

一种采用随机归一化相关系数调制的量化水印

朱新山^{1),2)} 丁 杰¹⁾

¹⁾(扬州大学信息工程学院 江苏 扬州 225009)

²⁾(数字出版技术国家重点实验室(筹) 北京 100871)

摘 要 该文提出了一种新颖的量化水印. 该方案通过调制由宿主信号变换产生的特征信号嵌入水印信息. 特征信号由源宿主信号与一个随机信号的归一化相关系数构成. 对该信号的调制方法是从水印信息对应的码本中选择一个码字, 码本设计使用了均匀量化器并考虑了多进制的情况. 加水印的宿主信号在最小化嵌入失真的意义下产生, 并使其与随机信号具有调制后的归一化相关系数. 同时, 该文给出了嵌入失真与可移除水印信息的最小通道失真的表达式, 根据它们可以在码本中搜索最优的码字以提高水印性能. 该文方案对幅值缩放攻击具有不变性, 而且抗噪能力优于著名的扩展变换抖动调制水印. 图像仿真结果表明, 该方案具有良好的不可感知性以及能抵抗广泛的攻击, 和几种典型的水印方案相比具有显著的性能优势.

关键词 数字水印; 量化水印; 归一化相关系数; 鲁棒性; 幅值缩放

中图法分类号 TP391 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2012.01959

A Novel Quantization Watermarking Scheme Using Random Normalized Correlation Modulation

ZHU Xin-Shan^{1),2)} DING Jie¹⁾

¹⁾(School of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009)

²⁾(State Key Laboratory of Digital Publishing Technology, Beijing 100871)

Abstract This paper presents a novel quantization-based watermarking method. The method embeds the watermark information by modulating a feature signal generated from the host signal. The feature signal is suggested to choose the normalized correlation between the host signal and a random signal. Information modulation is carried out on the generated feature signal by selecting a code word from the codebook associated with the embedded information. The structured codebooks are designed using uniform quantizers for M -ary modulation. The watermarked signal is produced to provide the modulated feature in the sense of minimizing the embedding distortion. Meanwhile, we derive the expressions of the embedding distortion and the minimal channel distortion to remove the hidden message. According to them, the optimal code word can be found in the codebook for the watermarking performance improvement. The proposed scheme is theoretically invariant to volumetric scaling and can resist stronger noise than the well-known spread transform dither modulation. Numerical simulations on real images show that it achieves the good imperceptibility and strong robustness against a wide range of attacks and significantly outperforms other state-of-the-art watermarking methods.

Keywords digital watermarking; quantization-based watermarking; normalized correlation; robustness; volumetric scaling

收稿日期: 2012-05-15; 最终修改稿收到日期: 2012-07-19. 本课题得到国家自然科学基金(60803122, 61103018)、江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK2011442, BK2012683)、扬州大学科技创新培育基金(2011CXJ023)、北大方正集团有限公司数字出版技术国家重点实验室开放课题、北京航空航天大学软件开发环境国家重点实验室开放课题(SKLSDE-2011KF-08)资助. 朱新山, 男, 1977年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为信号处理、信息隐藏与多媒体安全. E-mail: xszhu_hm@hotmail.com. 丁 杰, 男, 1978年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为形式化方法及其应用. E-mail: jieding@yzu.edu.cn.

1 引 言

数字水印是一个具有边带信息的通信问题^[1]. 对于这个问题, Costa 理论上得出了信道容量与编码器端的宿主信号无关^[2]. Costa 的结果向我们暗示可以设计一个水印系统, 完全抵制宿主信号和隐藏信息之间的干扰. 为了追求这一目标, 学术界提出了大量的水印方案, 它们中的大多数都包含一个量化步骤.

至今, 一类最重要的方法称为量化索引调制 (Quantization Index Modulation, QIM)^[3]. 该方案构造一组量化器, 每个量化器对应一个不同的信息, 并通过选择量化器量化宿主信号实现水印嵌入. QIM 的一个基本实现称为抖动调制 (Dither Modulation, DM)^[3], 它采用了一组标量均匀量化器. 尽管, DM 既简单又有很好的性能, 但是它的容量与理论容量的差距相对较大. 随后, 失真补偿技术被引入到 QIM 方案中^[3], 得到了带失真补偿的 QIM (也称为标量 Costa 方案^[4]). 该方案利用了 Costa 理论的准则, 从而进一步逼近了水印的理论性能. 这些基本算法都是就一个像素或一组像素的幅值进行量化. 虽然, 直接使用幅值特征可简化水印设计, 但有时候性能并不好. 为此, 许多研究着重于探索提取新的特征用于量化.

扩展变换抖动调制 (Spread-Transform Dither Modulation, STDM) 是传统 DM 的一个重要扩展^[3]. 该方案量化宿主信号在一个随机信号方向上的投影. STDM 的思想之后被应用于量化投影方案与带失真补偿的量化投影方案^[5]. 投影特征的使用显著地提升了传统 QIM 的性能^[3,5]. 在基于球面固化的 DM 方案 (Sphere-Hardening Dither Modulation SHDM)^[6] 中, 通过量化宿主信号的范数实现水印嵌入. SHDM 利用了球面固化效应, 在抵抗加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 攻击方面可获得与 STDM 相同的解码错误率. 文献[7]将对数变换引入到 QIM 中, 对数变换的使用可为嵌入水印产生非均匀的量化步长, 从而有利于提升水印的不可感知性. 此外, 考虑到量化水印对幅值缩放攻击 (Valumetric Scaling Attack, VSA) 的弱点, 一些研究致力于构造具有增益不变性的特征用于量化. 文献[8]将宿主信号与其自身均值的比作为一个新的信号进行量化. 该方案获得了对 VSA 的鲁棒性, 但是, 它在零失真时得出了非零

的解码错误率, 降低了水印性能. Rational Dithered Modulation (RDM)^[9] 使用了与前者类似的思想构造特征信号, 只是其中作为除数的量是加水印信号的某个函数. RDM 不仅在性能上渐进地逼近 DM, 而且拥有对 VSA 的不变性. 由于相位信息不受幅值缩放的影响, 因此, 采用相位调制可以提升水印性能. 在基于角度的 QIM (Angel QIM, AQIM)^[10] 中, 水印嵌入通过量化宿主信号在高维空间中构造的角度. AQIM 对幅值缩放具有内在的不变性, 但是, 由于缺少性能比较, AQIM 在其它方面的性能不甚明了. AQIM 的思想也被用于改善 STDM 的性能^[11]. 文献[12]提出利用宿主信号的 4 个样本确定一条直线, 并通过量化该直线的倾斜角嵌入水印. 文献[13]针对图像小波域内的梯度方向进行量化调制. 后两种水印都是面向实际图像设计的, 获得了良好的鲁棒性.

本文将提出一种新的量化水印方案, 称为基于归一化相关系数的量化水印 (Normalized Correlation based Quantization Watermarking, NCQW). 该方案通过量化宿主信号与一个随机信号的归一化相关系数嵌入水印. NCQW 的突出特征是它对 VSA 具有理论的不变性, 同时, 也提升了水印对其它一些攻击的鲁棒性.

本文第 2 节给出一个水印问题模型和相关的定义; 第 3 节详细描述 NCQW, 包括特征信号的选择、水印信息调制和提取; 第 4 节致力于嵌入函数的设计; 第 5 节推导嵌入失真的表达式; 第 6 节针对 VSA 和加性噪声攻击探讨 NCQW 的鲁棒性; 第 7 节对 NCQW 的性能进行测试和评估; 第 8 节总结全文.

