

DCT 变换域乘嵌入图像水印的检测算法*

孙中伟⁺, 冯登国

(信息安全国家重点实验室(中国科学院 软件研究所),北京 100080)

A Multiplicative Watermark Detection Algorithm for Digital Images in the DCT Domains

SUN Zhong-Wei⁺, FENG Deng-Guo

(State Key Laboratory of Information Security (Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences), Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62555958, E-mail: sunzwcn@yahoo.com.cn

Received 2004-05-25; Accepted 2005-06-10

Sun ZW, Feng DG. A multiplicative watermark detection algorithm for digital images in the DCT domains. *Journal of Software*, 2005,16(10):1798–1804. DOI: 10.1360/jos161798

Abstract: Watermark detection plays a crucial role in digital watermarking. It has traditionally been tackled using correlation-based techniques. However, correlation-based detection is not the optimum choice either when the host media doesn't follow a Gaussian distribution or when the watermark is not embedded in the host media in an additive way. This paper addresses the problem of DCT (discrete cosine transform) domain multiplicative watermark detection for digital images. First, generalized Gaussian distributions are applied to statistically model the AC (alternative current) DCT coefficients of the original image. Then, the imperceptibility constraint of watermarking is exploited, and watermark detection is formulated as the problem of weak signal detection in non-Gaussian noise. A binary hypothesis test concerning whether or not an image is watermarked is established, and an optimum detection structure for blind watermark detection is derived. Experimental results indicate the superiority of the new detector in the case that the embedding strengths are unknown to the detector. Therefore, the proposed detector can be used for the copyright protection of the digital multimedia data.

Key words: digital watermarking; discrete cosine transform; generalized Gaussian distribution; multiplicative embedding; weak signal detection

摘要: 目前大多数水印算法采用线性相关的方法检测水印,但是,当原始媒体信号不服从高斯分布,或者水印不是以加嵌入方式嵌入到待保护的媒体对象中时,该方法存在一定的问题。数字水印的不可感知性约束决定了水印检测是一个弱信号检测问题,利用这一特性,首先从图像 DCT(discrete cosine transform)交流变换系数的统计特性出发,应用广义高斯分布来建立其统计分布模型,然后将水印检测问题转化为二元假设检验问题,以非高斯噪声中弱信号检测的基本理论作为乘嵌入水印的理论检测模型,推导出优化的乘嵌入水印检测算法,并对检

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60273027 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.G1999035802 (国家重点基础研究发展规划(973))

作者简介: 孙中伟(1969 -),男,湖南益阳人,博士,主要研究领域为多媒体信号处理,多媒体信息安全;冯登国(1965 -),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为网络与信息安全。

测算法进行了实验.结果表明,对于未知嵌入强度的乘水印的盲检测,提出的水印检测器具有良好的检测性能.因此,该检测器能在数字媒体数据的版权保护方面得到了实际的应用.

关键词: 数字水印;离散余弦变换;广义高斯分布;乘嵌入;弱信号检测

中图法分类号: TP309 文献标识码: A

随着多媒体技术和计算机网络技术的飞速发展,数字媒体的版权保护问题也变得越来越突出.作为数字版权保护的一种新途径,数字水印技术近年来引起了人们的高度重视,并成为目前的一个研究热点.

数字水印技术可理解为通信的一种形式,其中原始媒体数据被看成是一种噪声,水印是要传输的信号^[1].基于加性白高斯噪声信道(AWGN)模型的假设,目前很多学者采用线性相关的方法来检测水印^[2].然而,采用线性相关的水印检测方法存在以下几个问题:第一,现有的水印算法基本上可以分为时/空间域方法和变换域方法两大类,但是,无论是时/空域还是变换域,以高斯分布来对载体图像进行统计建模都是不合适的^[3-6].第二,水印信号既可以通过加嵌入也可以通过非加嵌入策略嵌入到原始媒体数据之中.由信号检测的基本理论可知,采用线性相关方法设计出来的水印检测器对于上面的任意一种情况来说都不是优化的^[7].

