

预测滤波器在空域盲加性水印系统中的应用

年桂君¹, 刘鸿石², 车晓镭¹, 孙晓颖³

(1. 吉林大学 物理学院, 长春 130012; 2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130026; 3. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130022)

摘要:为了提高空域图像水印算法的性能,提出将一种基于载体图像最小平方的预测滤波器用于空域加性水印的嵌入与检测。在嵌入端,用预测滤波器构造空域掩蔽函数,这种用预测残差作为控制嵌入强度的掩蔽函数与人类视觉的感知特性相吻合,在相同的视觉质量下大大提高了水印的嵌入强度。在水印检测时,为了有效抑制载体信号对相关检测器的干扰,采用预测滤波器对遭受攻击的水印作品进行预测滤波,得到的预测残差是对图像中水印信号的估计值,再与扩频序列共同送入相关检测器提取水印。实验证明,这种方法对一般信号处理及中轻度几何攻击具有较好的鲁棒性。

关键词:信息处理技术; 数字水印; 掩蔽函数; 预测滤波器

中图分类号:TN918 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2011)01-0249-05

Prediction error filter applied in blind additive watermarking algorithm

NIAN Gui-jun¹, LIU Hong-shi², CHE Xiao-lei¹, SUN Xiao-ying³

(1. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract:In order to improve the performance of spatial image watermarking algorithm, a kind of prediction error filter based on cover image Least-Square (LS) was proposed, which is applied to the embedding and detecting processes. In the embedding process, the filter was used to produce a new spatial perceptual mask. The cover image prediction error sequence controls the watermark strength and matches well with the properties of human visual system. In the same visibility quality metrics, the scheme can embed more watermark strength. In the detection process, in order to reduce the cover image effect on the correlation detection, the LS prediction error filter was applied to the received image and estimation of the masked watermark. The normalized correlation measure for the resulting error sequence was computed. It is proved that the scheme is robust to general signal processing and geometric attacks.

Key words:information processing; digital watermarking; masking function; prediction error filter

收稿日期:2010-06-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(60940011);吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(421033311411).

作者简介:年桂君(1973-),女,博士,讲师. 研究方向:多媒体信息安全. E-mail:niangj@jlu.edu.cn

通信作者:刘鸿石(1963-),男,高级工程师. 研究方向:多媒体信息安全. E-mail:liuhs@jlu.edu.cn

根据所基于的域不同,数字水印嵌入技术主要分为时空域算法、变换域算法和压缩域算法三大类,一般认为时空域算法的鲁棒性不如变换域和压缩域。实际上,并不是所有的水印应用均要求对所有的处理操作都具有鲁棒性^[1]。相反,水印只需要在介于嵌入和检测之间的可能的处理操作中存活即可。图像水印空域算法具有算法简单、实时性较强等特点,而且由于图像相邻像素具有很强的相关性,即使水印图像在受到中轻度的几何攻击后,图像中任一像素仍然可以合理地从它们的相邻像素值来预测,预测滤波器可以实现这一任务。本文通过引入预测滤波器提高了水印系统的不可感知性和鲁棒性。实验证明,该水印方案用于鲁棒水印系统时对 JPEG 压缩、滤波、中轻度几何攻击等具有较好的鲁棒性。通过调整嵌入位置及嵌入强度也可用于脆弱水印系统。

1 基于预测滤波器的视觉掩蔽函数

一个有效的水印系统首先应具有保真度,另外根据具体应用需要具有一定的容量及有针对性的鲁棒性。通常在嵌入容量一定的情况下,保真度与嵌入强度成反比,而鲁棒性又与嵌入强度成正比。如果能够依据掩蔽特性来自适应调整嵌入强度,则在三者之间将能够寻找到一个最优的平衡。文献[2]提出了一种基于图像局部特征的噪声可见函数(NVF);Delaigle 等^[3]将纹理和边缘的限带噪声引入掩蔽函数;J. F. Kutter 等^[4]采用局部等对比度测量方法给出了基于人类视觉的灵敏度及掩蔽效应的感知模型。更多有关掩蔽的技术可以参考文献[5-6]。本文提出一种新的基于载体图像的最小平方预测误差的空域掩蔽函数,由于预测残差值在图像平滑部分要比纹理和边缘部分的小,因此用这种预测残差作为控制嵌入强度的掩蔽函数与人类视觉的感知特性相吻合。