2 基于特征的水印模型

本研究采用图 1 所示的水印模型. 向量 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^l$ 表示宿主信号, 用于嵌入水印信息 m . 宿主信号可以是像素值构成的向量, 也可以是离散余弦变换系数或者其它变换域系数构成的向量. 首先, 对 \mathbf{x} 实施某种变换获得一个特征信号 f_x , 该特征信号的长度一般取决于要嵌入的信息量. 然后, 使用信息 m 调制特征信号 f_x , 得到新的特征信号 f_m . 接着, 在宿主信号 \mathbf{x} 中嵌入水印, 获得加水印的宿主信号 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^l$, 使得 \mathbf{y} 经过相同的特征提取操作能获得特征信号 f_m . 考虑到安全问题, 上述过程依赖于某个安全的密钥 K .

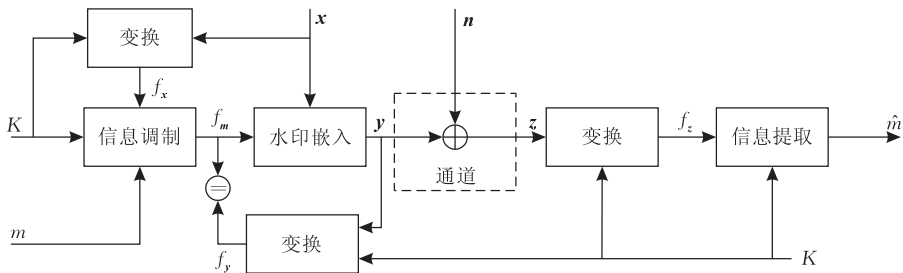


图 1 基于特征的水印模型

通常,水印信号 w 被定义为加水印的宿主信号和原始宿主信号的差,即 $w \triangleq y - x$,这样可采用 $D_e \triangleq \|w\|^2$ 测量嵌入失真,其中 $\|\cdot\|$ 表示取欧拉范数操作(也就是 ℓ_2 范数).利用该失真量,可进一步定义载体水印比(Document-to-Watermark Ratio, DWR) ζ , $\zeta \triangleq \|x\|^2 / D_e$.

在提取水印信息前,加水印的宿主信号 y 可能通过一个未知的通道,在那里遭遇各种信号处理过程(例如,低通滤波,加性噪声,甚至是一些故意移除嵌入信息的操作).不失一般性,可使用一个未知噪声源 $n \in \mathbb{R}^L$ 对通道建模.因此,失真的加水印的宿主信号 z 可以写作 $z = y + n$.与嵌入失真类似,我们将采用 $D_c \triangleq \|n\|^2$ 衡量通道失真,利用它可进一步定义水印噪声比(Watermark-to-Noise Ratio, WNR) ξ , $\xi \triangleq D_e / D_c$.

在提取水印时,失真信号 z 将首先被变换为特征信号 f_z ,该操作与水印嵌入时的变换操作相同.然后,从特征信号 f_z 中提出信息 \hat{m} .为了保证安全,水印提取过程需要使用密钥 K .一个理想的水印系统应该可以完全恢复嵌入信息,即 $\hat{m} = m$.从这个角度,可以利用位错误率(Bit Error Rate, BER) P_e 评估水印系统的性能.

上述模型引入了一个特征信号提取过程,因此,我们称其为基于特征的水印模型.从水印嵌入过程可以看出,该水印模型不是直接对宿主信号自身进行信息调制,而是对宿主信号产生的一个特征信号进行信息调制,这是它与一般水印模型的重要区别.这种区别将导致设计由原始宿主信号到加水印的宿主信号的映射变得更复杂,但是,只要采用的特征信号合适,便可获得提升的水印性能.

3 基本的 NCQW

基于给出的水印模型设计水印方案,需要考虑的主要问题包括特征信号的构造、信息调制、由原始

宿主信号到加水印的宿主信号的映射以及水印信息的提取操作.下面,将给出一种具体的水印方案 NCQW.为了便于理解和方便解释,我们考虑一种基本情况,即从原始宿主信号内提取的特征信号是一维的.因此,以下特征信号将用斜体的小写字母表示.

3.1 特征选择

许多信号特征都可用于水印设计.常见的统计特征有均值、标准差、各阶矩和直方图等.这几种特征对普通信号处理过程(例如加噪)都比较敏感,因此,使用它们隐藏信息容易导致信息损失.相对而言,投影特征(或者说扩展变换)具有更大的优势.使用投影特征隐藏信息,在某种程度上相当于引入扩频技术,可提升水印对一般信号处理操作的鲁棒性^[3,5],但是,投影特征对幅值缩放攻击很敏感^[14].宿主信号的范数也有类似的问题,尽管,使用范数嵌入水印可以获得与投影特征相同的抗噪能力^[6].文献[8]将宿主信号与其自身均值的比作为特征信号,虽然该特征对缩放攻击具有不变性,但是它的稳定性较差,对宿主信号均值的改变特别敏感.这种构造特征信号的思想后来被用于 RDM,所不同的是特征信号中作为除数的量使用的是加水印信号的某个函数^[9],结果提高了特征信号的稳定性.可惜的是, RDM 没有考虑引入扩展变换,因此,它在抗噪声攻击方面的性能也仅仅是逼近传统的 DM. AQIM 中使用了幅值缩放攻击具有不变性的角度特征^[10],但同样也没有考虑扩展变换.目前,还不存在指导特征信号设计的一般准则.但是,特征的选择一般应该考虑所使用的调制技术的特性.本文将主要关注量化水印.众所周知量化水印对 VSA 特别脆弱.为了解决该问题,需要使用一个对幅值缩放具有不变性的特征,同时,最好能引入扩展变换.

本文提出将宿主信号 x 与一个随机信号 $u \in \mathbb{R}^L$ 的归一化相关系数(Normalized Correlation, NC)作为特征信号,即

$$f_x = \frac{x^T u}{\|x\| \|u\|} \quad (1)$$

其中,信号 \mathbf{u} 可以使用随机数发生器产生,并依赖于密钥 K . 特别的,信号 \mathbf{u} 的每个元素遵从独立的标准正态分布 $\mathcal{N}(0,1)$. 显然, f_x 的取值范围为 $[-1,1]$, 当向量维数 L 足够大时, f_x 近似符合均值为零的高斯分布.

式(1)表明,特征信号 NC 对幅值缩放具有不变性. 利用该特性,可实现水印方案对 VSA 的不变性. 其次,NC 的计算过程包括一个投影操作,可使水印嵌入引入扩展变换,从而提升水印的性能^[3,5]. 最后,该特征是随机的,其安全性依赖于某个安全的密钥,有利于改善水印方案的安全^[9,15].

3.2 信息调制与提取

文献[16]给出了二进制 NCQW 的基本实现. 这里,考虑多进制(M -ary)水印的情况. 为了嵌入一个信息基元 $m \in \mathcal{M}$, $\mathcal{M} = \{0,1,\dots,M-1\}$, 我们需要为每个信息元构造码本. 首先,将 NC 的取值范围 $[-1,1]$ 分为 L_s 个大小相同的子区间,记为 $\mathcal{R}_i = [i\Delta-1, (i+1)\Delta-1)$, $i=0,1,\dots,L_s-1$, 其中, $\Delta = 2/L_s$. 显然,步长 Δ 的值越小,子区间的个数 L_s 越大. 然后,再将每个子区间按步长 Δ/M 等分为 M 个不重叠的区域,表示为 $\mathcal{R}_i = \bigcup_{j=0}^{M-1} \mathcal{R}_{ij}$, 其中, $\mathcal{R}_{ij} = [(i+j/M)\Delta-1, (i+(j+1)/M)\Delta-1)$, 每个区域对应一个信息元. 最后,给定偏移量 $d \in [0, \Delta/M)$, 在区域 \mathcal{R}_{ij} 内选择位置 $(i+j/M)\Delta+d-1$ 作为信息元 $j \in \mathcal{M}$ 的码字,形成点集 $\Delta_j = \{(i+j/M)\Delta+d-1 | 0 \leq i < L_s\}$ 作为信息元 j 的码本. 偏移量 d 可在区间 $[0, \Delta/M)$ 上随机产生,以提升码本的安全性. 这种码本的设计采用了均匀的量化步长,但是它可以推广到非均匀量化步长的情况.

