

闭环图象数字水印技术

张 力 韦 岗

(华南理工大学电子与通信工程系, 广州 510641)

摘 要 为了使数字水印更鲁棒,更实用,通过对水印的嵌入过程及其性能的分析,提出了一种新的图象数字水印技术——闭环数字水印技术,并给出了小波域上的一种实现方法.该闭环水印技术的特点是利用水印的检测性能来不断地调整水印的嵌入,如果检测性能不能满足某种检测要求或者水印的嵌入已经影响了图象的质量,则可通过调整水印嵌入的强度或者通过调整水印来达到最佳嵌入.同时证明了所提出的闭环水印系统的收敛性,并对检测过程中似然函数的分布规律进行了具体分析,进而推导出两种假设检验情况下,似然函数的均值与方差,以及正确检测概率和错误报警概率的求解公式,其可作为闭环系统检测性能的判决条件.实验结果证明,该数字水印技术优于传统的水印嵌入方法.

关键词 闭环系统 数字水印 假设检验 人类视觉系统

中图分类号: TP309.7 TP393.08 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)09-0968-07

Image Closed Loop Digital Watermarking Technique

ZHANG Li, WEI Gang

(Dept. of Electronics and Communication Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract Combining the embedding process with the performance analysis, this paper presents a new image digital watermarking technique, the closed loop digital watermarking in order to make the technique more robust and utility, and gives an implementation approach in wavelet domain. The embedding process is modified continuously according to the results of the performance analysis of watermarking embedding process. If the watermarking can not meet the requirements of detection process or the embedded watermark renders visual artifact of image, the embedded intensity of watermark or watermark itself is modified so as to obtain optimal embedding effect. The convergence of the closed loop techniques is proved. In the performance analysis, the distribution of likelihood function is analyzed, and the mean and the variance of likelihood function in two hypothesis tests and their relationship are deduced. The probabilities of false alarm and detection are also given which are used as the performance measures for the closed loop system. The conclusions are approved by experimental results that this closed loop watermarking technique takes advantage of traditional methods.

Keywords Closed loop system, Digital watermark, Hypothesis test, Human visual system

0 引 言

随着互联网的普及和发展,已有越来越多的信息媒体借助网络进行传输和发布,因此如何在网络环境下实现有效的版权保护和信息安全已成为一个迫在眉睫的现实问题.数字水印技术^[1]是一种解决版权保护和信息安全的技术,它是通过将一些附加信息(即

水印信息)直接嵌入到要保护的数字信息中来实现版权保护和信息安全的,为了保证水印有效,嵌入的水印应该对通常的图象处理操作具有鲁棒性,同时水印的嵌入不应引起图象质量的下降.数字水印技术包括空间域^[2~4]和变换域的水印技术.其中,变换域的水印方法包含DFT^[5](Discrete Fourier Transform)、DCT^[6,7](Discrete Cosine Transform)、DWT^[8,9](Discrete Wavelet Transform)等.由于小波变换具

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(69896246)

收稿日期: 2001-06-18; **改回日期:** 2002-03-12

有良好的空间-频率分解特性,而且能够很好地匹配人类视觉系统(Human Visual System, HVS)的特性^[19],同时可以与 JPEG2000 标准相兼容,因此小波域的数字水印技术具有很好的应用前景.综合地说,传统的水印技术可以统一表示为图 1 的形式.

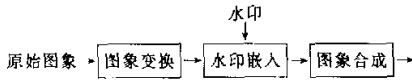


图 1 传统的水印嵌入过程

在图 1 中,图象变换有很多种方法,包括 DCT、DFT、DWT 等,对于空域的水印技术来说,图象变换过程不作任何操作,相当于恒等变换,直接进行水印的嵌入.水印可以是事先给定的,如图象、文字、随机序列或者噪声等,也可以是根据原始图象的内容产生的.从图 1 可以看出,传统的水印嵌入过程,从系统结构上看是一个开环系统,它是将经过预处理之后的水印通过某种关系嵌入到原始图象中,在嵌入过程中,需考虑到 HVS 的特性.但是由于在大多数情况下,水印可以嵌入的最大强度不仅与 HVS 有关,而且与水印以及原始图象的性质都有关系,并且在某些特殊情况下,并不一定是水印嵌入的强度越大,性能越好,而是对水印嵌入过程具有特殊的要求,因此传统的水印技术中,嵌入水印后的图象能否达到最优,能否满足某些特殊的要求都无法确定.