针对原始图像的高斯分布假定的不合理性,Hernandez 等人^[8]提出了基于广义高斯分布(GGD)模型的DCT(discrete cosine transform)变换域加嵌入水印的检测方法;Barni 等人^[9]在 DFT 变换域提出了原始图像服从威布尔分布的乘嵌入水印的检测方法.然而上述方法都假定检测水印时检测器知道水印的嵌入强度,这种假设对于盲水印的检测是不现实的.Cheng 与 Huang^[10]提出了基于局部优化检验(LOD)的水印检测器设计方法.局部优化检验本质上是一种单边假设检验,他们提出的方法隐含假定了水印的嵌入强度因子只能取正值.事实上,水印的嵌入强度因子可正可负,而盲水印检测时检测器事先并不知道嵌入强度因子是正还是负,因此,他们的方法也不适合真正意义下的盲水印检测.

由于水印的乘嵌入方式能充分利用人的感知掩蔽特性,且是内容自适用的,能够更好地满足水印不可感知特性.因此,水印的乘嵌入模式具有良好的应用前景.但是,目前关于乘嵌入水印的研究还较少.不可感知性是数字水印的一个基本特征,这就决定了水印信号的检测是一个弱信号的检测问题.本文针对离散余弦变换(DCT)域上的盲图像水印技术开展研究,应用统计推断理论和弱信号检测的基本原理,提出一种乘嵌入水印的鲁棒检测算法.

本文第 1 节给出乘嵌入水印的检测算法.第 2 节介绍 DCT 域数字水印检测器的实现.第 3 节给出检测器检测性能的 Monte Carlo 实验结果.最后是结论.

1 乘嵌入水印检测算法

根据文献[8]的研究结果,我们将水印信息嵌入在中频 DCT 变换系数上,以获得水印在鲁棒性和不可感知性两方面较好的结果.水印以乘嵌入方式嵌入到原始媒体数据的 DCT 变换系数之中,即待修改的原始系数其修改量与系数本身的大小成正比.嵌入规则如下:

$$y_i = (1 + \alpha w_i) x_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

其中 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 为选取的原始 DCT 系数序列, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 是嵌入水印后的 DCT 系数序列, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$ 为嵌入的水印信号,它与 X 相互独立, w_i 为 $[1, -1]$ 区间上均匀分布且彼此独立的零均值元素, α 为水印嵌入的强度因子.DCT 反变换,即可获得包含水印的图像.

从统计学的观点看,水印检测问题本质上是二元假设检验的问题,原假设 H_0 对应待检测图像未嵌入水印 W ,选择假设 H_1 对应待检测图像嵌入了水印 W .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:

$$\begin{cases} H_0 : y_i = x_i, & i = 1, \dots, N \\ H_1 : y_i = x_i(1 + \alpha w_i), & i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

因为水印盲检测时没有原始图像作为参考,因此,在上述二元假设检验问题中,原始 DCT 系数 X 被看成是一种噪声,嵌入的水印 W 是要检测的信号.我们希望能够根据 DCT 系数的统计属性和水印信息,利用统计推断

方法,判断水印是否存在于接收到的信号 Y 之中.

假设 DCT 系数的概率密度函数表示为 $p_x(x_i)$,那么在 H_0 假设下, y_i 的概率密度函数为

$$p_{y_i}(y_i; H_0) = p_x(y_i) \quad (3)$$

在 H_1 假设下,由于水印是一种弱信号,它不会改变原始系数的属性,因此, $|cm_i| < 1$,由水印的乘嵌入规则可知, y_i 的概率密度函数为^[11]

$$p_{y_i}(y_i; \alpha, H_0) = \frac{1}{|1 + cm_i|} p_x\left(\frac{y_i}{1 + cm_i}\right) = \frac{1}{1 + cm_i} p_x\left(\frac{y_i}{1 + cm_i}\right) \quad (4)$$

图像压缩与编码领域的研究成果表明,图像 DCT 变换之后其交流系数服从广义高斯分布,概率密度函数具有如下形式^[4]:

$$p_x(x) = Ae^{-|\beta x|^c} \quad (5)$$

其中 $\beta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\Gamma(3/c)}{\Gamma(1/c)} \right)^{1/2}$, $A = \frac{\beta c}{2\Gamma(1/c)}$, σ 为系数的标准差, c 为形状参数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数. DCT 变换为准最优