信息调制的过程是从待嵌入的信息基元 m 的码本 Δ_m 中选择一个值代替 NC 特征 f_x . 一种直接的方法是在 Δ_m 中选择与 f_x 最近的点,这可以通过量化操作实现. 设 $\text{round}(\cdot)$ 表示将一个数值近似到最近的整数的函数. 量化步长为 Δ 的量化器因此可定义为 $\mathcal{Q}_m(x, \Delta) \triangleq \text{round}\left(\frac{x}{\Delta} - \frac{m}{M} - \frac{d}{\Delta}\right)\Delta + \frac{m}{M}\Delta + d$, $m \in \mathcal{M}$. 使用与信息元 m 对应的量化器量化特征 f_x 得到调制后的 NC f_m , 即

$$f_m = \mathcal{Q}_m(f_x, \Delta) \quad (2)$$

如果上式得到的 f_m 超出区间 $[-1,1]$, 可通过增加或减少 Δ , 使其值返回该区间. 特征信号 f_x 量化前后的误差记为 q_e , $q_e = f_m - f_x$. 注意到式(2)在形式上与抖动调制^[3]一致,所不同的是这里信息元的码

本空间是有限的. 有限的码本空间不会降低 NCQW 水印性能,因为我们使用的 NC 特征是随机的.

虽然,量化操作可保证误差信号 q_e 最小,但是,这不等价于水印嵌入过程引入的嵌入失真 D_e 最小. 因此,一种优化的方法是在最小化 D_e 的意义下选择 f_m , 即

$$f_m = \arg \min_{f \in \Delta_m} D_e \quad (3)$$

第3种选择 f_m 的方法是考虑攻击者移除嵌入信息所需要引入的最小通道失真 D_{cm} , 通过最大化 D_{cm} 获得 f_m , 即

$$f_m = \arg \max_{f \in \Delta_m} D_{cm} \quad (4)$$

失真量 D_e 和 D_{cm} 的表达式将在后文中给出. 后两种方法需要在整个码本空间中进行搜索,因此比第1种方法更复杂,但由于我们的码本空间是有限的,所以搜索是可行的,另外,后文将指出,在一些特殊情况下,搜索范围可以缩小.

对于加水印的宿主信号 \mathbf{y} , 它与 \mathbf{u} 的 NC f_y 须满足 $f_y = f_m$. 产生信号 \mathbf{y} 的一般函数表达式可写作

$$\mathbf{y} = Em(\mathbf{x}, \mathbf{u}, f_x, f_m) \quad (5)$$

其中, $Em(\cdot)$ 称为嵌入函数,它的具体形式将在下一节中给出.

要提取隐藏信息,首先利用密钥 K 再次产生随机信号 \mathbf{u} , 然后,计算信号 \mathbf{z} 和 \mathbf{u} 之间的 NC f_z , 最后,应用最小距离检测器从 f_z 中提取一个消息 \hat{m} , 该过程可以表示为

$$\hat{m} = \arg \min_{m \in \mathcal{M}} \min_{f \in \Delta_m} |f_z - f| \quad (6)$$

使用上式提取水印信息需要在整个码本空间内进行搜索,因此,水印提取过程的复杂度相对较高. 由于量化操作可以确定每个信息元的码本内与 f_z 距离最近的点,因此,式(6)中内层的最小化操作可以去除,简化为

$$\hat{m} = \arg \min_{m \in \mathcal{M}} |f_z - \mathcal{Q}_m(f_z, \Delta)| \quad (7)$$

如果 f_z 位于区间 $[-1, \Delta-1)$ 或 $[1-\Delta, 1)$ 内时,上式的量化操作可能得出超出范围 $[-1,1]$ 的量化值,这与信息调制时可能出现的问题一致,因此可采取相同的策略来处理,即通过加减一个量化步长使其返回到取值范围 $[-1,1]$.

4 嵌入函数的设计

水印嵌入函数 $Em(\cdot)$ 的基本功能是产生一个加水印的宿主信号 \mathbf{y} , 且满足条件 $f_y = f_m$. 设计 $Em(\cdot)$ 是实现水印方案的一个关键问题,随着特征

信号构造方法的不同, $Em(\cdot)$ 有不同的表达式, 而且, 即使特征信号已经确定, 它的表达式也不唯一, 这是因为信号 \mathbf{y} 是多维的, 但是确定 \mathbf{y} 的条件只有一个. 下面, 将推导 NCQW 的水印嵌入函数, 为了获得唯一的表达式, 我们考虑了最小化嵌入失真的情况. 图 2 给出了此问题的一种几何解释.

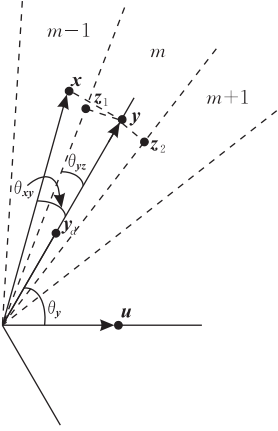


图 2 水印嵌入与移除的几何解释(实心点表示向量, 通过原点的虚线之间为解码器的决策区域)

图 2 中的实心点表示 L 维空间内的向量. 由给出的 NC f_m , 可以求出向量 \mathbf{y} 和 \mathbf{u} 之间的夹角为 θ_y , $\theta_y = \cos^{-1}(f_m)$. 以向量 \mathbf{u} 为轴, 母线与轴的夹角为 θ_y , 确定一个圆锥体, 嵌入区域位于该圆锥的表面. 在嵌入区域内寻找一个与点 \mathbf{x} 距离最近的点, 目的是最小化嵌入失真. 显然, 这个点是 \mathbf{x} 在圆锥体表面的投影, 并位于向量 \mathbf{x} 与 \mathbf{u} 构成的高维平面内. 假设 \mathbf{y}_d 表示向量 \mathbf{y} 的单位向量, 即 $\mathbf{y}_d = \mathbf{y} / \|\mathbf{y}\|$, \mathbf{x}_d 和 \mathbf{u}_d 也有类似的定义. 根据前面的分析, 可获得

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}^T \mathbf{y}_d \mathbf{y}_d \quad (8)$$

和

$$\mathbf{y}_d = \alpha \mathbf{x}_d + \beta \mathbf{u}_d \quad (9)$$

其中, α 和 β 是两个嵌入因子. 向量 \mathbf{y}_d 满足条件

$$\mathbf{y}_d^T \mathbf{y}_d = 1 \quad (10)$$

$$\mathbf{y}_d^T \mathbf{u}_d = f_m$$

将式(9)代入式(10), 并解方程组(10)可以得到

$$\alpha = \sqrt{\frac{1-f_m^2}{1-f_x^2}} \quad (11)$$

$$\beta = f_m - \alpha f_x \quad (12)$$

注意到上述结果只适合 $\|\mathbf{x}\| \neq 0$ 且 $|f_x| \neq 1$ 的情况. 如果 $\|\mathbf{x}\| = 0$, 也就是说 \mathbf{x} 是一个零向量, 此时, 我们再产生一个与向量 \mathbf{u} 正交的随机向量 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^L$. 利用向量 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 很容易构造向量 \mathbf{y}_d 满足条件(10), 即

$$\mathbf{y}_d = f_m \mathbf{u}_d \pm \sqrt{1-f_m^2} \mathbf{v}_d \quad (13)$$

其中, 向量 \mathbf{v}_d 是 \mathbf{v} 的单位向量. 同时, 向量 \mathbf{y} 的幅值不能再采用投影 $\mathbf{x}^T \mathbf{y}_d$ 的方法确定, 而应取决于嵌入失真.