本文的创新之处在于:结合水印的嵌入过程和对水印嵌入过程的性能分析,提出了闭环水印技术的概念,并给出了小波域上的一种具体实现方法.本文利用对水印技术的检测性能进行定量分析的结果,对水印的嵌入过程进行相应的调整,并在保证水印的嵌入不影响图象的显示质量的前提下,调整水印嵌入的强度,从而达到水印的最佳嵌入.这种闭环水印技术尤其适用于某些具有特殊应用要求的场合中,例如在医学图象的水印嵌入过程中.水印的不可见性、鲁棒性和正确检测是数字水印技术的主要性能,由于这些性能可以通过对嵌入水印后图象的质量评价以及性能分析结果来表达,因此又对水印检测过程中,似然函数的分布规律进行了分析,不仅得到了两种假设下,似然函数的均值和方差及其相互之间的关系,并给出了正确检测概率和虚警概率的求解公式.虽然对嵌入水印后的图象进行质量评价有很多种方法,但为了可以让计算机自动完成,本文采用客观的峰值信噪比来作为评价标准.实验中,水印嵌入的初始强度是由小波域的 HVS 模型所决

定的.实验结果证明了这种闭环水印技术性能优于传统的水印技术.

1 闭环图象数字水印算法

本文提出的水印技术是一个闭环过程,其结构如图 2 所示.它是在对原始图象作图象变换之后,再进行水印嵌入,水印嵌入后,先判断水印的嵌入是否影响原始图象的显示质量,如果没有影响图象的显示质量,则根据原始图象和水印嵌入过程的相关数据进行性能分析,如果性能分析结果不能满足一定的检测要求(如规定的正确检测概率值或者错误报警概率值等),则根据分析结果对嵌入过程进行相应的调整,直到满足检测性能,并不影响图象的质量为止,再进行图象反变换,即得到嵌入水印后图象;如果水印的嵌入已经影响了图象的视觉质量,则相应减少水印嵌入的强度,从而使水印嵌入过程,在特定的要求下达到最优.尤其在某些具有特殊要求的场合中,这种水印嵌入技术更有使用价值.

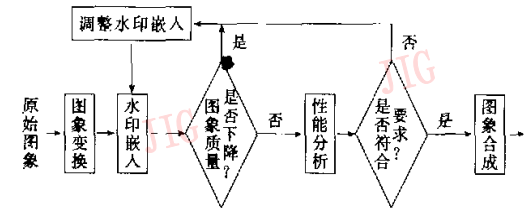


图 2 闭环水印系统

2 闭环数字水印技术的性能分析

为了实现有效的闭环控制,本文对闭环水印技术进行了性能分析.由于人感兴趣的是小波域的闭环水印技术,因此对小波域的水印技术进行分析之前,首先要建立图象小波变换系数的数学模型,然后对水印过程进行性能分析,以获得正确检测概率和错误报警概率的求解公式.