1.1 预测滤波器

多媒体内容通常表现出很强的空间或时间相关性,对于图像,相邻像素的亮度一般差不多,任何一幅图像中的像素都可以合理地从它们相邻像素值来预测。预测滤波器的预测系数通过使代价函数

$$J_{LP} = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} |x(i, j) - \hat{x}(i, j)|^2 \quad (1)$$

最小计算得到,即选择最小平方预测误差为最佳准则。式中的 LP 表示线性预测; $N_1 \times N_2 = N$

表示图像的像素个数; $\hat{x}(i, j)$ 是图像 $x(i, j)$ 通过公式

$$\hat{x}(i, j) = \check{a}_x^T \check{x}(i, j) \quad (2)$$

得到的预测值。式中的 \check{a}_x 是长为 $l^2 - 1$ 元向量的预测系数; $\check{x}(i, j)$ 是图像中 $l \times l$ 邻域除了中心像素外其余像素先行后列构成的一维向量, l 为奇数。对于每一个系数(即 \check{a}_x 中的每一个元素)对式(1)求导,令导数为零,在假设 $x(i, j)$ 具有零均值和方差为 σ^2 的条件下,解出联立方程的解集得到

$$\check{a}_x = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{r}_x \quad (3)$$

式中: \mathbf{R}_x 和 \mathbf{r}_x 分别是输入邻域像素 \check{x} 的自相关矩阵和互相关矩阵,即 $\mathbf{R}_x = \sum_i \sum_j \check{x} \check{x}^T$; $\mathbf{r}_x = \sum_i \sum_j \check{x} x(i, j)$, 这里

$$\check{x} = \begin{bmatrix} x(i - \frac{l-1}{2}, j - \frac{l-1}{2}) \\ \vdots \\ x(i - \frac{l-1}{2}, j + \frac{l-1}{2}) \\ \vdots \\ x(i, j - \frac{l-1}{2}) \\ \vdots \\ x(i, j - 1) \\ x(i, j + 1) \\ \vdots \\ x(i, j + \frac{l-1}{2}) \\ \vdots \\ x(i + \frac{l-1}{2}, j - \frac{l-1}{2}) \\ \vdots \\ x(i + \frac{l-1}{2}, j + \frac{l^2-1}{2}) \end{bmatrix}$$

通过求解式(3)便可得到线性预测系数 \check{a}_x 。预测误差滤波器是一个中心为 1、其他元素为 $-\check{a}_x(i, j)$ 的 $l \times l$ 维矩阵。这里将其一维化为一个向量用 a_x 表示,则预测残差序列

$$e_x = x(i, j) - \check{a}_x^T \check{x}(i, j) \text{ 或 } e_x = a_x^T x(i, j) \quad (4)$$

1.2 视觉掩蔽函数

从上边滤波器的求解过程可以看出,如果图像某一像素的邻域是纹理边缘(意味着这个邻域内的像素的相关性很差),式(3)中 r_x 的值较小,

接近于 0, \mathbf{R}_x 将是一个对角阵, 求得的线性预测系数 $\tilde{\mathbf{a}}_x$ 将近似为 0, 依据式(4)将得到很小的预测残差; 相反如果图像某一像素的邻域比较光滑(意味着这个邻域内的像素的相关性很强), 那么求得的线性预测系数 $\tilde{\mathbf{a}}_x$ 值较大, 得到的预测残差也较大, 即预测残差能够很好地描述图像的局部特性, 与人类视觉系统的视觉特性相吻合, 因此可以用它来构造掩蔽函数