当 $|f_x| = 1$ 时, 即向量 \mathbf{x} 与 \mathbf{u} 的方向相同或者相反, 此时, 可用 \mathbf{x}_d 和 \mathbf{v}_d 的线性组合构造向量 \mathbf{y}_d , 即

$$\mathbf{y}_d = \lambda \mathbf{x}_d + \eta \mathbf{v}_d \quad (14)$$

其中, λ 和 η 是两个嵌入因子. 根据条件(10)以及 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 之间的正交性, 可以导出

$$\lambda = \text{sgn}(f_x) f_m \quad (15)$$

$$\eta = \pm \sqrt{1-f_m^2} \quad (16)$$

此处, $\text{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数. 最后, 通过把式(14)代入式(8)得到信号 \mathbf{y} .

5 嵌入失真

上一节给出了 NCQW 的嵌入函数表达式, 现在可以推导它的嵌入失真 D_e 和 DWR ζ . 我们考虑了一般情况, 即 $\|\mathbf{x}\| \neq 0$. 由于向量 \mathbf{w} 和 \mathbf{y} 是正交的, 嵌入失真 D_e 可表示为

$$\begin{aligned} D_e &= \|\mathbf{x}\|^2 \sin^2(\theta_{xy}) = \|\mathbf{x}\|^2 (1 - \cos^2(\theta_{xy})) \\ &= \|\mathbf{x}\|^2 (1 - \varphi(f_x, f_m)) \end{aligned} \quad (17)$$

表 1 几个 NC 样本的调制及对应的绝对误差和 DWR (其中 $M=2, \Delta=0.11, d=\Delta/4$)

NC	调制后的 NC	绝对误差	DWR
-0.9153	-0.9625	0.0472	51.5
	-0.8525	0.0628	54.8
-0.6887	-0.7425	0.0538	168.6
	-0.6325	0.0562	178.5
0.5235	0.5775	0.0540	239.2
	0.4675	0.0560	240.8
0.8546	0.9075	0.0529	79.3
	0.7975	0.0571	97.1
0.9987	0.9075	0.0912	7.2
	-0.9625	1.9612	9.8

此处, $\varphi(f_x, f_m) = (\sqrt{(1-f_x^2)(1-f_m^2)} + f_x f_m)^2$, θ_{xy} 是向量 \mathbf{x} 与 \mathbf{y} 之间的夹角, $\theta_{xy} = \cos^{-1}(f_x) - \cos^{-1}(f_m)$. 根据上式和 DWR 的定义, 立刻可以得到

$$\zeta = (1 - \varphi(f_x, f_m))^{-1} \quad (18)$$

从式(17)和式(18)可以看出, 嵌入失真与原始宿主信号的能量成正比, 换句话说, DWR 与原始宿主信号的能量无关. 另外, D_e 和 f_m 之间的关系是非线性的, 也就是说, 与 f_x 最接近的 f_m 未必会导致嵌入失真最小. 表 1 清楚地展示了这一效果. 结合式(3)和式(17)可以获得一个令 D_e 最小的 f_m . 实际

上,为了确定最优的 f_m 没必要在整个码本空间 Λ_m 内搜索,而只需要比较在码本 Λ_m 内位于 f_x 左右两侧的值 f_{ml} 和 f_{mr} ,因此,式(3)等价于

$$f_m = \arg \max_{f \in \{f_{ml}, f_{mr}\}} \varphi(f_x, f) \quad (19)$$

这大大降低了水印嵌入的复杂度。

对于最常用的二进制 NCQW 和不同的宿主信号维数 L ,图 3 画出了 DWR ζ 与步长 Δ 的关系曲线。可见 DWR 和 Δ 之间的关系是非线性的。随着 Δ 的增加,DWR 下降的速度很快,但是,当 Δ 大于 0.3 时,DWR 的变化相对平稳。根据式(17),我们知道 DWR 的下限是 1。相对而言,DWR 受 L 的影响则较小。当 Δ 小于 0.2 时,对于不同的 L 得出了近似相同的 DWR,当 Δ 较大时(超过 0.7), L 的影响才变得相对突出。

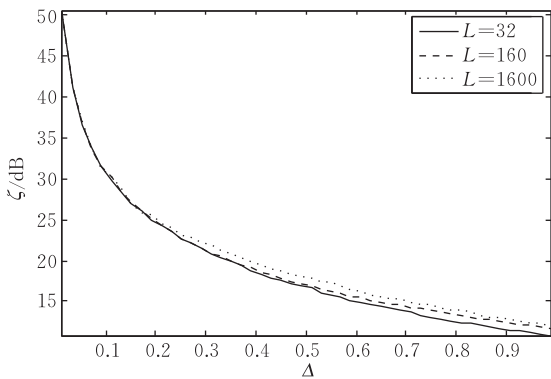


图 3 ζ (DWR)与 Δ 之间关系的实验曲线($d=\Delta/4$)

6 解码器性能

本节评估 NCQW 水印的解码性能。为此,我们考虑了两种攻击:VSA 和加性噪声攻击。考虑 VSA,是因为许多量化水印对该操作特别敏感。通过加性噪声攻击可以考验水印对信息损失的抵抗能力。此外,为了展示 NCQW 水印的相对性能,我们采用 RDM 和 STDM 两种水印作为性能基准。前者对 VSA 具有不变性,后者引入了扩展变换,它们都在量化水印家族中占有极其重要的地位。

6.1 幅值缩放攻击

假设加水印的宿主信号 \mathbf{y} 经过了幅值缩放过程得到失真信号 \mathbf{z} ,因此,两者的关系可以表示为 $\mathbf{z}=\rho\mathbf{y}$,其中 ρ 是增益因子。此时,根据 NC 的定义(见式(1)),很容易获得 $f_z=f_m$,结果从 f_z 中提出的信息 \hat{m} 就是嵌入信息 m 。因此,可以得出结论,NCQW 对幅值缩放攻击具有不变性。

在 $L=32$ 和 DWR $\zeta=30$ dB 的情况下,我们使

用随机信号对 NCQW($M=2$)、RDM 和 STDM 的抗幅值缩放攻击能力进行了测试。实验结果显示在图 4 中。可见,STDM 对该攻击特别敏感。当增益因子超出范围 $[0.9, 1.1]$ 时,STDM 的错误率急速上升。相反,NCQW 和 RDM 都表现了极强的鲁棒性。特别是 NCQW,在整个增益因子的变化区间内,错误率都为零。