2.1 小波变换系数的数学模型

为了进行水印过程的性能分析,必须要建立图象小波变换系数的数学模型.众所周知,对于大多数图象来说,小波变换的高频带通系数可用拉普拉斯分布的数学模型^[10]、人眼对图象低频部分的噪声相对敏感,但由于大多数图象能量集中在低频段,因此嵌入到低频段的水印容易引起图象视觉质量的下降,而

又因嵌入到高频段的水印信号很可能在量化、压缩等处理中被删除,所以应该考虑具体的应用场合做出最佳嵌入.本文主要对将水印信号嵌入到带通子带的情况进行分析,而嵌入低频段的水印过程可以采用相同的方法分析.小波分解子带系数的表达式:

$$g_{s,r}(x) = \frac{e^{-|x|^r}}{2s(\Gamma(1/r)/r)} \quad (1)$$

其中, $\Gamma(r) = \int_0^{\infty} t^{r-1} e^{-t} dt$ 是以 r 为变量的 gamma 函数,参数 $\{s,r\}$ 是通过图象的小波各分解子带上的直方图计算得到的.

2.2 似然函数的分布规律

水印的提取过程应该包括两个方面:首先是水印的检测过程,即判断待检测图象中是否含有指定的水印;其次是水印的恢复过程,如果待检测图象中含有水印的话,则可提取出嵌入的水印信号.由于水印的检测过程,实际上是一个严格的假设检验过程,为了进行有效的闭环控制,这里采用假设检验的方法来对水印的检测过程进行分析.假设检验 0:假设待检测图象 Y 中不含有水印 W ,记为 H_0 ;假设检验 1:假设待检测图象 Y 中含有 W ,记为 H_1 ,即

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

$$H_1: Y = X + W \quad (3)$$

其中, X 表示原始图象,由于检测图象往往是经过各种图象处理操作之后得到的,因此 H_0 并不一定完全成立,本文对两种假设情况下似然函数的分布都作了分析.为了计算水印过程中的正确检测概率 p_D 和错误报警概率 p_F ,还需要对水印过程的似然函数进行分析.这里将似然函数 $\Delta(Y)$ 定义为

$$\Delta(Y) = g(Y, W) / g(Y) \quad (4)$$

式(1)给出了函数 g 的定义.如果 $\Delta(Y) > \eta'$,则说明待检测图象中含有指定的水印信号,即 H_1 成立, p_D 的定义为

$$p_D = \text{Prob}\{\Delta(Y) \geq \eta' | H_1\} \quad (5)$$

若 H_0 成立,则 p_F 的定义为

$$p_F = \text{Prob}\{\Delta(Y) \geq \eta' | H_0\} \quad (6)$$

其中, Prob 为求概率运算, η' 为判别门限.实践证明,通过分析似然函数 $\Delta(Y)$ 的分布规律来计算正确检测概率和错误报警概率,可以实现对水印过程的性能分析.为了更有效地计算 p_D 和 p_F ,将带通系数的似然函数改写为如下对数形式:

$$l(Y) = \ln(\Delta(Y)) = \sum_{i,j} \left(\left| \frac{y_{i,j}}{s} \right|^r - \left| \frac{y_{i,j} - w_{i,j} \rho_{i,j}}{s} \right|^r \right) \quad (7)$$

假设原始图象是确定的, c 为密钥,并且是满足 $c \in \{-1, 1\}$ 独立均匀分布的随机变量, α 用于确定水印的嵌入量.

由附录可知,在 H_0 假设下, $l(Y)$ 服从正态分布 $N(E(l_0(Y)), D(l_0(Y)))$,在 H_1 假设下, $l(Y)$ 服从正态分布 $N(E(l_1(Y)), D(l_1(Y)))$.据此,即可进行正确检测概率和虚警概率的求取.

2.3 正确检测概率和虚警概率的求取

正确检测概率 p_D 和虚警概率 p_F 计算过程如下:如果假设 H_1 成立,则式(5)定义的 p_D 可以更有效地表示为

$$p_D = \text{Prob}\{l(Y) \geq \eta | H_1\} \quad (8)$$

η 为相应的判别门限.由于 H_1 成立时, $l(Y)$ 满足正态分布 $N(E(l_1(Y)), D(l_1(Y)))$,因此可以很容易地计算 p_D

$$p_D = \int_{\eta}^{\infty} f(l_1(Y)) dl_1(Y) = \int_{\eta}^{\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi D(l_1(Y))}} \times \exp\left\{-\frac{(l_1(Y) - E(l_1(Y)))^2}{2D(l_1(Y))}\right\} \right] dl_1(Y) \quad (9)$$

