

基于加性非高斯噪声信道模型的 DCT 域

数字水印技术研究

DCT - domain watermarking technique based on the additive
non - gaussian noise channel model

孙中伟 (中国科学院软件所信息安全国家重点实验室 北京 100080)

许刚 (华北电力大学信息工程系 北京 102206)

摘要:本文提出了基于加性非高斯噪声信道模型的 DCT 域数字图像水印算法。该算法将水印信号嵌入在图像的 DCT 中频变换系数上,并采用广义高斯分布建立 DCT 交流变换系数的统计模型。在数字水印不可感知特性的基础上,应用统计信号检测理论,推导出相应的水印检测算法。实验结果验证了新方法的有效性。

关键词:数字水印 版权保护 广义高斯分布 统计推断

1 引言

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^[1]。水印技术则是利用人的视觉/听觉的掩蔽特性和数字媒体中的信息冗余,在不影响数字媒体商用价值的条件下实现水印信息的嵌入,嵌入的数据中可以包含作者、版权所有、使用者等信息。数字水印技术的目的不是制止非法复制,而是在出现盗版或版权纠纷时鉴别哪些是合法产品,哪些是非法复制品。

为了使数字水印能起到版权保护的作用,对数字水印技术有三个基本要求^[2]:

(1) 不可感知性,即水印的嵌入并不影响多媒体产品的使用价值;

(2) 稳健性,即经过信号处理或恶意攻击,水印信息也不能被删除或者破坏;

(3) 能够隐藏一定的数据量。这三者之间相互制约,实际应用时可以根居需要进行协调,使性能满足要求。

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,然后通过改变某些变换系数来加入水印。由于变换域方法在保证水印的不可见性和鲁棒性、与各种压缩算法的兼容性等方面所具有的优点,目前已成为数字水印研究的主流^[3]。本文提出一种 DCT 域加嵌入数字图像水印技术,该技术将水印信号嵌入在的 DCT 中频变换系数上,并对 DCT 中频变换系数采用广义高斯分布进行统计建模,在统计信号检测理论的基础之上,推导出相应的水印检测算法。

2 水印嵌入

嵌入的水印可分为一比特水印和多比特水印两类。一比特水印只对水印的存在与否作出回答,而多比特水印是对信源进行编码得到的一个比特串。一比特水印和多比特水印都可以通过对伪随机序列扩频调制来实现。从水印检测的角度来说,它们本质上是相同的,只不过多比特水印技术在检测到水印之后多了一个解码的步骤。这里使用一比特水印作为版权标

示。研究表明,DCT 域水印嵌入在中频带在鲁棒性和不可见性方面都能获得较好的结果,因此,我们将水印信息嵌入在中频 DCT 变换系数上,具体的过程如下:

第一步:生成一个服从标准正态分布的高斯随机序列 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$ 作为水印信号;

第二步:对原始图像进行 8×8 分块,并对分块进行 DCT 变换。并由密钥控制选择需要嵌入水印信号的 8×8 DCT 变换块;

第三步:对 8×8 DCT 变换块的系数按“之”字排序,抽取排序后的第 7 至第 16 个系数作为水印的嵌入载体;

第四步:对抽取的水印载体序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$,按如下的规则完成水印的嵌入

$$y_i = x_i + \alpha w_i \quad (1)$$

其中 x_i 为待修改的 DCT 变换系数, $i = 1, 2, \dots, N$, α 为水印嵌入的强度因子;

第五步: DCT 反变换,获得包含水印的图像。

3 统计水印检测模型

数字水印技术可理解为通过掩护数据来传输水印,这和通信的过程相似。因为检测盲图像水印时没有原始图像作为参考,因此原始图像被看成是一种噪声。从统计学的观点看,可以把从噪声中提取有用信号的过程看作是一个统计推断过程,由水印的嵌入过程可知,水印检测可表示为如下的多样本二元假设检验:

$$H_0: Y = X \quad (2)$$

$$H_1: Y = X + \alpha W$$

原假设 H_0 对应待检测图像未嵌入水印 W ,备择假设 H_1 对应待检测图像嵌入了水印 W , $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 是接收到的观测信号序列。若在 H_0 假设下, Y 的概率密度函数表示为 $P_Y(Y; H_0)$,而在 H_1 假设下, Y 的概率密度函数表示为 $P_Y(Y; \alpha, H_1)$,那么两种假设条件下的对数似然比为:

$$l(Y) = \ln \frac{p_Y(Y; \alpha, H_1)}{p_Y(Y; H_0)} = \ln p_Y(Y; \alpha, H_1) - \ln p_Y(Y; H_0) \quad (3)$$

由于水印的不可感知性的约束,嵌入强度 α 一般很小,将 $\ln p_Y(Y; \alpha, H_1)$ 在 $\alpha = 0$ 处进行一阶泰勒级数

展开,则对数似然比为

$$l(y) = \left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \cdot a \quad (4)$$

根据似然比检验的定义,需要将这一比值与给定的阈值相比较而作出判决。上式中的嵌入强度因子 a 未知,且其取值可正可负,这是一种双边假设检验。当 $\alpha > 0$ 时,如果 $\left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} > \frac{\lambda_0}{a}$,检验结果判决