变换,与文献[8]的假定相同,这里,假定 DCT 系数统计独立.那么 N 维观测样本矢量 Y 的联合概率密度函数是单样本 y_i 的概率密度的乘积,于是在 H_1 和 H_0 两种假设下的联合概率密度分别为

$$p_Y(Y; H_0) = \prod_{i=1}^N Ae^{-|\beta y_i|^c} \quad (6)$$

$$p_Y(Y; \alpha, H_1) = \prod_{i=1}^N \frac{A}{1 + cm_i} e^{-\left| \frac{\beta y_i}{1 + cm_i} \right|^c} \quad (7)$$

因此,在两种假设条件下,它们的对数似然比为

$$l(Y) = \ln \frac{p_Y(Y; \alpha, H_1)}{p_Y(Y; H_0)} = \ln p_Y(Y; \alpha, H_1) - \ln p_Y(Y; H_0) \quad (8)$$

从式(2)可以看出,对于未知的嵌入强度 α ,它在 H_0 和 H_1 两种假设条件下分别对应 $\alpha = 0$ 和 $\alpha \neq 0$. 由于受到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

$$l(y) = \left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \cdot \alpha \quad (9)$$

根据似然比检验的定义,需要将这一比值与给定的阈值 λ_0 相比较而作出判决.由于参数 α 未知,且 α 的取值可正可负,因此,式(2)确定的二元假设检验是一种双边假设检验.当 $\alpha > 0$ 时,如果 $\left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} > \frac{\lambda_0}{\alpha}$,似

然比检验判决假设 H_1 为真;当 $\alpha < 0$ 时,如果 $\left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} > \frac{\lambda_0}{\alpha}$,似然比检验则判决假设 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 ,因此,该似然比检验在 Neyman-pearson 准则或局部优化准则等判决准则之下是不可实现的.为此,我们定义如下的判决规则:

$$\left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \begin{cases} > \\ < \end{cases} \lambda \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (10)$$

由于

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

而 w 是零均值序列,即 $\sum_{i=1}^N w_i = 0$,所以,由式(10)定义的判决规则等价于

$$\begin{cases} H_1 \\ \left| \sum_{i=1}^N c |\beta y_i|^c w_i \right| > \lambda \\ < \\ H_0 \end{cases} \quad (12)$$

2 水印检测器实现

2.1 DCT交流系数的概率密度函数估计

图像 DCT 系数的广义高斯密度函数的估计是 DCT 域基于统计推断方法的水印检测器设计的基础.从式(5)可以看出,它的概率密度函数完全由 σ 与 c 确定.对于一幅具体图像,为了获得 DCT 交流系数的概率密度函数,我们采用 Buccigrossi 等人^[12]提出的最小化相对熵的估计方法对参数 σ 和 c 进行估计.首先,根据 DCT 交流系数的取值范围分成 n 个等间隔的区间,统计出系数在各个不同区间取值的频数,并进行归一化成 $h_k (k=1,2,\dots,n)$,得到系数的频率直方图.然后将形状参数和标准差分别为 c_i 和 σ_i 的广义概率密度函数离散化,计算与频率直方图相对应的区间 c_n 上概率密度函数的积分 $F_x(c_n)$,广义高斯分布的离散模型与系数直方图之间相对熵为

$$\Delta H(\sigma_i, c_i) = -\sum_{k=1}^n h_k \log \frac{F_x(c_n)}{h_k} \quad (13)$$

$\Delta H(\sigma_i, c_i)$ 越小,以 c_i 和 σ_i 为参数的广义高斯概率密度函数与系数的实际概率密度函数越接近.因此,选择使 $\Delta H(\sigma_i, c_i)$ 最小的广义高斯概率密度函数作为 DCT 交流系数的概率密度函数.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.