定义 $z = \frac{l_1(Y) - E(l_1(Y))}{\sqrt{D(l_1(Y))}}$, 则

$$p_D = \int_{\frac{\eta - E(l_1(Y))}{\sqrt{D(l_1(Y))}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (10)$$

同理可以计算 p_F

$$p_F = \int_{\frac{\eta + E(l_1(Y))}{\sqrt{D(l_1(Y))}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (11)$$

假设 $\varphi(l_1(Y)) = \frac{2E(l_1(Y))}{\sqrt{D(l_1(Y))}}$, 其值完全由 $l_1(Y)$

的统计特性所决定.由此可以看出,对于某幅已知的图象来说,如果 p_F 一定的话,那么 $\varphi(l_1(Y))$ 的值越大, p_D 的值也就越大,其检测过程的性能越好.由于检测过程中 p_F 和 p_D 的值只与原始图象的小波变换系数 $x_{i,j}$ 、水印信号和水印信号的嵌入强度等嵌入过程因素有关,因此完全可以由嵌入过程中的参数来求得 p_F 和 p_D ,这样就可以先对水印过程进行分析,如果不合要求,就进行相应的调整,直到满足要求为止,这就是本文提出的闭环水印过程的依据.通过分析可知,对于一定的图象,要想使得 $\varphi(l_1(Y))$ 的值变大,就要增加水印嵌入的强度或者调整水印信号,以使得在不影响图象显示质量的前提下,达到水印的最优嵌入.

3 闭环水印系统的小波域嵌入过程

闭环水印系统小波域的水印嵌入过程如图 3 所示。

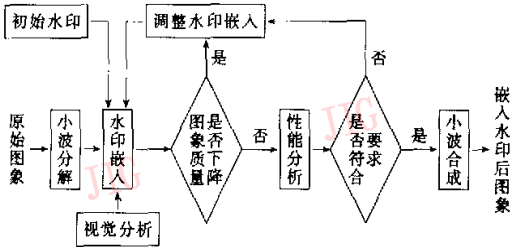


图 3 基于小波域的闭环水印系统

3.1 水印初始嵌入强度的计算

对于闭环系统来说,水印嵌入初始值的选择很重要,本文采用传统水印技术中水印的嵌入量 α 来作为闭环水印过程中,水印嵌入的初始值.传统水印嵌入量有的是采用图象压缩模型来确定的,有的是根据小波变换域的视觉模型通过计算^[11]得到的:

$$\log \alpha(\theta, f) = \log 0.495 + 0.466(\log f - \log m_{\theta} 0.401) \quad (12)$$

其中, $\theta \in \{LL, HL, LH, HH\}$ 分别为小波分解中的水平低频/垂直低频、水平高频/垂直低频、水平低频/垂直高频和水平高频/垂直高频分量,并且 $m_{LL} = 1.501; m_{HH} = 0.534; m_{HL} = m_{LH} = 1, f$ 为频率,这样,就可以利用式(12)来计算各个小波分解层次和方向上的水印嵌入的初始强度。

3.2 小波域闭环水印算法

小波域闭环水印技术嵌入过程具体步骤如下:

(1) 水印信号的产生及对水印的预处理 实验中,水印信号是事先给定的,用 W 表示.为了增加水印的鲁棒性,在嵌入水印前,往往需对水印信号进行相应的预处理操作,如扩频、伪随机排列等。

(2) 对小波变换之后的原始图象进行初始水印嵌入 嵌入的初始强度 α_0 由小波变换域的 HVS 模型决定.水印嵌入强度的初始调整步长为 q_0 ,可定义 $q_0 = \rho \alpha_0$,其中, $0 < \rho < 1$ 为一个确定值,置 $k = 1$,且 k 表示迭代循环次数。