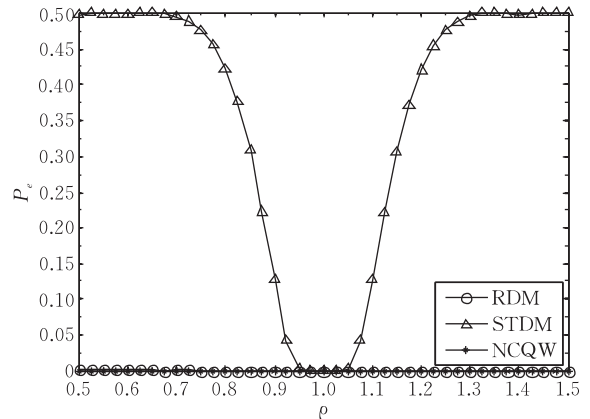


图 4 P_e (BER)对增益因子 ρ 的实验曲线($\zeta=30$ dB, $L=32$)

6.2 加性噪声攻击

对于噪声攻击,如果噪声导致的 NC 变化量满足 $|f_z - f_m| < \Delta/(2M)$ 时,不会发生解码错误。这里, $f_z = f_m \pm \Delta/(2M)$ 规定了正确解码区域的边界,它是向向量 \mathbf{u} 为轴,母线与轴的夹角为 $\cos^{-1}(f_m + \Delta/(2M))$ 确定的圆锥体表面,和以向量 \mathbf{u} 为轴,母线与轴的夹角为 $\cos^{-1}(f_m - \Delta/(2M))$ 确定的圆锥体表面,如图 2 所示,我们称其为决策边界。NCQW 的鲁棒性可以使用加水印的宿主信号 \mathbf{y} 到决策边界的最小距离 D_{cm} 来衡量。假设 \mathbf{z}_1 表示信号 \mathbf{y} 在边界 $f_z = f_m - \Delta/(2M)$ 上的投影, \mathbf{z}_2 表示信号 \mathbf{y} 在边界 $f_z = f_m + \Delta/(2M)$ 上的投影。显然,当 \mathbf{z}_1 和 \mathbf{z}_2 位于包含向量 \mathbf{y} 和 \mathbf{u} 的平面内时,它们中的一个决策区域边界上所有向量中与信号 \mathbf{y} 最接近的。由此, D_{cm} 可写作

$$\begin{aligned} D_{cm} &= \min_{i \in \{1,2\}} \|\mathbf{z}_i - \mathbf{y}\|^2 = \min_{f_z = f_m \pm \frac{\Delta}{2M}} \|\mathbf{y}\|^2 \sin^2(\theta_{xy}) \\ &= \min_{f_z = f_m \pm \frac{\Delta}{2M}} \|\mathbf{y}\|^2 (1 - \varphi(f_m, f_z)) \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $\theta_{yz} = \cos^{-1}(f_m) - \cos^{-1}(f_z)$,最后一个等式的推导方法与式(17)类似。上式表明,通过增大加水印信号 \mathbf{y} 的能量和量化步长 Δ 可以改善 NCQW 的鲁棒性。将式(4)和式(20)相结合,可以获得 f_m 在最大化 D_{cm} 意义下的一个最优解。

利用随机信号,我们测试了 NCQW($M=2$)、RDM 和 STDM 对加性高斯噪声的鲁棒性。图 5 给

出了几种不同条件下的测试结果. 如图 5(a)所示, 对于 $L=32$ 和 $DWR \zeta=30$ dB 的情况, 当 WNR 处于区间 $[-15$ dB, -3 dB] 内时, NCQW 的性能比 STDM 略差, 但是, 当 WNR 再下降时, NCQW 的性能便开始超越 STDM. 总的说来, 在该测试条件下, 两者的性能是很接近的. 然而, 随着 L 增加, NCQW

在更广的 WNR 区间上获得了优于 STDM 的性能, 这可以从图 5(b)观测到. 图 5(c)和图 5(d)表明通过降低 DWR 可进一步提升 NCQW 相对 STDM 的性能优势. 相对而言, RDM 的性能很不理想, 随着 WNR 的下降, 它的 BER 迅速增大, 这主要是因为该方法没有使用扩展变换.

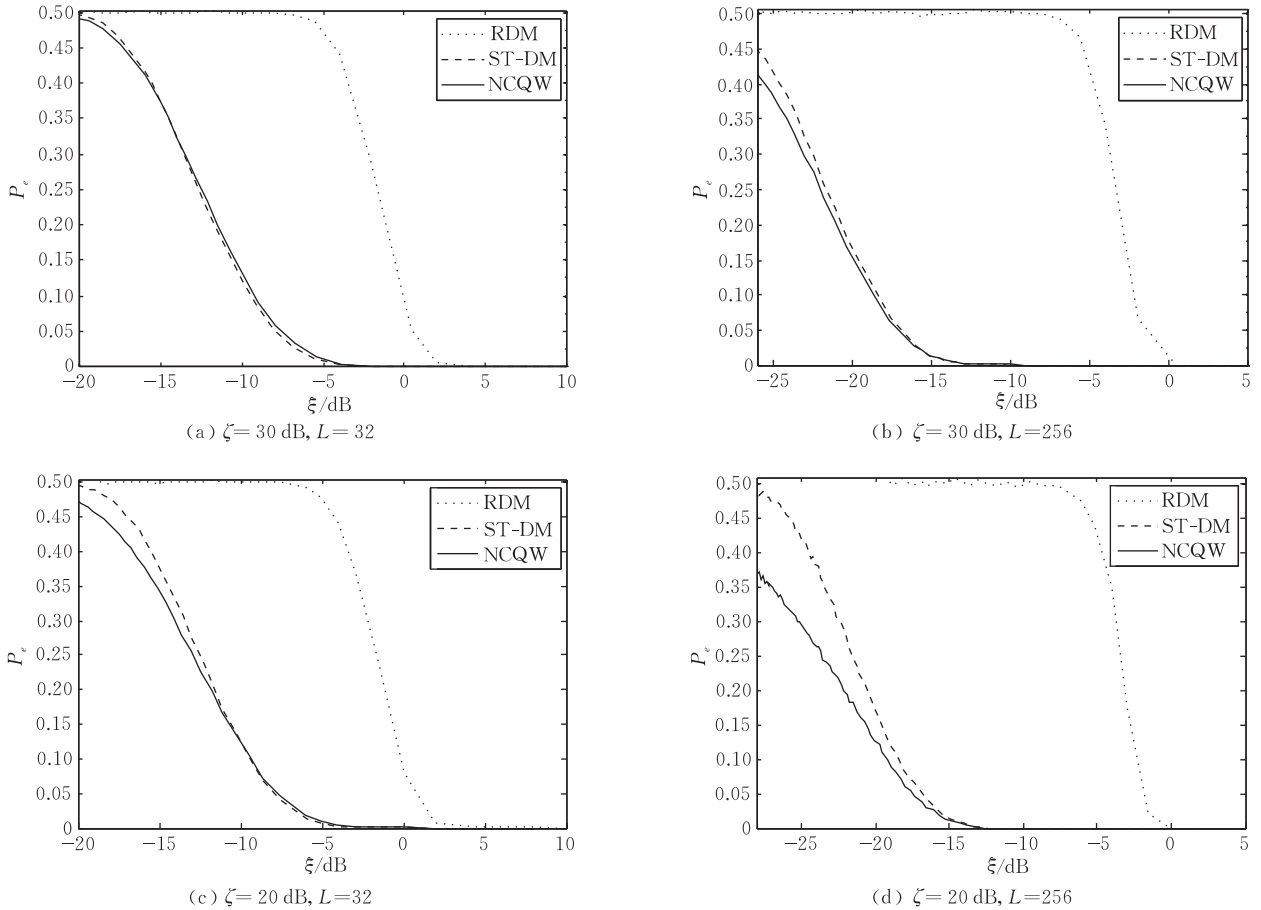


图 5 BER P_e 与 WNR ξ 之间的经验关系曲线

7 实验结果及分析

为了评估水印在实际应用中的性能, 我们实现了一种基于 NCQW 的小波域图像水印方案. 该方案对图像进行三级 haar 小波分解, 并提取第 3 层对角线方向的细节子带小波系数作为宿主信号. 利用

NCQW 在宿主信号内嵌入一个长为 128 位的随机信息, 并实施小波逆变换. 实验使用了 10 个大小为 512×512 的标准图像, 如图 6 中第 1 行所示, 从不可感知性和鲁棒性两个方面测试了水印性能. 由于随着进制 M 的增加, NCQW 的性能会降低, 所以, 我们仅考虑了 $M=2$ 的情况.