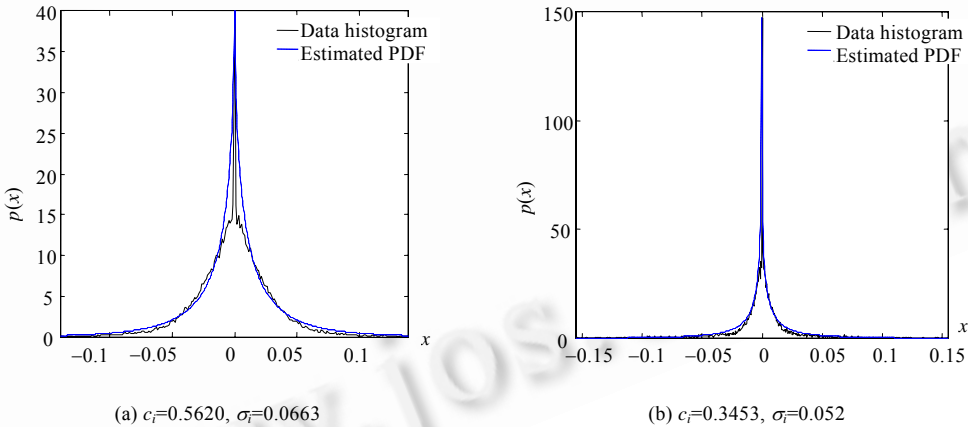


Fig.1 Histograms of the AC DCT coefficients and the fitted pdfs using GGDs for Fishing boat and Camera man

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

水印的不可感知特性决定了嵌入的水印是一种弱信号,它对原始图像的统计分布特性改变很少.因此,尽管水印的盲检测没有原始图像作参考,在 H_1 假设下,对原始图像 σ 与 c 的估计值能够很好地用待检测图像的估计值近似替代.

2.2 阈值选择

在前面水印存在与否的判决准则当中,阈值 λ 的选择对检测器的性能起着决定性的作用.因此,如何选择一个合适的判决阈值是水印检测器需要解决的一个关键问题.

令 $T(Y) = \left. \frac{\partial \ln p_Y(Y; \alpha, H_1)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0}$. 在 H_0 假设下,因为 $y_i = x_i$,那么检验统计量 $T(Y) = \sum_{i=1}^N c |\beta x_i|^c w_i$,当 N 足够大时,由中心极限定理可知,统计量 $T(Y)$ 渐近服从高斯分布.因此, $T(Y)$ 的均值为

$$\mu = E(T(Y); H_0) = E\left(\sum_{i=1}^N c|\beta x_i|^c w_i\right) = c|\beta|^c \sum_{i=1}^N (E(|x_i|^c)E(w_i)) = 0 \quad (14)$$

方差为

$$\sigma^2 = \text{var}(T(Y); H_0) = \text{var}\left(\sum_{i=1}^N c|\beta y_i|^c w_i\right) = c^2 \beta^{2c} \sum_{i=1}^N (E(|x_i|^{2c})E(w_i^2)) \quad (15)$$

由于

$$E(|x_i|^{2c}) = \int_{-\infty}^{\infty} |x_i|^{2c} p(x_i) dx_i = \frac{2A\Gamma(2+1/c)}{c\beta^{2c+1}} \quad (16)$$

而 w_i 在 $[-1, 1]$ 上均匀分布, 可求得 $E(w_i^2) = 1/3$, 所以

$$\sigma^2 = \text{var}\left(\sum_{i=1}^N c|\beta y_i|^c w_i\right) = c^2 \beta^{2c} \sum_{i=1}^N (E(|y_i|^{2c})E(w_i^2)) = \frac{2cNA\Gamma(2+1/c)}{3\beta} \quad (17)$$

由此可见, 在 H_0 为真的条件下, 检验统计量 $T(Y)$ 的渐近概率并不依赖于未知嵌入强度参数 α . 对 $T(Y)$ 归一化处理, 即令 $T_{Norm}(Y) = T(Y)/\sigma$, 因此, 对于检测器所要求的虚警概率, 利用 Neyman-pearson 准则可以唯一地确定判决阈值 λ . 假设设定水印检测器发生虚警的概率为 P_{FA} , 那么它与判决阈值 λ 的关系为

$$P_{FA} = P_{T_{Norm}}(|T_{Norm}(Y)| > \lambda; H_0) = P_{T_{Norm}}(T_{Norm}(Y) > \lambda; H_0) + P_{T_{Norm}}(T_{Norm}(Y) < -\lambda; H_0) = 2Q(\lambda) \quad (18)$$

其中 $Q(Y) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$, 所以,

$$\lambda = \sigma Q^{-1}(P_{FA}/2) \quad (19)$$

式中 $Q^{-1}(x)$ 表示 $Q(x)$ 的反函数.