(3) 在嵌入初始水印后,首先判断水印的嵌入是否影响了图象的视觉质量,这里观察图象的视觉质量可以采用主观评价和客观评价两种方法,由于主观评价不能由机器自动完成,因此一般采用客观评价来评价图象的质量.客观评价的方法很多,实验中是采用

峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)来对嵌入水印后的图象 $y_{i,j}^{(k)}$ 与原始图象 $x_{i,j}$ 的差别做出定量描述.峰值信噪比 $PSNR^{[12]}$ 的定义为:

$$PSNR^{(k)} = 10 \log \left(x_{\max}^2 / \left(N^{-2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{i,j} - y_{i,j}^{(k)})^2 \right) \right) \quad (13)$$

其中,图象大小为 $N \times N$,通常 $N = 256, x_{\max}$ 为原始图象中像素亮度的最大值。

假定峰值信噪比的指定值为 $PSNR^{(0)}$.如果 $PSNR^{(k)} \geq PSNR^{(0)}$,则认为嵌入的水印是不可见的,否则认为嵌入的水印是可见的,或者说,水印的嵌入已经影响了图象的视觉质量。

如果 $PSNR^{(k)} < PSNR^{(0)}$,则寻找一个整数调节次数 $n^{(k)} > 0$,使得当水印嵌入强度 $\alpha^{(k)} = \alpha^{(k-1)} - n^{(k)} q^{(k-1)}$ 时,嵌入的水印是可见的;而嵌入的强度为

$$\alpha^{(k)} = \alpha^{(k-1)} - (n^{(k)} + 1) q^{(k-1)} \quad (14)$$

时,嵌入的水印是不可见的,也就是说, $\alpha^{(k)}$ 是最大不可见水印的嵌入强度。

置 $q^{(k)} = \rho q^{(k-1)}, k = k + 1$,进行第 4 步。

如果 $PSNR^{(k)} \geq PSNR^{(0)}$,则寻找一个整数调节次数 $n^{(k)} > 0$,使得如果水印嵌入的强度为

$$\alpha^{(k)} = \alpha^{(k-1)} - n^{(k)} q^{(k-1)} \quad (15)$$

时,嵌入的水印是不可见的;而当嵌入的强度为 $\alpha^{(k-1)} + (n^{(k)} + 1) q^{(k-1)}$ 时,嵌入的水印是可见的,也就是说, $\alpha^{(k)}$ 是最大不可见水印的嵌入强度.置 $q^{(k)} = \rho q^{(k-1)}, k = k + 1$ 。

(4) 为了判断水印能否正确地提取,应计算正确检测概率 p_D 和虚警概率 p_F .假设 p_D 和 p_F 的要求值为 p_{D_0} 和 p_{F_0} ,表 1 描述了 p_D 和 p_F 与水印能否正确提取之间的关系。

表 1 概率与水印信号能否正确提取的关系表

$p_D \geq p_{D_0}$	$p_F \leq p_{F_0}$	水印信号能够正确提取
$p_D \geq p_{D_0}$	$p_F > p_{F_0}$	水印信号不能正确提取
$p_D < p_{D_0}$	$p_F > p_{F_0}$	水印信号不能正确提取
$p_D < p_{D_0}$	$p_F \leq p_{F_0}$	水印信号不能正确提取

如果水印信号不能被正确提取,则增加水印嵌入的强度,即寻找一个整数调节次数 $m^{(k-1)} > 0$,使得水印嵌入的强度为 $\alpha^{(k-1)} + m^{(k-1)} \rho q^{(k-1)}$ 时,水印不能被正确提取;而当水印嵌入的强度为

$$\alpha^{(k)} = \alpha^{(k-1)} + \rho(m^{(k-1)} + 1) q^{(k-1)} \quad (16)$$

时,水印信号可以被正确提取。

置 $q^{(k)} = \rho q^{(k-1)}, k = k + 1$,返回第 3 步。

如果嵌入的水印可以满足要求,即 $p_D \geq p_{D_0}$ 与

$p_F \leq p_{F_0}$ 同时成立, 则寻找一个整数调节次数 $m^{(k-1)} > 0$, 使得水印嵌入的强度为

$$\alpha^{(k)} = \alpha^{(k-1)} + \rho m^{(k-1)} q^{(k-1)} \quad (17)$$

时, 水印信号就可以被正确提取, 而嵌入的强度为 $\alpha^{(k-1)} - \rho(m^{(k-1)} + 1)q^{(k-1)}$ 时, 水印信号则不能被正确的提取。