图 6 NCQW 水印嵌入效果: 原始图像(第 1 行)与加水印的图像(第 2 行)

7.1 不可感知性测试

为了公平的比较,我们调整量化步长,使嵌入每个图像的水印能量保持一致,水印能量可通过信噪比 PSNR 测量.图 6 给出了 NCQW 水印的嵌入效果,其中,第 2 行为加水印的图像,PSNR 为 48 dB.从主观上说,每个加水印的图像与其原始图像看起来都几乎完全一致,人眼无法区分它们,这说明该水印方案的不可感知性非常好.

另外,利用一些客观的图像质量评价指标^[17]:加权的信噪比 wPSNR(the weighted PSNR)、TPE(the Total Perceptual Error)以及 NLPE1(the Number of blocks greater than the first Local Perceptual Error threshold),我们对加水印图像进行了测试.表 2 给出了 NCQW 水印的测试结果,同时,也

提供了 RDM 水印和 STDM 水印的测试结果.后两种方案的实现方法与 NCQW 水印相类似.对于 NCQW,每个加水印图像的 wPSNR 都在 49 dB 以上,TPE 值都在 0.008 以下,这说明图像的全局质量是极高的,而且,没有一个图像块的失真达到了不能接受的程度,这又说明图像的局部质量是令人满意的.与 RDM、STDM 相比较,NCQW 提供了最大的 wPSNR 和最小的 TPE.这说明 NCQW 的性能就不可感知性而言优于其它两个方案.产生这一结果的原因可解释为:在 STDM 中水印信号是一个随机信号,而在 NCQW 中,水印信号是宿主信号与随机信号的组合,因此,NCQW 可提供比 STDM 更好的水印不可感知性.RDM 在这方面的性能最差,因为它没有使用扩展变换,而扩展变换已被证实可以降低嵌入失真^[5].

表 2 水印不可感知性评测(PSNR 为 48 dB)

图像	wPSNR/dB			TPE/10 ⁻³			NLPE1		
	RDM	STDM	NCQW	RDM	STDM	NCQW	RDM	STDM	NCQW
Plane	49.3	49.2	49.3	6.8	6.0	5.7	0	0	0
Barbara	51.7	51.8	52.0	8.1	7.1	6.6	0	0	0
Boat	51.3	51.2	51.4	8.1	7.2	6.8	0	0	0
House	49.9	50.0	50.1	7.2	6.3	5.9	0	0	0
Baboon	53.4	53.4	53.5	7.7	6.6	6.5	0	0	0
Peppers	49.4	49.5	50.2	8.7	7.1	6.1	0	0	0
Bridge	52.5	52.5	52.5	8.2	7.6	7.2	0	0	0
Crowd	50.7	50.6	50.8	7.7	6.6	6.4	0	0	0
Lake	51.8	51.8	51.9	7.2	6.1	5.9	0	0	0
Lena	49.6	49.7	49.8	8.7	7.2	6.8	0	0	0

7.2 鲁棒性测试

下面,将测试水印对一些常见图像处理操作的鲁棒性.该实验在图像质量相同的条件下进行.为此,我们调整量化步长,使每个加水印图像的 TPE 都为 5.7×10^{-3} .提取水印信息在攻击操作之后进行,并以 BER 作为水印鲁棒性的评价指标.表 3 和 4 给出了在各种攻击下的测试结果.在没有特殊说明的情况下,获得的 BER 是在所有图像上的平均值.

(1) 对幅值缩放攻击的鲁棒性.

我们首先测试了幅值缩放对水印的作用效果.表 3 给出了几种不同增益因子条件下获得的 BER.显然,本文算法对幅值缩放的鲁棒性明显优于其它两种水印方法,它获得了最低的 BER.这主要是因为我们把信息嵌入在一个与幅值缩放攻击无关的特征信号内.RDM 也获得了不错的性能.

(2) 对 Gamma 校正操作的鲁棒性.

Gamma 校正是视频处理中常用的操作.表 3 显示了 Gamma 校正对水印的作用效果.可见,随着 γ 因子的增加,我们方案的 BER 上升了.但相比而言,

我们方案的性能是最佳的,而且优势非常明显,RDM 的性能是三者中最差的.

(3) 对有损压缩攻击的鲁棒性.

有损压缩是水印面临的最重要的攻击之一.我们测试了不同质量因子的压缩对水印的影响,测试结果显示在表 3 中.对该攻击,NCQW 表现了良好的鲁棒性,当质量因子下降到 10 时,它的错误率仍然是较低的.在这方面,STDM 的性能略微优于我们的方法,两者都远远超过 RDM.一个主要的原因是 RDM 没有使用扩展变换.

(4) 对灰度级变换的鲁棒性.

图像灰度的调整有许多种变换函数,这里,我们测试了 3 种情况,分别是直方图均衡、对比度拉伸和对数变换,测试结果显示在表 3 中.可以看出,对比度拉伸和对数变换对 NCQW 的影响很小,而直方图均衡过程的影响则较明显.和其它两种方案比较,我们的方案在这方面显示了最强的鲁棒性.RDM 的性能与本文算法的性能相近,两者都远远优于 STDM.这可能是由于前两种算法对幅值缩放都具

有不变性导致的结果。

(5) 对图像模糊操作的鲁棒性。

我们使用运动模糊对加水印图像进行攻击,角度参数设为 45° ,长度参数取不同的值,测试结果显示在表 3 中,很明显,随着长度参数的增加,本文算法的性能下降了,但是,在模糊失真比较严重的情况下,它的性能仍然很好。STDM 对长度参数的变化最敏感,随着长度参数的增加,它的性能下降最快。在 3 种方案中,本文算法的性能是最佳的。

(6) 对图像锐化操作的鲁棒性。

图像锐化可用于增强图像的边缘和灰度跳变部分。我们使用图像锐化的一种方法 Sobel 算子测试了水印性能,测试结果如表 3 所示。与前几种攻击不同,锐化显著降低了所有被测试水印方案的性能,产生了极高的 BER。这是由于我们把水印信息嵌入在图像的中低频区域,而锐化操作会大量去除图像中的低频信息。因此,如果要提升水印对该操作的鲁棒性,可以将水印嵌入在图像的高频区域,但这又会降低水印对其它攻击的鲁棒性。具体的水印方案设计应该根据应用要求采用折衷的策略。

(7) 对噪声攻击的鲁棒性。

本文测试了水印对加性高斯白噪声和椒盐噪声的鲁棒性,攻击强度分别由噪声的标准差和噪声的分布概率来衡量,测试结果显示在表 4 中。容易看

出,本文算法对这两种噪声都具有很强的鲁棒性,但是,对椒盐噪声的性能不如对高斯噪声的性能好。STDM 水印的性能在攻击强度低的情况下好于本文算法,但随着攻击强度的上升很快被超越。这种效果与上一节中在随机信号上获得的结果是一致的。RDM 在这方面的性能远远落后于前面两种方案,其原因与压缩的情况相同。