假设 H_1 为真;当 $\alpha < 0$ 时,如果 $\left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} > \frac{\lambda_0}{\alpha}$,检验结果则判决假设 H_0 为真。判决规则到底选

用哪一种形式取决于未知参数 α 。为此,对于检验统计量 $T(Y) = \left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0}$,定义如下的判决规则:

$$\left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \begin{cases} > \lambda \\ < -\lambda \end{cases} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (5)$$

其中 λ 为判决阈值。

4 鲁棒的水印检测方法

DCT 变换系数的统计分布是基于统计推断方法的水印检测器设计的基础。目前绝大多数水印算法采用线性相关的方法检测水印。由信号检测的基本理论可知,线性相关检测器是在水印的加性高斯白噪声信道模型条件下推导出来的。因此,线性相关检测器只有在加性白高斯噪声信道模型下才是优化的^[4],图像压缩与编码的研究结果表明,在数字图像的 DCT 域,交流 DCT 变换系数服从广义高斯分布,率密度函数具有如下的形式^[5,6]:

$$p_x(x) = A e^{-|x|^\beta} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \beta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\Gamma(3/c)}{\Gamma(1/c)} \right)^{1/2}, A = \frac{\beta c}{2\Gamma(1/c)}, \sigma \text{ 为系数的}$$

标准差, c 为形状参数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。从上式可以看出,它的概率密度函数完全由 σ 与 c 确定。为了获得一幅具体图像 DCT 交流系数的概率密度函数,我们采用 Buccigrossi^[7]等人提出的最小化相对熵的估计方法对参数 σ 和 c 进行估计。对标准图像库中的灰度图像 Camera man 和 Fishing boat 进行 8×8 像素的

DCT 变换, 并采用最小化相对熵方法对 DCT 交流系数进行广义高斯概率密度函数估计, 得到的结果如图 1 所示。

既然图像 DCT 变换之后其交流分量服从广义高斯分布, 那么由前面的分析可知, 在 H_0 假设下, y_i 的概率密度为

$$p_{y_i}(y_i; H_0) = p_x(y_i) = Ae^{-|\beta y_i|} \quad (7)$$

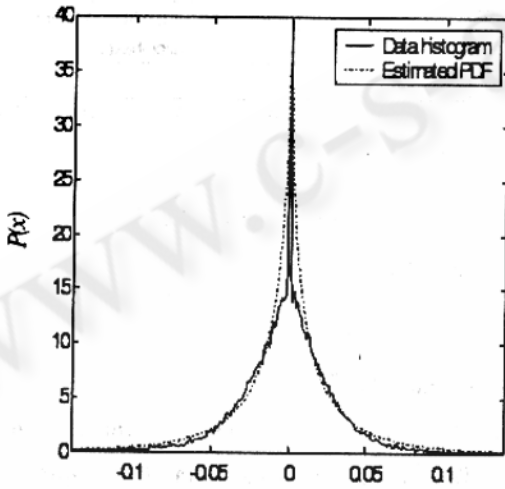
而在 H_1 假设下, 由于嵌入的水印是一种弱信号, 可假定它不会改变水印载体的统计分布特性, 所以

$$p_{y_i}(y_i; a, H_1) = p_x(y_i - aw_i) = Ae^{-|\beta(y_i - aw_i)|} \quad (8)$$

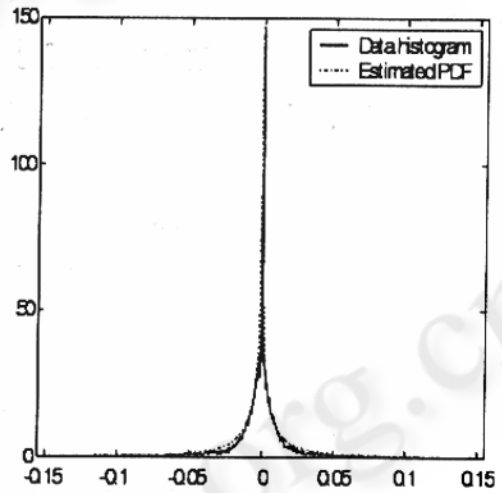
5 实验结果

实验用的载体图像为 512x512 的 Fishing boat 图像, 对于 1 比特水印信息, 采用扩频调制技术随机生成 5000 个数字水印, 分别以不同的强度将水印嵌入到原始图像中。使用接收机工作特性 (Receiver Operation Characteristic, ROC) 作为检测器性能的衡量标准, 它是判决阈值作为参变量, 检测概率随虚警概率变化的函数关系。