(5) $\alpha^{(k)}$ 就是最终不可见水印的嵌入强度, 然后进行小波合成即得到水印后的图象。

由水印技术的运算步骤可知, 当 k 为偶数时, 可以得到

$$\alpha^{(k)} = \alpha_0 - \sum_{i=0}^{k/2} \rho^{2(i-1)} q_0 ((n^{(2i-1)} + 1) - \rho(m^{(2i-1)} + 1)) \quad (18)$$

$$\alpha^{(k+1)} - \alpha^{(k)} = \rho^k q_0 (m^{(k)} + 1) \quad (19)$$

当 k 为奇数, 则可以得到

$$\alpha^{(k)} = \alpha_0 - \sum_{i=0}^{(k-1)/2} \rho^{2(i-1)} q_0 ((n^{(2i-1)} + 1) - \rho(m^{(2i-1)} + 1)) - \rho^{k-1} q_0 (n^{(k)} + 1) \quad (20)$$

$$\alpha^{(k+1)} - \alpha^{(k)} = -\rho^k q_0 (n^{(k+1)} + 1) \quad (21)$$

由于 $0 < \rho < 1$, 因此可以得到

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\alpha^{(k+1)} - \alpha^{(k)}) = 0 \quad (22)$$

从式(22)可以得到下面的结论:

结论 图 3 表示的闭环水印技术是一个收敛的过程。

4 实验结果

为了验证本文算法的效果, 在小波域进行了闭环水印技术实验。实验中, 采用的 4 种不同原始图象如图 4 所示, 其采用的事先给定的相同水印信号如图 5 (a) 所示, 在水印嵌入之前, 先将水印信号进行伪随机排列预处理, 这里对水印信号进行伪随机排列是以 8×8 pixels 为单位进行, 预处理之后的水印信号如图 5(b) 所示; 然后采用相同的 7/9 双正交小波基进行水印嵌入实验, 对闭环水印技术初始参数的设置如下: $PSNR_0 = 30$ dB, $p_{D_0} = 0.9998$, $p_{F_0} = 0.0005$, $\rho = 0.1$ 。在传统的水印嵌入过程中, 是首先将原始图象进行小波变换, 然后将水印信号嵌入到小波变换系数中, 其嵌入的量由小波域视觉模型决定, 其得到的嵌入水印后的图象如图 6 所示。在闭环水印嵌入过程中, 水印嵌入的初始量与传统水印过程嵌入的量相同, 在实验过程中, 还根据检测性能的要求, 不断地调

整水印嵌入的量, 其嵌入水印后的图象如图 7 所示, 从嵌入水印后的图象可以看出, 二者的水印嵌入都没有引起图象视觉质量的下降。



图 4 几幅典型原始图象

华南理工
大学 电
子与通信
工程系

(a) 水印信号



(b) 预处理之后的水印

图 5 原始水印及预处理后的水印



图 6 用传统方法嵌入水印后的图象

图 6 用传统方法嵌入水印后的图象

表 2 给出了采用传统的水印嵌入技术与闭环水印嵌入技术, 嵌入水印后图象的 $PSNR$ 值、嵌入强



(a) 嵌入水印后的 Lena 图象 (b) 嵌入水印后的 Woman 图象 (c) 嵌入水印后的 Cameraman 图象 (d) 嵌入水印后的 Wbarb 图象

图 7 用闭环数字水印技术嵌入水印后的图象

度(列出了 2 个分解层次上的水印嵌入强度). 传统水印嵌入技术嵌入强度是通过 HVS 模型计算小波分解带通子带得到的, 即 $\theta \in \{LH, HL\}$, 而闭环水印嵌入技术的嵌入强度则是在此基础上, 通过对水

印嵌入过程的调整得到的. 从实验数据中可以看出, 由于闭环水印嵌入过程嵌入的水印强度明显比传统的水印嵌入过程嵌入的多, 因此闭环水印的鲁棒性比传统的水印技术的鲁棒性好.

