

一种基于统计均值和方差调制的图像盲水印算法^{*}

张冠男, 王树勋, 崔丽莉

(吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130025)

摘 要: 提出了一种基于统计均值和方差调制的嵌入可读水印的自适应盲水印算法, 通过分析图像经离散小波变换后细节子带系数的特性, 利用细节子带系数的均值和方差来自适应地调制图像经小波分解后细节子带的系数值, 在满足水印不可感知的条件下尽可能地嵌入水印信息, 实现了水印不可感知性和鲁棒性之间的折衷。同时, 水印的提取无须求助于原图像, 很好的实现了水印的盲检测。这里的水印是一幅有实际意义的二值图像。实验结果和攻击测试表明, 提出的算法对 JPEG/JPEG2000 压缩、添加噪声、剪切、像素移位等多种攻击都有较强的鲁棒性。

关键词: 数字水印; 离散小波变换; 盲检测; 统计均值调制

中图分类号: TP911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) S2-0113-04

随着多媒体技术和网络技术的迅速发展与广泛应用, 对多媒体数字产品的版权保护已成为迫切需要解决的问题。传统的加密技术在解决数字产品版权保护方面的局限性, 促进了数字水印技术的产生与飞速发展。近几年来数字水印技术作为保护数字产品版权的一种新兴技术, 已成为国内外学者研究的热点^[1,2]。

水印信息可以是多种形式的数字。随机序列和伪随机序列因其良好的互相关近似为零而自相关有很高峰值的特性而被众多的水印算法选作水印信号, 当检测水印时只需将提取出的水印与原始水印做相似度检测即可判定水印的存在与否。但这种方法只能提供水印存在与否的二值判决, 不能提供更多的信息量。而在更多的情况下, 我们希望将注册的用户号码、产品标识或有意义的文字等可读水印嵌入到图像中。近年来, 可读水印的嵌入问题已引起学术界的广泛关注^[3,4]。

本文提出了一种基于统计均值和方差调制的自适应水印算法。曾有研究表明图像经小波变换后各细节子带系数大部分集中在零值附近, 且均值近似为零^[5,6]; 而且当把图像分成每一小子块后, 每一子块细节分量的方差是不同的: 纹理和边缘处的方差大, 平滑区的方差小。这样可以利用方差作为调制因子自适应的调节水印嵌入强度 (在纹理和边缘处嵌入强度大, 而平滑处嵌入强度小), 将一幅具有实际意义的二值图像嵌入到灰度图像中, 实现了在水印不可感知的条件下自适应的嵌入水印信息,

一定程度上解决了水印不可感知性与鲁棒性之间的矛盾。研究发现这种水印嵌入算法普遍适用于经某种变换后变换域的系数值和均值都近似为零的区域, 该方法在水印提取时能够实现水印的盲检测。

1 图像的小波变换分析和统计均值与方差调制 SMVM 方法

1.1 图像的小波变换分析

小波分析属于时频分析的一种, 小波变换是一种信号的时间—尺度 (时间—频率) 分析方法, 它具有多分辨率分析的特点, 在时频两域都具有表征信号局部特性的能力, 且具有与 HVS 屏蔽特性极其相符的变换机制, 同时, 随着 JPEG2000 和 MPEG-4 中小波变换的采用并占据重要地位, 使得 DWT 域水印算法具有广阔的前景。

图像经过离散小波变换, 可将图像分解成 4 个子带, 水平方向 HL、垂直方向 LH、对角线方向 HH 的中高频细节子带和低频逼近子带 LL, 每个子带的大小为原图的 $1/4$, 低频逼近子带可以再进行分解。分解关系为

$$S = LL_3 + D_3 + D_2 + D_1 \quad (1)$$

其中, $D_i = HL_i + LH_i + HH_i$, $i = 1, 2, 3$ 。对 $512 \times 512 \times 8 \text{ bits}$ 的“Lena”图作 3 层小波变换。表 1 是对各子带系数的统计分析。由表 1 可以看出, 低频逼近子带集中了图像的绝大部分能量, 是视觉上最重要的部分, 虽然很稳定, 但改动后对图像的质量影响较大, 故在此区域嵌入水印将很难满足水印