为了考察水印检测算法的实际检测性能, 我们依次选择不同的判决阈值进行水印检测的蒙特卡罗仿真



(a) $c_i = 0.5620, \sigma_i = 0.0663$



(b) $c_i = 0.3453, \sigma_i = 0.052$

图 1 Fishing boat 和 Camera man 的 DCT 交流系数拟合结果

由于 DCT 变换为最优变换, 故可认为 DCT 变换系数统计独立^[8], 那么维样本矢量的概率密度函数是单样本概率密度的乘积, 于是在 H_0 和 H_1 两种假设下的联合概率密度分别为:

$$P_Y(Y; H_0) = \prod_{i=1}^N Ae^{-|\beta y_i|} \quad (9)$$

$$P_Y(Y; a, H_1) = \prod_{i=1}^N Ae^{-|\beta(y_i - aw_i)|} \quad (10)$$

由此可知,

$$T(Y) = \left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; a, H_1)}{\partial a} \right|_{a=0} = \sum_{i=1}^N -\frac{\partial \ln p_x(y_i)}{\partial y_i} w_i = \sum_{i=1}^N c |\beta|^c |y_i|^{c-1} \text{sgn}(y_i) w_i \quad (11)$$

因此, 对于给定的阈值 λ , 检验函数为:

$$\Phi(Y) = \begin{cases} 1 & \text{if } |T(x)| > \lambda \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

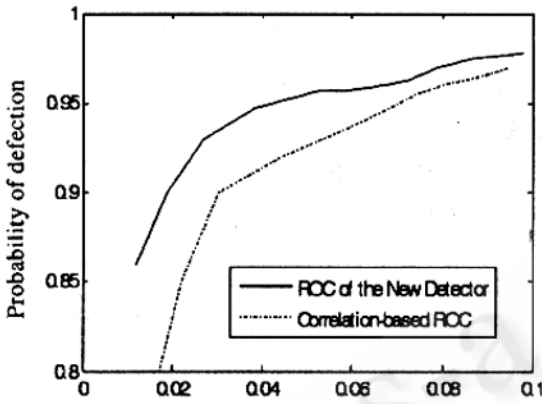
实验。每次实验, 分别将生成的 5000 个水印中的一个水印嵌入到原始图像中, 对这个已知的水印, 在不知道水印嵌入强度的情况下, 利用式 (11) 计算检验统计量, 如果的绝对值大于判决阈值, 则检测到水印; 同样, 原始图像并不嵌入 5000 个水印中的任何一个, 利用式 (12) 分别进行水印存在与否的检测, 如果统计量 $T(Y)$ 的绝对值大于阈值, 则发生一次虚警, 以这种方式, 我们得到实际的 ROC 曲线。作为检测性能的比较, 我们分别使用线性相关水印检测器以及局部优化水印检测器进行水印检测的蒙特卡罗仿真实验, 得到线性相关水印检测器和局部优化水印检测器的 ROC 曲线。实验结果如图 2 所示。可以看出, 本文提出的水印检测器比线性相关检测器获得的更好的检测

结果。

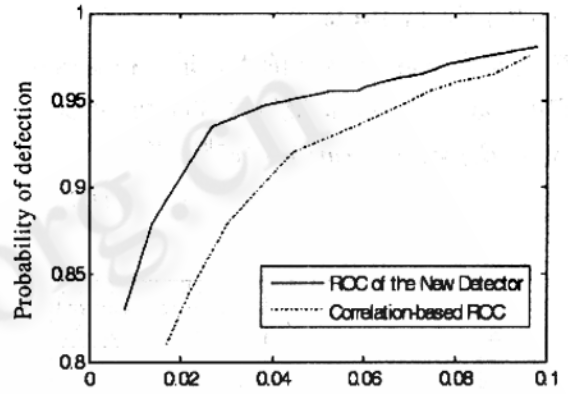
6 结论

为了改善数字水印基于线性相关检测方法的检测性能,本文对 DCT 变换域数字水印技术进行了研究。

首先采用广义高斯分布来建立 DCT 系数的统计分布模型,然后在数字水印的不可感知特性基础上,应用统计信号检测理论,提出了一种鲁棒的加嵌入水印算法。实验结果验证了新方法的有效性。



(c) $\theta = 0.08$



(d) $\theta = -0.08$

图 2 水印检测器的性能比较

参考文献

- 1 Cox I. J., Miller L., Bloom A., Digital watermarking, Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- 2 Petitcolas F., Anderson R. J., Kuhn M. G. Information hiding - a survey. Proc. Of IEEE, 1999, 87 (7): 1063 - 1077.
- 3 Huang Jiwu, Shi Yunq, Shi Yi, embedding image watermarks in DC components, IEEE Tans. On CSVT, 2000, 10(6): 974 - 979.
- 4 H. V. Poor, An introduction to signal and estimation, New York: Springer - Verlag, 1994.
- 5 R. J. Clarke, Transform coding of images, New York:

Academic, 1985.

- 6 K. A. Birney, T. R. Fisher, On the modeling of DCT and subband image data for compression, IEEE Trans. Image Processing, vol 4, 186 - 193, 1995.
- 7 Buccigrossi R. W., Simoncelli P., Image compression via joint statistical characterization in the wavelet domain. IEEE Trans Image Processing, 1999, 8 (12): 1688 - 1701.
- 8 J. R. Hernández, M. Amado, and Fernando Pérez - González. DCT - domain watermarking techniques for still images: Detector performance analysis and a new structure. IEEE Trans. on Image Processing, 2000, 9(1): 55 - 68.