(8) 对滤波攻击的鲁棒性。

本文测试了水印对高斯滤波、中值滤波和维纳滤波的鲁棒性,其中高斯滤波的标准差为 0.9,滤波窗的尺寸取不同的值,表 4 给出了多种情况下的测试结果。我们观察到,本文算法对高斯滤波非常鲁棒,在测试的几种条件下,它都获得了很低的 BER。相对而言,中值滤波和维纳滤波对本文算法的性能影响较大,特别是中值滤波,当滤波窗的尺寸为 7×7 时,本文算法的 BER 显著变大了。滤波攻击对另两种水印方案的影响也类似,只是此两者在不同方面有各自的优势。和它们相比,本文算法对滤波攻击的鲁棒性是最优的。

前面比较了 NCQW 与两种基本量化水印的性能,他们的实现是相同的,测试条件也一致。实验表明,我们的方案对各种图像处理操作的综合性能是最优的,其他两种方案除 STDM 在有损压缩方面略微领先,在其他方面的劣势非常明显。

表 3 在不同攻击下 NCQW、STDM 与 RDM 得到的 BER/%

方法	幅值缩放 BER			Gamma 校正 BER			有损压缩 BER				灰度级变换 BER			模糊 BER			锐化 BER
	0.6	0.8	1.4	0.6	2.0	5.0	10	20	30	40	直方图	对比度	对数	4	6	8	
NCQW	0	0	2.7	0	1.6	27.8	24.0	5.2	1.1	0.1	18.8	2.6	0	1.9	12.3	27.4	47.7
STDM	12.0	0.2	7.0	0.2	2.8	29.2	21.9	2.5	0.2	0	41.6	23.8	5.5	6.4	24.8	37.0	48.9
RDM	0.5	0.5	5.5	1.3	11.4	35.9	50.2	53.4	32.8	15.9	18.9	9.4	0.5	8.7	19.1	31.4	50.6

表 4 在噪声与滤波攻击下 NCQW、STDM 与 RDM 得到的 BER/%

方法	AWGN BER				椒盐噪声 BER			高斯滤波 BER			中值滤波 BER			维纳滤波 BER
	10	20	30	40	0.025	0.05	0.075	3×3	5×5	7×7	3×3	5×5	7×7	5×5
NCQW	1.2	8.8	21.9	28.0	13.6	23.8	30.1	0.5	1.1	1.1	4.0	20.9	37.9	12.2
STDM	0.2	10.3	25.2	37.1	12.0	28.0	38.9	2.2	6.0	6.4	4.2	27.2	43.4	27.2
RDM	43.9	52.1	51.6	49.6	20.3	39.9	46.1	4.5	6.5	6.3	19.1	27.0	39.5	23.4

7.3 与其它方案的比较

下面,我们将提供更多的比较实验结果,以便能够更全面地评估提出的 NCQW 水印的性能。用于比较的水印方案有文献[6-7,10-11,13,18]中的方案。这些方案都是本领域中有代表性的研究成果。

(1) 与文献[10]和文献[11]的比较。这两种方法都是基于角度的量化水印。它们的实现与前面

NCQW 的实现类似。鲁棒性测试在加水印图像的质量 TPE 为 0.0057 时进行,测试结果如表 5 所示。容易看出,在被测试的几种攻击情况下,本文提出的方案优于其它两种方法。

(2) 与文献[6]和文献[7]的比较。这两种方法都是基于宿主信号范数的量化水印,区别是前者使用了非均匀的量化步长。对这两种方法,我们也采用了与前面 NCQW 类似的实现策略。鲁棒性测试在

加水印图像的质量 TPE 为 0.0057 时进行,我们给出了在几个标准图像上的测试结果,如表 6 所示.可

以看出,除压缩以外,对其它被测试的攻击,本文提出的方案都优于另外两种方法.

表 5 在不同攻击下 NCQW 与文献[10]和文献[11]的 BER/% 结果比较

方法	幅值缩放 BER		高斯滤波 BER	中值滤波 BER	有损压缩 BER		AWGN BER			直方图均衡 BER
	0.6	1.5	3×3	3×3	20	30	10	20	30	
文献[10]	0.47	16.48	5.23	17.50	47.58	32.66	36.48	47.34	50.47	22.58
文献[11]	1.56	13.13	7.42	15.70	22.73	16.41	15.86	28.98	37.19	23.28
NCQW	0	4.14	0.55	3.98	5.23	1.09	1.17	8.75	21.88	18.83

表 6 在不同攻击下 NCQW 与文献[6]和文献[7]的 BER/% 结果比较

图像	方法	高斯滤波 BER	中值滤波 BER	有损压缩 BER			AWGN BER			模糊 BER	对比度拉伸 BER
		3×3	3×3	8	20	30	10	20	30	6.0	
Boat	文献[6]	17.97	14.06	5.47	0	0	0.78	32.81	77.34	56.25	85.94
Boat	文献[7]	33.59	32.81	21.09	2.34	3.13	9.38	25.78	52.34	48.44	66.41
Boat	NCQW	0.78	3.91	26.56	2.34	0.78	1.56	8.59	18.75	14.06	0
House	文献[6]	18.75	10.94	3.91	0	0	0	21.09	51.56	61.72	60.16
House	文献[7]	0	0.78	10.94	0	0.78	20.31	51.56	57.81	40.63	50.78
House	NCQW	0	0	24.22	5.47	1.56	0.78	11.72	21.09	9.38	0

(3)与文献[13]的比较.文献[13]提出了一种基于梯度方向的量化水印,它的一个实现是在第3层小波系数上嵌入256位信息.为了在相同的信息长度下进行比较,NCQW水印的实现被修改如下:利用第3层小波变换的3个细节子带LH3、HL3和HH3产生两个新的差值矩阵作为宿主信号,即HH3-LH3和HL3-HH3,然后通过NCQW在每32个差值矩阵分量内嵌入1位信息,最后把获得的对差值矩阵信号的修改量在最小均方误差的意义下转换为对各个细节子带的修改量.鲁棒性测试在加水印图像的质量为PSNR为42dB时进行,表7给出

了在一个标准图像上的测试结果.表7表明两种方案对幅值缩放攻击的性能一致,在其它方面,除椒盐噪声攻击以外本文方案的性能都优于文献[13]提出的方案.

(4)与文献[18]的比较.该方案是一种小波域的扩频水印.比较实验在水印信息长度为256位和加水印图像的质量为PSNR为42dB的条件下进行,NCQW的实现与前一个实验相同,表8给出了在一些标准图像上的测试结果.显然,在用于测试的几种攻击下,本文方案都表现了比文献[18]的方案更优的鲁棒性.