^{*} 收稿日期: 2004-09-11

作者简介: 张冠男 (1980 年生), 女, 硕士研究生; E-mail: zhangguanna1980@yahoo.com.cn

不可感知性的要求。仔细观察发现细节分量系数的分布呈现一定的规律性,即细节分量各子带的大部分系数集中在零值附近,各子带系数的均值近似为零,而且在第一、第二级小波分解的细节分量中这种特性表现得更为明显。当图像分为小子块后,每一小子块经小波分解后这种特性也同样具有(见图 1 所示)。同时由于各块对应的区域不同,处于纹理和边缘附近的子块具有更大的方差值,这样我们可以利用各块中的方差值作为水印信息的一部分,来自适应地调节水印嵌入的强度,在满足水印不可感知的前提下尽可能地嵌入水印信息。

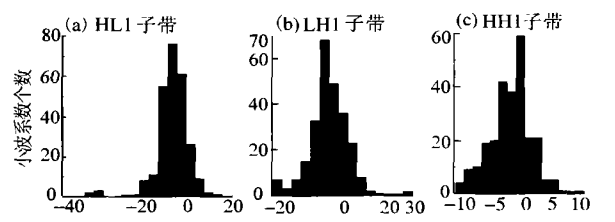


图 1 Lena 图中任意 32×32 子块的细节子带小波系数分布图

Fig 1 Wavelet coefficients distribution chart in a sub-block 32×32 of Lena

表 1 小波分解系数统计表

Tah 1 Wavelet coefficients statistics table

图号	最小值	最大值	均值	方差	能量
LL3	145.9	1656.0	781.4	370.4	781.7
HL3	-505.3	501.8	-3.1	113.4	11.1
LH3	-328.1	379.9	-1.8	61.7	8.1
HH3	-214.8	335.1	-0.1	49.4	7.0
HL2	-241.7	339.0	-0.9	43.2	6.6
LH2	-207.2	234.0	-0.5	26.8	5.2
HH2	-122.0	158.7	0.1	18.6	4.3
HL1	-129.5	163.0	-0.2	16.6	4.1
LH1	-126.0	103.0	-0.1	10.7	3.3
HH1	-64.0	78.5	-0.03	7.1	2.6

1.2 统计均值和方差调制 SMVM 方法

(1) 将小波变换后的细节分量系数进行零均值化调制,即每一点的系数值都减去均值

$$c_j^{l,s}(x,y) = c_j^{l,s}(x,y) - \frac{1}{M} \sum_{(x,y) \in S_D} c_j^{l,s}(x,y)$$
 (2)

式中 $c_j^{l,s}(x,y)$ 是第 j 块内小波系数, l 表示小波分解的级数, s 表示各级小波分解的 LH、HL 和 HH 3 个子带, (x,y) 是小波系数在小波块内的坐标, M 是 S_D 内全部细节分量小波系数的个数;

(2) 若待嵌入的水印信号为“1”,则通过修改该子块的小波系数,使得该块内的统计均值为

E_1 , 即

$$c_j^{l,s}(x,y) = c_j^{l,s}(x,y) - \frac{1}{M} \sum_{(x,y) \in S_D} c_j^{l,s}(x,y) + E_1$$
 (3)

(3) 若待嵌入的水印信号为“0”,则通过修改该子块的小波系数,使得该块内的统计均值为 E_2 , 即

$$c_j^{l,s}(x,y) = c_j^{l,s}(x,y) - \frac{1}{M} \sum_{(x,y) \in S_D} c_j^{l,s}(x,y) + E_2$$
 (4)

其中, $c_j^{l,s}(x,y)$ 为修改后的小波系数。通过以上调整,使得小波系数的分布受到 $wm(j)$ 的调制,“0”对应小波块内 S_D 中系数的均值为 E_1 ,“1”对应小波块内 S_D 中系数的均值为 E_2 。