3 实验结果与分析

实验用的载体图像为 (512×512) 的 Fishing boat 图像, 水印信号嵌入在由密钥控制选取的 8×8 DCT 变换块上, 在每个块上的嵌入位置如图 2 所示.

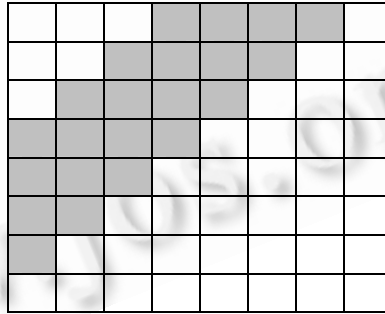


Fig.2 DCT coefficients where the watermark is embedded

图 2 8×8 DCT 系数块中的水印嵌入位置

为了考察水印检测器的检测性能, 我们进行水印检测的蒙特卡罗仿真实验, 并使用接收机工作特性 (receiver operation characteristic, 简称 ROC) 作为检测器性能的衡量标准. ROC 是检测概率 P_D 随虚警概率 P_{FA} 变化的函数关系. 随机生成 5 000 个数字水印, 每次实验, 将其中的一个水印嵌入到原始图像中, 并按式(12)计算出检验统计量 $T(Y)$ 的大小, 如果 $T(Y)$ 的绝对值大于给定的判决阈值 λ , 则检测到水印. 同样, 原始图像并不嵌入 5 000 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. 以这种方式得到检测器的 ROC 曲线.

作为检测性能的比较, 在不考虑视觉掩蔽的情况下, 我们分别设计出线性相关水印检测器以及局部优化水印检测器. 其中对于局部优化水印检测, 我们直接采用文献[10]提出的方法, 即

$$T_{LOD}(Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c |\beta_i y_i|^c w_i \tag{20}$$

而对于线性相关检测器,若直接采用文献[13]的方法,由于 $y_i = (1 + \alpha w_i)x_i$, W 和 X 彼此独立,且 X 的均值为 0,因此 $\sum_{i=1}^N x_i w_i \approx 0$,相关系数为

$$T_{Cor}(Y) = \sum_{i=1}^N y_i w_i = \sum_{i=1}^N x_i w_i + \sum_{i=1}^N \alpha x_i w_i^2 \approx 0 \tag{21}$$

由此可见,采用文献[13]提出的嵌入方法和检测方法是无法检测到乘嵌入水印的.因此,我们对相关方法作了适当的修正以适合乘嵌入水印的检测,采用 Barni 的水印嵌入法^[14],即 $y_i = x_i + \alpha w_i |x_i|$,而水印存在与否的判决规则为

$$T_{Cor}(Y) = \left| \sum_{i=1}^N y_i w_i \right| \tag{22}$$

与前面的方法一样,分别对这两种水印检测方法进行蒙特卡罗仿真实验,得到线性相关水印检测器和局部优化水印检测器的实际 ROC 曲线.实验结果如图 3 所示.

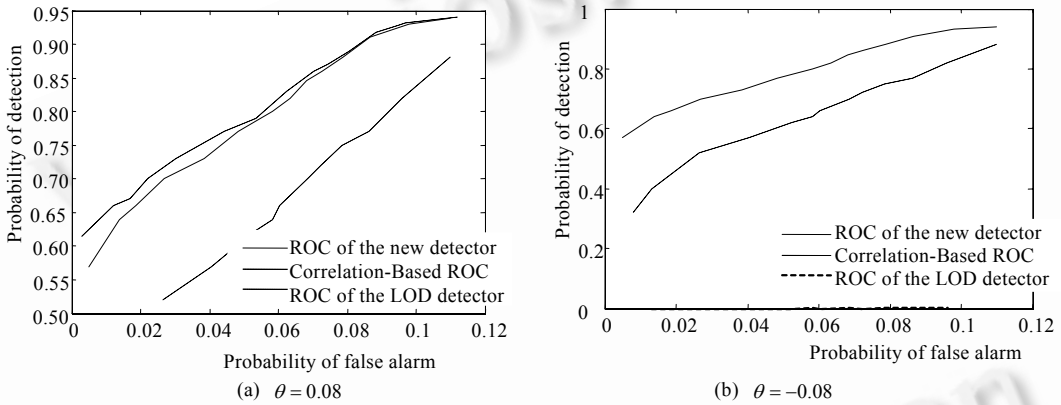


Fig.3 Performance comparisons among the correlator, the LOD detector and the proposed detector

