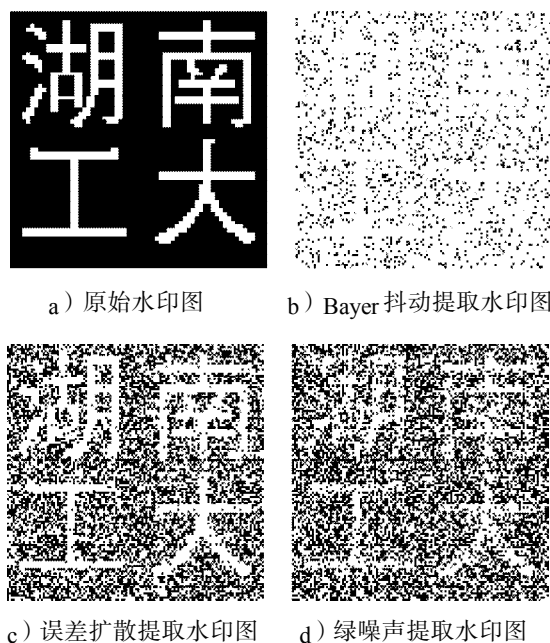


图10 原始水印与提取水印的图像

Fig. 10 Original watermark and extracted watermark

由图10可看出,误差扩散提取的水印即图10c较清晰,绿噪声提取的水印即图10d可以识别,而Bayer抖动提取的水印即图10b几乎不可见。

采用NC来衡量所提取的水印质量,NC数值范

围为[0,1], 数值越大, 表示提取水印的质量越好。NC 测试数据如表 1 所示。

表 1 提取水印的 NC 数据表

Table 1 Extracted watermarking NC data sheet

半色调算法 归一化系数	原始水印	Bayer 抖动	误差扩散	绿噪声
	1.000 0	0.820 9	0.811 3	0.758 7

对表 1 进行分析, 并对比图 10 的视觉效果, 可知: 3 种算法中, Bayer 抖动的 NC 值虽然最大, 但其水印视觉效果较差。同时可分析得出: 误差扩散算法对水印质量影响较小, 而 Bayer 抖动和绿噪声算法对其影响较大。

4 结论

对于小波水印, 最适合的半色调算法为误差扩散算法。误差扩散算法生成的半色调图像色调丰富, 视觉效果较好; 宿主图像经过其半色调处理后, 提取出的水印信息质量较好, 对水印信息的破坏较小。其缺点是嵌入水印后对生成的半色调图像质量有一定影响, 计算复杂度相对较高。

参考文献:

[1] Afrakhteh M, Ibrahim S, Salleh M. Printed Document Authentication Using Watermarking Technique[C]// Computational Intelligence, Modelling and Simulation (CIMSIM). Bali: [s.n.], 2010: 367-370.

[2] Murat M, Vaidyanathan P P. Recent Advances in Digital Halftoning and Inverse Halftoning Methods[J]. Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications: IEEE Transactions on, 2002, 49(6): 790-805.

[3] Zhang Yanhong. Blind Watermark Algorithm Based on HVS and RBF Neural Network in DWT Domain[J]. WSEAS Transactions on Computers, 2009, 8: 174-183.

[4] Wang S, Zheng D, Zhao J. An Image Quality Evaluation Method Based on Digital Watermarking[J]. IEEE

Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(1): 98-10.

[5] 姚莉. 数字半调技术及其评价方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(3): 4-8.

Yao Li. Review on Digital Halftoning and Quality Assessment Schemes[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(3): 4-8.

[6] 冯春晖, 刘全香. 基于HVS的半色调图像数字水印算法研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(增刊1): 144-149.

Feng Chunhui, Liu Quanxiang. Study of Digital Watermark Algorithm Based on HVS for Halftone Images[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(S1): 144-149.

[7] Mallat S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation[J]. IEEE Trans. PAMI, 1989, 11(7): 674-693.

[8] Arnold V I, Avez A. Ergodic Problems of Classical Mechanics: Mathematical Physics Monograph Series[M]. New York: [s.n.], 1968.

[9] Bayer E. An Optimal Method for Two Level Rendition of Continuous Tone Pictures[C]//IEEE Transactions: Systems, Man and Cybernetics. Washington: [s.n.], 1973: 11-15.

[10] Guo Jing-Ming, Pei Soo-Chang, Lee Hua. Watermarking in Halftone Images with Parity-Matched Error Diffusion[J]. Signal Processing, 2011, 91(1): 126-130.

[11] Fung Yik-Hing, Chan Yuk-Hee. Green Noise Digital Halftoning with Multiscale Error Diffusion[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2010, 19(7): 1808-1823.

[12] 周正林, 田玉敏, 孟丽娜. 蓝噪声与绿噪声数字半调技术原理分析与比较[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(6): 54-56.

Zhou Zhenglin, Tian Yumin, Meng Lina. Analysis and Comparison of Blue and Green-Noise Digital Halftoning Methods[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(6): 54-56.

(责任编辑: 徐海燕)