(4) 设定水印检测时的判决阈值 Th 为 $(E_1 + E_2)/2$, 通过阈值的大小判定嵌入的信息是 0 还是 1。

以上是统计均值调制的基本思想,由于统计均值调制改变了信号的原始幅度,因此为了把由于水印的嵌入而引起的图像失真尽可能的降低,所选取的待调制序列必须是一个趋近于零值附近的序列。由 1.1 节的分析可知,图像小波变换后细节分量的系数值基本满足这一条件,故可以利用小波变换后细节分量系数的这一特性用统计均值调制的方法进行水印嵌入;同时, E_1 和 E_2 作为调制因子,可以控制水印的嵌入强度, E_1 和 E_2 的选取在水印嵌入中起到至关重要的作用。虽然提高强度会增强水印的鲁棒性,但图像会产生明显的失真,水印的不可感知性得不到保证。因此,结合人眼视觉特性和图像自身特性来控制水印的嵌入强度是一种有效的方法。本文中根据图像在纹理和边缘丰富的区域小波变换后系数的方差较大而平滑区方差较小的特性,采用系数的方差作为调制因子来自适应地控制水印的嵌入强度。将 E_1 和 E_2 定义如下

$$E_1 = A + T(j) * B$$
 (5)

$$E_2 = C + T(j) * B$$
 (6)

其中, $T(j)$ 定义如下

$$T(j) = \text{texture}(j)^B = \left[\frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in S_D} \left(c_j^{l,s}(x,y) - E_j \right)^2 \right]^{\beta}$$
 (7)

可以看出, $\text{texture}(j)$ 是第 j 个小波子块中除去近似分量以外的局部方差, β 为一常数。(5) 式和 (6) 式中, A 、 B 、 C 、 D 为强度因子,常数 A 和 C 是保证在平滑区,当 $T(j)$ 接近于 0 时仍能嵌入一定强度的水印。由于不同的子块对应的方差值

不同，经过均值和方差的调制后，纹理大的区域嵌入的强度大，而纹理小的区域嵌入的强度小，这样就实现了“0”“1”水印的自适应嵌入了。

2 水印的嵌入与提取

2.1 水印嵌入算法

①水印信号生成：将嵌入的二值图像利用行扫描将其映射为一维向量 wm ， wm 定义为 $wm = \{wm(i) \mid wm(i) \in \{0, 1\}, 0 \leq i < p \times q\}$ 其中， $p \times q$ 为二值图像大小。

②水印信号嵌入：首先，将原始图像 I 分成 $n \times n$ 的子块，利用伪随机数发生器随意选取任意不重合的 m 个子块，其中 m 大小取决于嵌入的可读水印的长度。如，若嵌入一幅 $p \times q$ 的二值图像，则 $m = p \times q$ 。这里把伪随机数发生器的“种子”作为密钥，不同的密钥对应着不同的嵌入位置，错误的密钥将不能够正确提取出嵌入的水印信息。

然后，利用统计均值和方差调制的思想来进行水印的嵌入：在水印嵌入时，由一维向量 wm 的值来决定如何修改细节分量的小波系数，具体如下

如果 $wm(j) = 1$ ，则按 (3) 式调整 S_D 中的小波系数；

如果 $wm(j) = 0$ ，则按 (4) 式调整 S_D 中的小波系数。

经 (3) 式和 (7) 式修改小波系数，对修改后的小波系数做逆小波变换，得到 $n \times n$ 大小嵌入水印后的子块，最后按照嵌入时的顺序将这些子块放回相应的位置，就得到了嵌入水印后的图像 I_w 。