图 3 水印检测器的检测性能比较

从实验结果可以看出,一方面,当嵌入强度因子取正值时,本文提出的水印检测器与 LOD 检测器的性能比较接近,它们都比线性相关检测器获得了更好的检测结果.因为线性相关的水印检测方法以高斯分布来对载体图像进行统计建模,没有考虑到载体图像的实际统计分布特性,而且水印不是加嵌入而是乘嵌入,其检测性能自然退化.另一方面,对于负的嵌入强度,LOD 检测器的检测概率几乎为 0,这是由局部优化检验的特点决定的,因为局部优化检验是一种单边假设检验,而水印检测问题是一种双边假设检验.由此可见,对于盲水印检测,在不知道水印嵌入强度的情况下,本文提出的水印检测器表现出很好的检测性能.

4 结 论

本文针对现有的水印检测方法存在的问题开展研究,提出了一种 DCT 变换域乘嵌入图像水印的检测方法.因为盲图像水印在检测时没有原始图像作为参考,本文将原始图像看成是一种噪声,为此,应用统计推断理论,将水印检测问题转化为二元假设检验问题.在 DCT 交流系数的广义高斯分布模型的基础上,利用弱信号检测的基本原理,提出了相应的乘嵌入水印的鲁棒检测算法,并重点探讨了 DCT 交流系数的 GGD 的估计以及水印检测器设计中判决阈值的选取两个关键问题及解决方法.实验表明,本文提出的水印检测器具备了良好的检测性能.另外,该检测器也很容易与视觉感知掩蔽模型相结合,实现基于感知特征的乘嵌入水印检测算法.

References:

- [1] Sequeira A, Kundur D. Communication and information theory in watermarking: A survey. In: Tescher AG, Vasudev B, Bove VM, eds. *Multimedia Systems and Applications IV*. SPIE Vol. 4518, 2001. 216–227.
- [2] Cox I, Miller L, Bloom A. *Digital Watermarking*. New York: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [3] Chen TPC, Chen T. A framework for optimal blind watermark detection. In: *ACM Multimedia 2001 Workshop on Multimedia and Security: New Challenges*. 2001. http://amp.ece.cmu.edu/Publication/Trista/acm2001_trista.pdf
- [4] Clarke RJ. *Transform Coding of Images*. New York: Academic, 1985.
- [5] Antonini M, Barlaud M, Mathieu P. Image coding using wavelet transform. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992,1(2):205–220.
- [6] Sun Z, Zhu Y, Feng D. The performance analysis of DCT-domain watermark detection based on local optimum detection. *Acta Electronica Sinica*, 2005,33(5):864–867 (in Chinese with English abstract).
- [7] Poor HV. *An Introduction to Signal and Estimation*. New York: Springer-Verlag, 1994.
- [8] Hernández JR, Amado M, Fernando P-G. DCT-Domain watermarking techniques for still images: Detector performance analysis and a new structure. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000,9(1):55–68.
- [9] Barni M, Bartolini F, De Rose A, Piva M. A new decoder for the optimum recovery of non-additive watermarks. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2001,10(5):755–765.
- [10] Cheng Q, Huang TS. Robust optimum detection of transform domain multiplicative watermarks. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2003,51(4):906–924.
- [11] Papoulis AS, Pillai U. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. Boston: McGraw-Hill, 2002.
- [12] Buccigrossi RW, Simoncelli P. Image compression via joint statistical characterization in the wavelet domain. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1999,8(12):1688–1701.
- [13] Cox IJ, Killian T, Leighton T, Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997,6(12):1673–1687.
- [14] Barni M, Bartolini F, De Rosa A, Piva A. Capacity of the watermarking-channel: How many bits can be hidden within a digital image? In: Wong PH, ed. *Security and Watermarking of Multimedia Contents*. SPIE Vol. 3657, 1999. 437–448.

附中文参考文献:

- [6] 孙中伟,朱岩,冯登国.DCT 域图像水印的局部优化检测性能研究. *电子学报*,2005,33(5):864–867.