

基于图像小波变换的自适应数字水印^{*}

Wavelet Transform Based Image Adaptive Watermarking

王卫卫¹ 杨波² 宋国乡¹

(¹西安电子科技大学理学院数学系 ²西安电子科技大学通信学院 西安710071)

Abstract An image adaptive digital watermarking algorithm based on discrete wavelet transform (DWT) is proposed. With wavelet transform, the image is decomposed into subband coefficients corresponding to different spatial position and frequency, among which a tree structure exists. Using the tree structure, the lowest approximation coefficients and mid-frequency subbands coefficients are classified into two groups. The watermark is embedded into these coefficients with different strength respective to its class while other DWT methods embed watermarks into the middle or high frequency components. Experimental results show the algorithm is invisible and robust to certain common distortions.

Keywords Digital watermarking, Copyright protection, Wavelet transform

1. 引言

随着多媒体技术和网络技术的迅速发展及广泛应用,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。传统的加密技术已经不足以解决问题,而数字水印技术在这方面显示出了巨大的潜力。数字水印算法将一个版权识别代码序列,例如作者ID,公司标志,产品序列号等作为水印嵌入到图像(空域或变换域)中,利用它证明版权归属问题,跟踪数字产品拷贝的非法销售和使用,或者用于鉴定数字产品的可靠性。

数字水印应具有以下基本特征^[1]:可证明性,应能为受到版权保护的信息产品的所有权提供完全和可靠的证据。不可感知性,对于图像来讲,一方面是指水印的不可见性,在宿主数字媒体中嵌入一定数量的附加信息之后,不能引起明显降质,隐藏的数据不易觉察。另一方面是指用统计方法不能恢复出水印。鲁棒性:数字水印必须对施加于宿主媒体的变换或操作具有一定的免疫性,不能因为某种变换操作而导致水印丢失,即企图消除水印的做法将引起宿主媒体感官质量的破坏,使其失去商用价值。常见的变换操作主要有:信道噪音,滤波(低通,高通或中值),有损压缩(如JPEG),重采样等。

现有的图像水印算法基本上可分为两类:空间域方法和变换域方法。空间域方法通过直接改变图像某些像素的灰度值来加入水印,而变换域方法先对图像作某种变换,例如DCT、DWT,然后通过改变某些变换系数来加入水印。变换域方法的优点是:(1)变换域中嵌入的水印信号能量可分布到空域的所有像素上,有利于保证水印的不可见性;(2)在变换域中,可以更方便地将人类视觉系统(HVS)的某些特性结合到水印算法中;(3)变换域方法可与现有的图像压缩方法兼容,从而实现压缩图像的水印嵌入。

本文研究小波域图像水印。为了实现鲁棒的水印,主要问题是选择将水印信号放在宿主信号的哪些位置,如何放?Cox等^[2]认为图像水印应放在视觉上最重要的分量上。由于视觉上重要的分量是图像信号的主要成分,图像信号的大部分能量都集中在这些分量上,在图像有一定失真的情况下,仍能保

留主要成分,即视觉上重要的分量的抗干扰能力较强,因此将水印嵌入在这些分量上,可获得较好的鲁棒性。当水印信号相对宿主信号较小时,还可以保证不可见性。而图像小波分解的最低层逼近系数正好符合这一要求,它集中了图像的绝大部分能量,是视觉上最重要的成分,所以适合于嵌入水印,可以保证水印的鲁棒性;但低频成分是图像的平滑部分,人眼对这部分比较敏感,在这部分嵌入水印容易引起图像失真,影响水印的不可见性。因此本文利用小波系数的特点:即各个方向(水平、垂直、对角)上的小波系数对应该方向上的高频成分,表示图像的纹理和边缘,以及各层小波系数之间的树结构关系对最低层逼近系数进行分类,一类对应于具有强纹理的区域,另一类对应于具有弱纹理的区域,对不同类采用不同的嵌入对策,从而保证了水印的不可见性。但是只在最低层逼近中嵌入水印,水印序列的长度有限,所以对各个方向上的中频子带也采用了类似的对策嵌入水印,以提高图像的水印承载量。