2.2 水印提取算法

利用本文的嵌入算法可以实现水印的盲检测，具体的检测原理为：

由水印的嵌入过程可知，对于嵌入 1 和嵌入 0 的区域其细节分量的均值是不同的，嵌入 1 的区域均值近似为 0，而嵌入 0 的区域均值则近似为 P ，通过调节水印嵌入的强度，它们之间均值的差异最小也可达到 4 以上（即 $P > 4$ ），这时嵌入水印的图像仍可以保持良好的视觉效果。水印提取时将受到一定程度损坏的图像 I_w 分成同样的子块，利用在嵌入过程中同样的“种子”得到嵌入水印的子块，对每一子块做级小波分解后，利用 (8) 式计算每一小波块 S_D 中细节分量系数的总和 sum^*

$$sum^* = \sum_{(x,y) \in S_D} \left[c_j^{*(l,s)}(x,y) \right] \tag{8}$$

由 (8) 式计算后可知：嵌入 1 的小波块 S_D 中细节分量系数的总和 sum^* 近似为 0，而嵌入 0 的区域则近似为 $M \times P$ （这里， M 是 S_D 内小波系数的个数，

即全部细节分量系数的个数）。把 sum^* 与一个预先指定好的固定阈值 Th 相比较，若 $sum^* < Th$ ，则 $wm(j)$ 译为“1”，否则， $wm(j)$ 译为“0”。

当恢复出水印序列信息后，再按照水印构造的逆过程，得到一幅二值图像。

3 实验结果与分析

本文中选取小波分解级数 $l = 2$ 。因为选择不同的小波基对嵌入水印的性能有很大影响，采纳文献 [5] 中的建议，在小波分解中采用比较适合于图像水印嵌入的“haar”小波。实验中将原始图像分成 8×8 大小的子块，水印为 20×40 写有“JLU”字样的二值图像。实验中采用一系列的 ($512 \times 512 \times 8$ bits) 图像（‘Lena’，‘Plane’，‘Boat’，‘Elaine’，‘Baboon’）作为测试图像，来评估水印嵌入的不可感知性、鲁棒性等性能。

(1) 不可感知性。为了评估由于嵌入水印而引起的视觉质量的下降，采用了主观视觉质量测试和峰值信噪比 (PSNR) 来评价本文提出的水印算法。主观视觉质量测试基于 ITU-R REC. 500^[9]，共分 5 个等级，其中“5”代表“不可感知”，“4”代表“可以感知到，但不感觉讨厌”...“1”代表“感到非常讨厌”。峰值信噪比可以用来评估原始图像与水印图像之间的相似程度。视觉质量测试和峰值信噪比的值列于表 2。从表 2 中可以看出 PSNR 的值很大（一般在 40 以上），这表明由于水印的嵌入而引起的图像质量下降很小。视觉质量测试的值一般在 4.5~5 之间，这意味着水印几乎是不可感知的。这也可以从图 2a，b 与 c 的比较中看出。

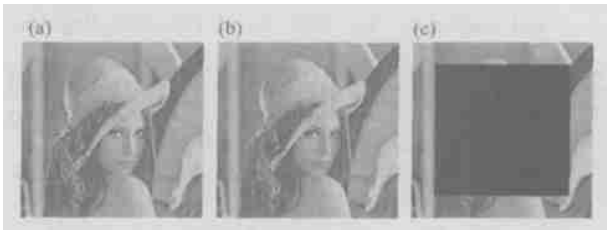


图 2 嵌入印前后图像 Lena 的视觉比较
Fig 2 Images of original Lena (a),
watermarked Lena (b) and 3/4 cropped Lena (c)

表 2 视觉质量测试和峰值信噪比
Tab 2 The average quality rating of
the watermarked images and PSNR

灰度图像	Lena	Plane	Boat	Elaine	Baboon
视觉质量测试	4.75	4.50	5.00	5.00	5.00
PSNR/dB	41.3423	40.5594	40.8400	41.3968	40.1515

(2) 鲁棒性。分别对水印图像做 JPEG 压缩、JPEG2000 压缩、添加噪声处理、剪切和像素移位等操作，从受到各种攻击的水印图像中提取水印的具体实验结果见表 3。仿真结果表明，本文提出的方法能够较好的满足水印不可感知性的要求，且可以实现水印的盲检测，并对噪声污染、JPEG 压缩、剪切、像素移位等多种攻击表现出较强的鲁棒性。