$$PE(i, j) = \frac{|e_x(i, j)|}{\max |e_x(i, j)|} \quad (5)$$

它是一个归一化的预测残差, 取值范围为 [0, 1]。

用简单的嵌入公式

$$y(i, j) = x(i, j) + M(i, j) \cdot \alpha \cdot w(i, j) \quad (6)$$

来比较在相同嵌入强度 α 的情况下, 用不同的掩蔽函数(M 分别为文献[3]的 HVS(人类视觉感知函数)、文献[1]的 NVF(噪声可见函数)和本文的 PE)控制嵌入水印能量得到水印图像 $y(i, j)$ 的保真度, $w(i, j)$ 代表水印信息模板, 服从标准正态分布且与载体图像大小相等。对含水印图像质量采用客观评价方法, 这里分别用基于像素的度量方法—峰值信噪比 PSNR 和基于 Watson 模型的人类视觉系统的度量方法—整体视觉失真 TPE(在 Checkmark 基准测试工具中有源代码), 从表 1 的实验结果可以看出, 在相同的嵌入强度下用本文的掩蔽函数嵌入水印的视觉质量最高。从另外一个角度看, 在相同的视觉质量下, 用本文

表 1 三种掩蔽函数掩蔽效果的比较

Table 1 Comparison for three mask functions

掩蔽函数 M	不可见性 度量	嵌入强度 α					
		6	4	2	1	0.3	0.2
(不用掩蔽)	PSNR/dB	15.881	19.189	25.111	31.107	41.282	44.442
	TPE	0.8019	0.5469	0.2762	0.1386	0.0429	0.0296
NVF	PSNR/dB	17.977	21.348	27.302	33.284	43.271	46.212
	TPE	0.6113	0.4142	0.2086	0.1049	0.0332	0.0233
HVS	PSNR/dB	25.164	29.661	36.369	41.332	45.699	49.551
	TPE	0.2631	0.1002	0.0889	0.0623	0.02523	0.0181
PE	PSNR/dB	38.129	41.456	46.507	49.772	51.100	51.127
	TPE	0.0567	0.0387	0.0215	0.0141	0.0116	0.0115

的掩蔽函数可以嵌入更大强度的水印。

2 数字水印算法

2.1 空域加法嵌入水印

在空域采用加法规则嵌入水印。首先, 加法规则有利于采用相关检测方法提取水印, 另外与乘性嵌入规则相比引起的改动相对要小, 有利于保证水印的不可感知性; 其次, 由于图像相邻像素具有很强的相关性, 即使水印图像在受到中等程度以下的几何攻击后, 图像中任一像素仍然可以合理地从它们的相邻像素值来预测, 使得这种算法的抗几何攻击能力优于变换域算法。例如在旋转 0.2° 的情况下, 变换域算法将无法正确提取水印, 而空域算法则可以完全正确提取。嵌入公式同式(6), 其中 M 用式(5)的掩蔽函数, $w(i, j)$ 代表多比特信息经码分复用(CDMA)调制后得到的水印模板。码分复用的调制方法利用了嵌入同一作品中的几个不相关的参考标志在线性相关系统

中相互没有影响的性质。为了在相关检测时使不同水印比特之间具有最大的可辨别性, 将水印信号经纠错编码并随机交织后的单极性二值序列 $W = \{W(k) \in \{0, 1\}, 1 \leq k \leq L\}$ 转换成双极性序列, 即 W 中每一位取值“0”的全部用“-1”代替, 得到 $W = \{W(k) \in \{-1, 1\}, 1 \leq k \leq L\}$ 。纠错编码的目的是降低信道误码率, 随机交织的目的是使水印比特服从贝努利分布^[7]。对应每一位水印比特给定一个种子, 产生 L 个独立同分布的高斯扩频码 $G = \{G_k(N_1, N_2), k = 1, 2, \dots, L\}$, 应用 CDMA 编码后, 水印信号为 $w(i, j)$, 满足如下关系

$$w(i, j) = \sum_{k=0}^L W(k) G_k(N_1, N_2) \quad (7)$$

$$k = 1, 2, \dots, L$$

$w(i, j)$ 是一个 $N_1 \times N_2$ 维的矩阵。在给定嵌入容量 L 和 PSNR 值 T_{PSNR} 时, 根据文献[6]可以求出嵌入强度 α 的近似值