2. 水印算法

在对图像加水印之前,首先利用离散小波变换^[3]将图像变换到小波域,得到图像的多分辨率表示; $LH_n, HL_n, HH_n (n=1, 2, \dots, N), LL_N$ 。 LL_N 表示最低频成分,是图像的一个低分辨率(粗尺度)逼近, $LH_n, HL_n, HH_n (n=1, 2, \dots, N)$ 分别表示 n 层上的水平低频垂直高频成分,水平高频垂直低频成分以及对角方向高频分量。各个子带中的系数可构成一个树结构^[4],三层小波变换系数的树结构如图1所示。具体的树结构定义如下:

$$tree(LL_N(x, y)) = tree(HL_N(x, y)) \cup tree(LH_N(x, y)) \cup tree(HH_N(x, y)) \quad (1)$$

$$tree(HL_n(x, y)) = tree(HL_{n-1}(2x-1, 2y-1)) \cup tree(HL_{n-1}(2x, 2y-1)) \cup tree(HL_{n-1}(2x-1, 2y)) \cup tree(HL_{n-1}(2x, 2y))$$

$$n = N, N-1, \dots, 2 \quad (2)$$

$tree(LH_n(x, y)), tree(HH_n(x, y)) (n = N, N-1, \dots, 2)$ 的定义类似于(2)式。

^{*}基金项目:国家自然科学基金(No. 69972034)资助课题,国防科技重点实验室资助课题(99JS06. 3. 1. DZ0112)。

$$\begin{aligned} tree(HL_1(x,y)) &= HL_1(x,y), tree(LH_1(x,y)) = LH_1(x,y) \\ tree(HH_1(x,y)) &= HH_1(x,y). \end{aligned} \quad (3)$$

2.1 水印嵌入

水印嵌入的具体步骤如下:

(1) 小波变换 设有原始图像 $I(x,y)$, 对它作三层离散小波变换, 并将变换系数 $WI(u,v) = DWT(I(x,y))$ 按图1所示的树结构存放。

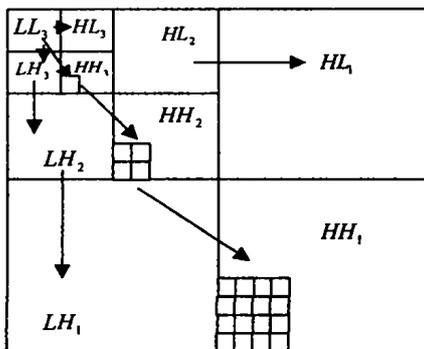


图1 图像三层小波变换系数的树结构图

(2) 分类 文[3]中指出, 图像纹理越强, 水印的可见性门限越高, 即可以嵌入较高强度的水印信号。根据图像的局部纹理复杂性尽可能提高嵌入水印的强度, 是提高水印鲁棒性的有效办法。因此, 对最低频系数 LL_3 按其相应位置处局部纹理的强弱分为两类: 具有较强纹理的为第一类, 记为 S_1 ; 具有较弱纹理的为第二类, 记为 S_2 。由于小波变换的高频系数本身就包含了图像的纹理或边缘, 高频系数绝对值越大, 表明相应位置的纹理越强, 作阈值处理, 可以简化运算。因此, 相应位置纹理的强弱可以用子树中高频系数的绝对值大于某个门限 T 的个数来衡量。具体的分类算法描述如下:

若 $number\{|WI(u,v)| > T, WI(u,v) \in Tree(LL_3(x,y))\} > T_1$, 则 $LL_3(x,y) \in S_1$; 否则, $LL_3(x,y) \in S_2$, T, T_1 为预先设定的阈值, 影响水印的不可见性和鲁棒性。本文取 T 为最大系数绝对值的一半, $T_1 = 10$, 也可以有不同的选取。

对 HL_i, LH_i 和 $HH_i (i=3,2)$ 也采用类似的方法分类, 但采用的门限值不同。对 HL_3, LH_3 和 HH_3, T 和 T_1 与 LL_3 的取法相同。对 HL_2, LH_2 和 HH_2, T 缩小一半, T_1 取为 $T_1 = 5$ 。

(3) 水印嵌入 对 LL_3, HL_i, LH_i 和 $HH_i (i=3,2)$ 根据分类嵌入不同强度的水印。水印 W 为二值伪随机序列, 长度 K 与 LL_3, HL_i, LH_i 和 $HH_i (i=3,2)$ 中重要系数的个数相同, 即 $W = (w_i = \pm 1, 1 \leq i \leq K)$ 。

若 $|WI(u,v)| > T_{thresh}$, 则认为它是重要系数, 根据分类在其中嵌入水印:

$$WI'(u,v) = \begin{cases} WI(u,v)(1 + \alpha_1 w_i), & \text{if } WI(u,v) \in S_1 \\ WI(u,v)(1 + \alpha_2 w_i), & \text{if } WI(u,v) \in S_2 \end{cases} \quad (4)$$

T_{thresh} 是针对不同层自适应选取的。 α_1, α_2 为调制因子, 影响水印的鲁棒性和不可见性, α_1, α_2 越大, 鲁棒性越好但不可见性变差。 α_1, α_2 可以通过实验或利用人眼视觉特性选取。本文通过实验方法, 对 LL_3 选取 $\alpha_1 = 0.02, \alpha_2 = 0.01$, 对 HL_3, LH_3 和 $HH_3, \alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.1$, 对 HL_2, LH_2 和 $HH_2, \alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.1$, 这样既能保证不可见性; 又具有较强的鲁棒性。