4 结 论

本文提出了一种新的嵌入可读信息的自适应盲水印算法。通过分析图像经离散小波变换后细节子

带系数的特性，把细节子带系数的均值和方差作为水印信息的一部分来自适应地修改图像小波分解后某些细节子带的系数值，在满足水印不可感知性的条件下最大强度地嵌入水印信息，实现了水印不可感知性和鲁棒性之间的折衷。仿真结果表明，本文提出的方法能够较好的满足水印不可感知性的要求，且可以实现水印的盲检测，并对噪声污染、JPEG 压缩、剪切、像素移位等多种攻击表现出较强的鲁棒性。虽然本文算法对同步攻击的鲁棒性较弱，但对于某些特定的场合还是具有一定的实际应用意义的。

表 3 水印抵抗各种攻击的实验结果

Tab.3 Experimental results on water marks resisting various attacks								
攻击种类	高斯噪声	高斯噪声	高斯噪声	高斯噪声	椒盐噪声	椒盐噪声	椒盐噪声	椒盐噪声
	0.001	0.003	0.006	0.01	0.001	0.005	0.01	0.02
误码率/%	0.00	0.63	13.88	18.50	0.37	3.00	4.75	10.75
提取水印								
攻击种类	无攻击	JPEG (90%)	JPEG (80%)	JPEG (70%)	JPEG (60%)	JPEG2000 压缩比 1:5	JPEG2000 压缩比 1:8	JPEG2000 压缩比 1:11
误码率/%	0.00	0.00	0.13	5.37	16.38	0.00	6.75	17.25
提取水印								
攻击种类	剪切 1/4 (右上角)	剪切 1/4 (右下角)	剪切 2/4 (上半部)	剪切 3/4 (中间)	水平移位 2 像素	水平移位 4 像素	垂直移位 2 像素	垂直移位 4 像素
误码率/%	6.88	7.25	12.63	14.87	11.13	18.38	8.50	15.00
提取水印								
攻击种类	直方图均衡	对比度调整 (0.2~0.8)	高斯滤波 (3×3)	PSNR-100 (20.5346)	PSNR-80 (22.5565)	PSNR-60 (25.1881)	PSNR-40 (28.9457)	PSNR-20 (35.3738)
误码率/%	1.75	2.88	4.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
提取水印								

参考文献:

[1] PODILBUK C I, DELP E J. Digital watermarking: Algorithms and applications[J] . IEEE Signal Processing Magazine, 2001, 18(4): 33—46.

[2] COX I J, MILLER M. A review of watermarking and importance of perceptual modeling[A] . Proc. SPIE Human Vision and Imaging, SPIE—3016, Feb 1997.

[3] 杨恒伏, 陈孝威. 小波域鲁棒自适应公开水印技术[J] . 软件学报, 2003, 14(9): 1652—1660.

[4] KUTTER M, BHATTACHARJEE S K, EBRAHIMI T. Towards second generation watermarking schemes [A] , ICIP 99, 1999.

[5] 刘九芬, 黄达人, 胡军全. 数字水印中的正交小波基[J] . 电子与信息学报, 2003(4): 453—459.

[6] Recommendation ITU—RBT. 500, Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures.

A Blind Watermarking Algorithm Based on SMVM

ZHANG Guan nan, WANG Shu xun, CUI Li ti

(Institute of Communication Engineer, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: To propose an adaptive blind watermarking algorithm based on SMVM. By analyzing the characteristic of detail subband coefficients of the image after discrete wavelet transform, the mean and variance of the detail subbands are applied to modify the wavelet coefficients adaptively, and the embedded watermark is invisible to human eyes and adapted to the original image. This is a blind watermark algorithm to confirm the copyright without the original image and the watermark is a meaningful binary image. The experimental results and attack analysis show that the proposed algorithm is effective and robust to common image processing operations and some geometric attacks, such as JPEG /JPEG2000 lossy compression, additive noise, cropping, pixel shift, and so on.

Key words: digital watermark; discrete wavelet transform; blind detection; SMVM