表 2 实验得到的水印嵌入强度及 PSNR 值

数据类型	图象				
	Lena	Woman	Cameraman	Wbarb	
传统水印 PSNR(dB)	34.8298	34.5670	34.5328	32.9642	
闭环水印 PSNR(dB)	32.1445	32.0191	31.4150	30.5199	
传统水印嵌入强度	第 1 级	15.3088	16.8397	18.3706	15.2490
	第 2 级	9.1477	10.0625	10.9773	9.1120
闭环水印嵌入强度	第 1 级	21.0496	22.5805	24.1114	20.2842
	第 2 级	12.5781	13.4929	14.4077	12.1207
闭环循环次数	28	30	36	33	

5 结 论

本文提出了闭环数字水印技术的概念, 并给出了一种小波域的实现方法. 嵌入水印时, 可根据对水印过程检测性能的分析结果, 对水印的嵌入量或对水印进行相应的调整, 由于其可在保证水印不可见的前提下, 达到最优嵌入, 从而证明了这种闭环系统的收敛性. 在本文中, 还针对拉普拉斯变换描述下的带通子带系数进行水印嵌入, 并对其性能进行了相应的分析, 进而得到了两种不同的假设检验条件下, 似然函数的均值和方差及其相互间的关系, 以及假设检验 1 下, 正确检测概率和错误报警概率的求解公式, 实践证明, 其可作为闭环水印过程自动性能检测判决条件. 本文方法的水印信号嵌入初始强度, 由小波变换域的视觉系统的特性所决定, 并且可根据检测性能分析结果以及在不影响图象显示质量的要求下进行相应的调整, 尤其是在某些具有特殊要求的应用场合中, 例如在有一定要求的正确检测概率或错误检测概率的情况下, 可以进行最优水印嵌入. 实验结果证明, 闭环水印嵌入方法优于传统的水印嵌入方法.

附录 似然函数的分布规律

由中心极限定理可知, 当 i 和 j 趋向于足够大的数值时, 似然函数 $l(Y)$ 趋向于正态分布, 其分布规律完全由均值和方差确定. 下面通过计算 H_0 和 H_1 两种假设下, 似然函数 $l(Y)$ 的均值和方差来确定其分布规律.

如果 H_0 为真, 也就是说, $y_{i,j} = x_{i,j}$, 则式(7)可写为

$$l_0(Y) = \sum_{i,j} \left(\left| \frac{x_{i,j}}{s} \right|^r - \left| \frac{x_{i,j} - w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r \right) \quad (23)$$

由式(8) $l_0(Y)$ 的表达式, 可以得到 $l_0(Y)$ 的均值 $E(l_0(Y))$ 为

$$\begin{aligned} E(l_0(Y)) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(l_0(Y)) dl_0(Y) \\ &= \sum_{i,j} \left| \frac{x_{i,j}}{s} \right|^r - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \left(\left| \frac{x_{i,j} - w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r + \left| \frac{x_{i,j} + w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r \right) \end{aligned} \quad (24)$$

为了计算 $l_0(Y)$ 的方差 $D(l_0(Y))$, 可先计算

$$l_0(Y) - E(l_0(Y)) = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \left(\left| \frac{x_{i,j} - w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r + \left| \frac{x_{i,j} + w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r - 2 \left| \frac{x_{i,j}}{s} \right|^r \right)$$

$$\left| \frac{x_{i,j} + w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r - \sum_{i,j} \left| \frac{x_{i,j} - w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r \quad (25)$$