$$\alpha = \frac{b_m^2}{L} 10^{-\frac{T_{PSNR}}{10}} \quad (8)$$

式中: b_m 为图像中的最大灰度值。

2.2 水印检测

从广义上讲,一切检测算法只要是计算作品模板间的线性函数并且将函数值与特定阈值进行比较,都可以认为使用了相关检测。目前大部分文献中提及的水印系统都是基于相关性检测的^[6],水印检测中涉及的相关性有线性相关、归一化相关以及相关系数。两个向量之间的线性相关是两者对应元素的乘积的平均值;对两个向量先归一化为单位向量,然后再计算对应元素乘积的平均值即得到归一化相关值;如果先将两个向量均值减到 0 再计算归一化相关,那么就可以求得向量之间的相关系数。线性相关的一大问题在于检测值很大程度上依赖于从作品中提取的向量的幅度,也就是说线性相关器测量的是水印信号的能量。这表明水印对于一些简单处理,比如改变图像的亮度及对比度,不具有鲁棒性。而归一化相关性测量的是信噪比,在信号非常弱时,只要噪声相对也很弱,信噪比就可以很高^[8]。因此,本文选用归一化相关检测水印,第 k 比特水印检测值

$$c_k = \sum_{i=1}^N \frac{rG_k(i)}{|G_k(i)| |r|} \quad (9)$$

式中: r 为输入检测器的信号; G_k 为第 k 比特水印的调制扩频码; 检测阈值定为 0。

嵌入水印信息后,作品 y 在到达水印检测器之前,通常会遭受各种无意或恶意的攻击,比如图像有损压缩、数字图像的模拟化(如打印、印刷、复制)等。所以,水印检测器接收到的信号表述为

$$s = y + n \quad (10)$$

以式(9)作为检测器,对于传统的盲加性水印系统,相关检测将直接在 s 上进行。但由于载体像素统计特性并不能用简单的高斯分布来建模,而且大量载体信号能量输入归一化相关检测器,大大降低了水印信号的信噪比。因此,载体信号在水印检测时相当于干扰源的角色,导致传统盲加性水印系统的相关检测值偏低。为了抑制载体信号的干扰,必须在检测之前进行预处理,目的是滤除载体信号能量以及使残余的载体信号更趋近于高斯分布。这种预处理的过程可以简单描述为 $r = f(s)$,对预处理的结果 r 进行归一化检测,将大大提高归一化检测器的性能。文献[9]首先提出

采用白化滤波器来提高图像水印的检测性能。这种方法首先对自然图像建立统计模型,然后采用一阶二维滤波器来提高图像水印的检测性能。本文采用 1.1 节介绍的预测滤波器对遭受攻击后的水印作品 s 进行预处理

$$r = f(s) = \mathbf{a}_x^T s(i, j) \quad (11)$$

式中: \mathbf{a}_x^T 是用式(3)求得的预测误差滤波器的一维系数。

实际上,用上式求得的预测残差 r 即为水印作品中水印信号的估计值。实验证明,这种预处理的检测效果优于白化滤波处理。

3 仿真实验

本文实验选用标准测试图像库中的 10 幅图像作为载体,包括:“Airplane”、“Boat”、“House”、“Peppers”、“Splash”、“Baboon”、“Couple”、“Lena”、“Elaine”、“Lake”。取水印作品的峰值信噪比 $T_{PSNR} = 40$ dB,由式(8)求出嵌入强度 α 的值。下面给出 2 个实验来展示本文算法的性能:一个是嵌入 1-bit 的水印系统;另一个是嵌入多比特的水印系统。在第一个实验中,嵌入公式(6)中的水印 $w(i, j)$ 是一个伪随机序列模板,在水印作品遭受表 2 中的各种攻击后,检测器做出有无水印的判断。在这个实验里,产生 1 个相同的水印模板分别嵌入 10 幅测试图像中,分别采用传统扩频盲检测算法、文献[9]给出的白化滤波器预处理的盲检测算法及本文所提盲检测算法进行水印的检测。在遭受各种攻击后的归一化相关检测值如表 2 所示,表中的值是 10 幅作品检测值的平均值。从表 2 可看到,经过预测误差滤波器预处理后的盲检测值相对于白化滤波器处理和传统盲检测值有较大提升,尤其在压缩和滤波攻击下提高几十倍,在几何攻击下也提高十倍左右。