(4) 小波反变换 对嵌入水印后的系数进行小波反变换, 得到含有水印的图像:

$$I'(x,y) = DWT^{-1}(WI'(u,v))$$

2.2 水印检验

水印检验采用假设检验, 设 I, I' 分别表示原始图像和待测图像, \tilde{W} 为待检验水印序列。首先对 I, I' 作小波变换, 得到 $WI(u,v) = DWT(I(x,y))$ 和 $WI'(u,v) = DWT(I'(x,y))$ 。然后按下面方式提取水印信号 \tilde{W} : 若 $|WI(u,v)| > T_{thresh}$, 则认为 $WI(u,v)$ 中含有水印, 如果 $WI'(u,v) - WI(u,v) \geq 0$, 则提取出 $\tilde{w}_i = 1$, 否则 $\tilde{w}_i = -1$; 若 $WI(u,v) < 0, \tilde{w}_i = -\tilde{w}_i$ 。定义 W 与 \tilde{W} 的相似度为

$$Sim(W, \tilde{W}) = \sum_{i=1}^K (w_i \cdot \tilde{w}_i) / \sqrt{\sum_{i=1}^K (\tilde{w}_i)^2} \quad (5)$$

若 $Sim(W, \tilde{W}) > T_2$, 则认为待测图像 I' 中含有水印 W ; 否则, 认为没有水印。

T_2 的选择要同时考虑两种发生错误的概率: 虚警概率和漏警概率, 虚警概率是指待测图像中不包含水印, 而检测器输出结果却表明含有水印的概率; 漏警概率是指待测图像中包含水印, 而检测器输出结果却表明不含有水印的概率。减小 T_2 , 漏警概率降低而虚警概率提高, 相反, 增大 T_2 , 虚警概率降低而漏警概率提高。由文[1]知, 若 W 与 \tilde{W} 不相关, 则 $sim > 6$ 的情形是极不可能的, 因此本文取 T_2 为 6。

3. 实验结果

本文以 $256 \times 256 \times 8$ 的 'Lena' 图像为例对算法进行了仿真实验。实验中的一些参数在算法描述中已经给出。水印序列 $W = \{w_i = \pm 1, 1 \leq i \leq K\}$ 是利用均值为 0, 方差为 1 的正态分布生成的伪随机二值序列。对图像作三层小波分解, 实验中所用小波滤波器为 'D4' [4]。原始图像见图 2(a), 加水印后的图像见图 2(b), 水印序列长度 $K = 2452, psnr = 42db$, 检测器输出 $Sim = 49.52$, 从显示器上看两幅图像没有视觉差别。图 3 是水印检测器对 1000 个随机产生的水印序列的响应, 其中第一个是对实际嵌入的水印序列的响应, 可以看出, 检测器对正确水印序列的输出远远高于对不正确水印序列的输出, 这表明该算法具有很低的虚警概率和漏警概率。

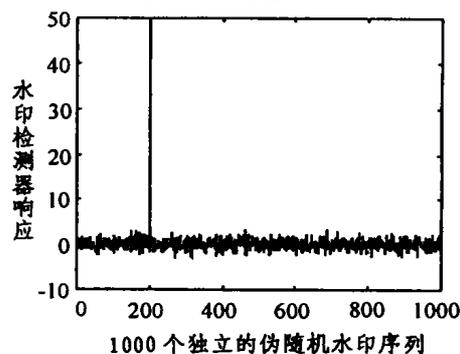


图3 水印检测器对1000个互相独立的伪随机水印序列的响应。只检测出来一个, 即第200个水印序列, 它是实际嵌入的水印序列

为了考察算法的鲁棒性, 实验中对加水印图像(图2(b))进行了 JPEG 压缩、缩放、剪切、中值滤波、加噪等处理, 检测器输出表明水印仍然存在。图4是 JPEG 压缩的结果, 压缩质量为 15%, 检测器输出 $Sim = 7.6$; 水平与垂直方向 2:1 采样后, $psnr = 24db, Sim = 13.45$; 图5是剪掉 75% 的数据, 全用 0 灰度值(黑色)代替, 只留下中心 25% 数据的结果, $psnr = 8db, Sim = 16.32$; 图6是 7×7 中值滤波后的结果, $psnr = 25db, Sim = 12.76$; 5×5 中值滤波后, $psnr = 27db, Sim = 17.89$; 9×9 中值滤波后, $psnr = 24db, Sim = 8.72$; 图7是加 40db 的 Gauss 白