然后就可以很容易地计算出

$$\begin{aligned} D(l_0(Y)) &= E(l_0(Y) - E(l_0(Y)))^2 \\ &= \frac{1}{4} \left(\sum_{i,j} \left| \frac{x_{i,j} - w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r + \left| \frac{x_{i,j} + w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r \right)^2 \quad (26) \end{aligned}$$

同样,如果 H_1 成立, $y_{i,j} = x_{i,j} + w_{i,j}$, 则

$$l_1(Y) = \sum_{i,j} \left(\left| \frac{x_{i,j} + w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r - \left| \frac{x_{i,j}}{s} \right|^r \right) \quad (27)$$

就可以得到此时 $l_1(Y)$ 的均值 $E(l_1(Y))$ 和方差 $D(l_1(Y))$ 为

$$\begin{aligned} E(l_1(Y)) &= \frac{1}{2} \left(\sum_{i,j} \left(\left| \frac{x_{i,j} - w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r + \left| \frac{x_{i,j} + w_{i,j} \alpha_{i,j}}{s} \right|^r \right) - \sum_k \left| \frac{x_{i,j}}{s} \right|^r \right) \\ &= \sum_k \left| \frac{x_{i,j}}{s} \right|^r = -E(l_0(Y)) \quad (28) \end{aligned}$$

$$D(l_1(Y)) = D(l_0(Y)) \quad (29)$$

由上推导可知,在 H_0 假设下, $l(Y)$ 服从正态分布 $N(E(l_0(Y)), D(l_0(Y)))$; 在 H_1 假设下, $l(Y)$ 服从正态分布 $N(E(l_1(Y)), D(l_1(Y)))$.

参 考 文 献

- 1 刘瑞桢, 谭铁牛. 数字图象水印研究综述[J]. 通信学报, 2000, 21(8):39~48.
- 2 LIU R Z, TAN T N. Watermarking for digital images[A]. In: Proc. of ICIP'98[C]. 1998,2:944~947.
- 3 Delaigle J F, Vleeschouwer C D, Macq B. Watermarking algorithm based on a human visual model[J]. Signal proceeding, 1998,66:319~335.

- 4 施鹏飞, 赵立初. 数字水印技术的研究[J]. 信息与控制, 2000, 29(1):40~46.
- 5 Pereira S, Pun T. Robust template matching for affine resistant image watermarks[J]. IEEE Trans. On Image Processing 2000, 9(6):1123~1129.
- 6 Hernandez J R, Amado M, Gonzalez F P. DCT-domain watermarking techniques for still images; Detector performance analysis and a new structure [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2000,9(1):55~68.
- 7 黄继武, Shi Y Q, 姚若河. 基于块分类的自适应图象水印算法[J]. 中国图象图形学报, 1999,4(8):640~643.
- 8 牛夏牧, 陆哲明, 孙圣和. 基于多分辨率分解的数字水印技术[J]. 电子学报, 2000, 28(8):1~4.
- 9 李华, 朱光喜, 朱耀庭. 基于视觉特性和小波分解的数字水印隐藏方法[J]. 通信学报, 2000,21(6):37~41.
- 10 Buccigrossi, Aimoncelli E P. Image compression via joint statistical characterization in the wavelet domain [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1999,8(12):1688~1701.
- 11 Tsai M, Yuang K, Chen Y. Joint wavelet and spatial transformation for digital watermarking [J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2000,46(1):241~245.
- 12 Wolfgang R B, Podichuk C I, Delp E J. Perceptual watermarks for digital images and video[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7):1108~1126.



张 力 1973 年生, 华南理工大学电子与通信工程系博士研究生. 主要研究方向为数字水印技术、图象处理.

韦 岗 1963 年生, 教授, 博士导师, 国家自然科学基金委员会电子与信息学科评委. 主要研究方向为通信与信号处理、神经网络等.