表 7 在不同攻击下 NCQW 与文献[13]的 BER/% 结果比较

图像	方法	幅值缩放 BER		高斯滤波 BER	中值滤波 BER		有损压缩 BER			AWGN BER		椒盐噪声 BER
		1.5	2.0	5×5	3×3	5×5	11	20	30	10	20	0.01
Peppers	文献[13]	0	0	0.58	1.17	6.64	10.68	1.41	0.18	1.32	13.47	0.11
Peppers	NCQW	0	0	0	0	8.98	10.16	1.17	0	0	4.30	2.73
Baboon	文献[13]	0	0	0.96	5.08	19.75	9.86	1.41	0.62	1.28	12.48	0.54
Baboon	NCQW	0	0	0.78	2.73	19.53	1.95	0	0	0	3.13	0
Barbara	文献[13]	0	0	0.13	1.10	8.14	8.64	1.69	0.16	1.40	12.87	0.14
Barbara	NCQW	0	0	0	1.17	10.55	4.69	0	0	0.39	3.52	0.78
Lena	文献[13]	0	0	0.17	0	7.10	8.64	1.65	0.41	1.85	13.52	0.03
Lena	NCQW	0	0	0	0	7.81	9.77	0	0	0	4.30	0.78

表 8 在不同攻击下 NCQW 与文献[18]的 BER/% 结果比较

图像	方法	中值滤波 (3×3)BER	有损压缩 (11)BER	AWGN (10)BER	椒盐噪声 (0.01)BER
Peppers	Wang ^[18]	29.35	26.10	1.25	2.00
Peppers	NCQW	0	10.16	0	2.73
Baboon	Wang ^[18]	31.65	16.95	1.30	1.95
Baboon	NCQW	2.73	1.95	0	0
Barbara	Wang ^[18]	24.95	16.45	1.45	2.25
Barbara	NCQW	1.17	4.69	0.39	0.78
Lena	Wang ^[18]	30.80	29.80	1.45	2.45
Lena	NCQW	0	9.77	0	0.78

8 结束语

本文的主要贡献是提出了一种新颖的量化水印,称为NCQW.该方法对宿主信号与一个随机信号的归一化相关系数进行信息调制.我们给出了多进制NCQW的码本结构、信息调制与提取方案,并设计了水印嵌入函数.在NCQW中,码本大小是有限的,它与使用的步长有关,水印信号是宿主信号与

随机信号的线性组合,有利于改善水印的不可感知性,另外,该方法中引入了扩展变换过程,有利于提升水印的鲁棒性。

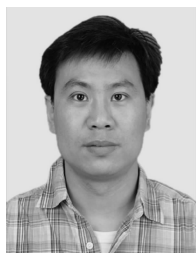
我们进一步导出了 NCQW 水印的嵌入失真和移除水印信息所需要的最小失真表达式。利用它们可以在码本内搜索一个最佳的信息码,提升水印的性能。解码器性能的分析表明 NCQW 不仅对幅值缩放攻击具有不变性,而且,对 AWGN 也表现出比传统 STDM 更优的性能。仿真结果表明,相对于多种已有的典型水印方案,NCQW 水印在不可感知性和鲁棒性方面获得了显著的提升。

致 谢 彭硕玲同学参与了本文算法性能的测试工作,苑岩峰同学参与了论文格式的排版,作者对他们的贡献深表谢意。作者还要衷心感谢匿名的评审者和编辑为本文提出了宝贵意见和修改建议!

参 考 文 献

- [1] Cox I J, Miller M L, McKellips A. Watermarking as communications with side information. *Proceedings of the IEEE*, 1999, 87(7): 1127-1141
- [2] Costa M. Writing on dirty paper. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1983, 29(3): 439-441
- [3] Chen B, Wornell G W. Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(4): 1423-1443
- [4] Eggers J J, Bauml R, Tzschoppe R, Girod B. Scalar Costa scheme for information embedding. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(4): 1003-1019
- [5] Pérez-González F, Balado F, Martín J R H. Performance analysis of existing and new methods for data hiding with known-host information in additive channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(4): 960-980
- [6] Balado F. New geometric analysis of spread-spectrum data hiding with repetition coding, with implications for side-informed schemes//*Proceedings of the 4th International Workshop on Digital Watermarking*. Siena, Italy, 2005: 336-350
- [7] Kalantari N K, Ahadi S M. A logarithmic quantization index modulation for perceptually better data hiding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(6): 1504-1517

- [8] Oostveen J C, Kalker A A C, Staring M. Adaptive quantization watermarking//*Proceedings of SPIE: Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VI*. San Jose, California, USA, 2004, 5306: 296-303
- [9] Pérez-González F, Mosquera C, Barni M, Abrardo A. Rational dither modulation: A high-rate data-hiding method invariant to gain attacks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(10): 3960-3975
- [10] Ourique F, Licks V, Jordan R, Pérez-González F. Angle qim: A novel watermark embedding scheme robust against amplitude scaling distortions//*Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Philadelphia, PA, USA, 2005: 797-800
- [11] Mankar V H, Das T S, Sarkar S K. An angle qim watermarking in STDM framework robust against amplitude scaling distortions//*Proceedings of the 2nd International Conference on Contemporary Computing, Communications in Computer and Information Science*. Noida, India, 2009, 40: 400-410
- [12] Akhaee M A, Sahraeian S M E, Jin C. Blind image watermarking using a sample projection approach. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2011, 6(3): 883-893
- [13] Nezhadarya E, Wang Z J, Ward R K. Robust image watermarking based on multiscale gradient direction quantization. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2011, 6(4): 1200-1213
- [14] Bartolini F, Barni M, Piva A. Performance analysis of STDM watermarking in presence of nonadditive attacks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(10): 2965-2974
- [15] Pérez-Freire L, Pérez-González F. Security of lattice-based data hiding against the watermarked-only attack. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, 3(4): 593-610
- [16] Zhu X, Peng S. A novel quantization watermarking scheme by modulating the Normalized correlation//*Proceedings of the 37th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Kyoto, Japan, 2012: 1765-1768
- [17] Voloshynovskiy S, Pereira S, Iquise V, Pun T. Attack modelling: Towards a second generation watermarking benchmark. *Signal Processing, Special Issue*, 2001, 81(6): 1177-1214
- [18] Wang Y, Doherty J F, Dyck R E V. A wavelet-based watermarking algorithm for ownership verification of digital images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(2): 77-88



ZHU Xin-Shan, born in 1977, Ph.D., associate professor. His research interests include signal processing, data hiding and multimedia security.

DING Jie, born in 1978, Ph.D., associate professor. His research interests include formal methods and their applications.

Background

With the development of computer industry and Internet, a lot of digital media, including image, audio, and video, have been duplicated, modified, and distributed by anyone easily and unlimitedly. The security of digital media has attracted more and more attention. Digital watermarking can provide an effective security protection to digital contents and becomes one of the active research topics in the multimedia area.

Quantization-based watermarking is one kind of the most important watermarking methods proposed so far for canceling the host signal interference. However, such methods were shown to be extremely sensitive to volumetric scaling. A number of solutions have been proposed to overcome this limitation. Basically, they can be grouped into four categories: i) estimating the volumetric scaling factor; ii) adoption of spherical codewords together with correlation decoding; iii) definition of a gain-invariant embedding domain; and iv) constructing a gain-invariant host signal for quantization. Despite the improvement of the robustness against volumetric scaling, the use of these technologies, in most cases, causes a loss of performance in other aspect, e. g. , noise addition. In this study, we present a novel watermarking scheme, named Normalized Correlation based Quantization Watermarking (NCQW), where the watermark is embedded by quantizing the normalized correlation between the host signal

and a random signal. The remarkable feature of NCQW is its theoretical invariance to volumetric scaling. Meanwhile, it is confirmed that NCQW possesses the perceptual advantage and the improved robustness against some other typical attacks.

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60803122, 61103018), by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant Nos. BK2011442, BK2012683), by the Innovative Foundation of Yangzhou University (Grant No. 2011CXJ023), by the Opening Project of State Key Laboratory of Digital Publishing Technology, and by the Opening Project of State Key Laboratory of Software Development Environment (Grant No. SKLSDE-2011KF-08). These projects establish a new watermarking model by combining spread spectrum and quantization watermarking, promote the development of the theories related with digital watermarking and provide the viable watermarking method for practical applications.

Recently, we have proposed several improved quantization-based watermarking methods robust against volumetric scaling, analyzed their performance against the composite attacks mathematically, and developed the watermarking algorithms for binary and gray-scale images.