在第二个实验中,将经纠错编码及随机交织后的 50 比特水印采用式(7)进行 CDMA 扩频编码,然后用式(6)分别嵌入 10 幅测试图像中,检测阈值设为 0。表 2 给出经各种攻击后的提取结果,错误比特率(BER)定义为解出的错误位数与全部嵌入数据位数之比,然后计算 10 幅图像的平均值。实验结果表明,相关检测前对水印作品作预测误差预处理可以大大降低水印提取的错误比特率,并且与白化滤波预处理相比,对几何攻击具有更好的鲁棒性。

表2 鲁棒性实验结果
Table 2 Experimental results of robustness

代码	攻击	归一化相关检测值			错误比特率 BER		
		传统滤波	白化滤波	预测滤波	传统滤波	白化滤波	预测滤波
1	没有攻击	0.0168	0.1696	0.3405	0.28	0	0
2	JPEG 压缩(QF=60)	0.0119	0.0795	0.2360	0.14	0	0
3	小波压缩	0.0063	0.0128	0.0962	0.12	0	0
4	高斯噪声(方差=0.01)	0.0162	0.0829	0.1407	0.04	0	0
5	椒盐噪声(0.05)	0.0141	0.0214	0.0240	0.48	0.52	0.23
6	维纳滤波(3×3)	0.0046	0.0478	0.2998	0.46	0.01	0
7	中值滤波(3×3)	0.0030	0.0245	0.1016	0.50	0.11	0
8	旋转(0.3°)	0.0029	0.0069	0.0309	0.48	0.12	0.04
9	缩放(先缩小50%,再放大2倍)	0.0037	0.0098	0.0164	0.46	0.06	0
10	旋转-尺寸缩放	0.0023	0.0102	0.0227	0.30	0.88	0.12
11	行/列删除(20,58)	0.0035	0.0118	0.0322	0.28	0.59	0.11

4 结束语

本文将预测误差滤波器引入空域加性盲水印的嵌入与检测过程。在嵌入端的作用是:在相同的视觉质量下大大地提高了水印的嵌入强度,或者说在相同的嵌入强度下提高了视觉质量;在检测端的作用是:滤除载体信号能量以及使残余的载体信号更趋近于高斯分布,结果在相同的嵌入强度下大大提高了归一化相关检测值,即降低了水印提取的错误比特率。结合CDMA扩频调制方法,有效地提高了空域水印的综合性能。实验表明,该水印算法对大部分信号处理攻击以及中等程度以下的几何攻击具有很好的鲁棒性。这使得空域算法在证件及票据防伪方面有着广泛的应用前景,也可作为脆弱水印或半脆弱水印用于内容认证或篡改提示。

参考文献:

- [1] 郑海红,曾平,王义峰.基于极性调制的鲁棒水印算法[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(3):681-685.
Zheng Hai-hong, Zeng Pin, Wang Yi-feng. Robust watermarking algorithm based on polarity modulation[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2007, 37(3): 681-685.
- [2] Voloshynovskiy S, Herrigel A, Baumgaertner N, et al. A stochastic approach to content adaptive digital image watermarking[C]//The 3rd Int Workshop In-
- formation Hiding, Dresden, Germany, 1999: 211-236.
- [3] Delaigle J F, Vleeschouwer C D, Macq B. Watermarking algorithm based on a human visual model [J]. Signal Process, 1998, 66(5): 319-335.
- [4] Kutter M, Winkler S. A vision based masking model for spread spectrum image watermarking [J]. IEEE Trans on Image Process, 2002, 11(1): 16-25.
- [5] Langelaar G C, Setyawan I, Lagendijk R L. Watermarking digital image and video data, a state-of-the-art overview[J]. IEEE Signal Process Mag, 2000, 17(9):20-46.
- [6] Karybaliand Kostas Berberidis Irene G. Efficient spatial image watermarking via new perceptual masking and blind detection schemes [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2006, 7(1):256-269.
- [7] 谷利民. 稳健数字水印中的通信方法[D]. 中山:中山大学,2004:69.
Gu Li-min. Communication method in robust watermarking [D]. Zhongshan: Zhongshan University, 2004:69.
- [8] Cox Ingemar J, Miller Matthew L, Bloom Jeffrey A. 电子水印[M]. 王颖等译. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [9] Depovere G, Kalker T, Linnartz J P. Improved watermark detection reliability using filtering before correlation[C] // Proceeding of the International Conference on Image Processing, 1998: 430-434.