噪声后的结果, $psnr=16db$, $Sim=9.98$;加20dbGauss 白噪声后, $psnr=22db$, $Sim=19.23$;加30dbGauss 白噪声后, $psnr=18db$, $Sim=12.24$;加50dbGauss 白噪声后, $psnr=14db$, Sim

$=7.39$ 。由图4~7看出,虽然经过处理后的水印图像质量有严重下降,但水印检测器响应值仍然高于6,表明水印仍然存在。所以该算法对这些通常的图像处理具有较强的鲁棒性。



(a) 原始图像



(b) 加水印图像

图2 水印的不可见性比较



图5 剪掉四周 75%数据, 值留下中心 25%数据的结果



图6 7×7 中值滤波的结果



图4 JPEG 压缩后的水印图像, 压缩质量为 15%



图7 加Gaussian白噪声的结果

结论 本文利用图像小波变换系数的树结构关系和各层小波系数的特点,将最低频逼近和中频系数分为两类:一类对应于强纹理区域,另一类对应于弱纹理区域,根据人眼视觉特性,在强纹理区域嵌入较强水印,在弱纹理区域嵌入较弱的水印,使水印具有不可见性和较好的鲁棒性。

参考文献

1 刘瑞琦,谭铁牛. 数字图像水印研究综述[J]. 通信学报, 2000, 21(8): 39~48

2 Cox I J, Killian J, Leighton T. A secure, robust watermark for multimedia[J]. IEEE Trans. Image Processing, 1997, 6(12): 1673~1687
 3 Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF conference series in applied mathematics, SIAM Ed
 4 Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE trans. On Signal Processing, 1993, 41(12): 3445~3462

(上接第61页)

离小波已证明有潜力改进编码器的性能。

基于小波变换的视频编码研究更具挑战性。在视频编码中将2-D小波变换与时域的运动估计预测结合起来取代当前的基于DCT的编码,有许多人在从事这方面的研究。把视频信号看作3维数组,从而使用3-D小波分析实现对其压缩也是可能的。这一方法遇到的困难源于离散小波变换的基本属性,离散小波变换是一个空间变化算子,而视频信号包含有目前离散小波变换不适合处理的时间变化特性。

参考文献

1 李建平,等. 小波分析与信号处理. 重庆出版社, 1997
 2 Xiong Z, et al. A Comparative Study of DCT- and Wavelet-Based Image Coding. 见: 微软中国研究院论文集, Oct. 1999
 3 Tekalp A M. 数字视频处理. 电子工业出版社, 1998
 4 Coifmam R R, et al. Signal processing and compression with wavelet packets. In: Proc. of Intl. Conf. on Wavelet Applications, Toulouse, France, 1992. 8~13
 5 Mallat S G. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Trans. Pattern Anal. And Machine Intell., vol. PAMI-11, July 1989
 6 Villasenor J D, Bellzer B, Liao J. Wavelet filter evaluation for image compression. IEEE Trans. On Image Processing, 1995, 4(8)
 7 Lu J, Algazi V R, Estes R R. A comparative study of wavelet image coders. Optical Engineering, 1996, 35(9): 2605~2619
 8 Gish H, Pierce J N. Asymptotically efficient quantizing. IEEE Transactions on Information Theory, 1968, IT-14(Sep.): 676~683

9 Farvardin N, Modestino J W. Optimum quantizer performance for a class of non-Gaussian memoryless sources. IEEE Transactions on Information Theory, 1984, 30(May): 485~497
 10 Lewis A S, Knowles G. Image compression using the 2-d wavelet transform. IEEE Transactions on Image Processing, April 1992
 11 Shapiro J. Embedded image coding using zero-trees of wavelet coefficients. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(Dec.)
 12 Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, June 1996
 13 Ramchandrandran K, Vetterli M. Best wavelet packet bases in a rate-distortion sense. IEEE Transactions on Image Processing, 1992
 14 Smith J R, Chang S F. Frequency and spatially adaptive wavelet packets. In: Proc. ICASSP, May 1995
 15 Davis G, Nosratinia A. Wavelet-Based Image Coding: An Overview. Applied and Computational Control, Signals, and Circuits, 1998, 1(1)
 16 Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT. IEEE Transactions on Image Processing, 1998
 17 JPEG2000 Verification Model 5. 0 (Technical description). ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1420. Aug. 1999
 18 Sweldens W. The lifting scheme: A new philosophy in biorthogonal wavelet constructions. in Wavelet Applications in Signal and Image Processing III, SPIE 2569, 1995
 19 李波, 汪海. 基于小波包变换的分层预测图像压缩算法. 计算机学报, 1999(8)
 20 程正兴. 小波分析算法与应用. 西安交通大学出版社, 1997