

基于提升小波与 DCT 的自适应音频水印算法

陈新龙, 李晓艳, 胡国庆, 沈嘉皓

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

(cxltx@cqu.edu.cn; lixy_sxtu@126.com)

摘要: 为了达到版权保护的目的, 利用提升小波变换计算速度快、离散余弦变换(DCT)后直流系数的听觉容差性强的特点, 提出了一种在提升小波域进行 DCT 的自适应音频水印算法。原始音频信号经提升小波变换后分解为低频子带和高频子带, 对其低频子带进行 DCT, 将水印序列嵌入到 DC 系数上。考虑到水印音频信号的不可感知性和鲁棒性之间的平衡问题, 采用了水印序列自适应调整嵌入。实验结果表明, 该水印算法计算复杂度低, 且对噪声、低通滤波等常见信号攻击及恶意替换操作均表现出很强的鲁棒性。

关键词: 音频水印; 提升小波; 离散余弦变换; 自适应

中图分类号: TP309 **文献标志码:** A

Adaptive digital audio watermarking method based on DCT and lifting wavelet transform

CHEN Xin-long, LI Xiao-yan, HU Guo-qing, SHEN Jia-hao

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to protect copyright, an adaptive digital audio watermarking method based on Discrete Cosine Transform (DCT) and lifting wavelet transform was proposed, which was based on computing power of lifting wavelet and the largest auditory tolerance of DC coefficients after DCT transform. Firstly, the original audio signal was decomposed into low-frequency and high frequency component after lifting wavelet transform, then DCT was performed on the low-frequency component and watermarks were embedded into the DC coefficient sequences according to the largest DC auditory tolerance after DCT coefficients transform. Meanwhile, considering the balance between the robustness and the imperceptibility of the audio watermarking, the adaptive adjustments were used for embedded watermarking. The experimental results show that the proposed method not only has low computational complexity, but also is robust to malicious replace operation and common signal attacks like noise adding and low-pass filtering.

Key words: audio watermarking; lifting wavelet transform; Discrete Cosine Transform (DCT); adaptive

0 引言

近年来,随着计算机网络技术和多媒体技术的飞速发展及各种音频处理软件的广泛应用,数字音频在传输、存储、复制的同时,容易被攻击者篡改其内容,如何对多媒体信息进行数字版权保护已经成为国际上研究的热门课题,数字音频水印技术作为数字音频作品知识产权保护的一种有效手段,受到大家的广泛关注^[1-3]。目前的音频水印算法主要分为时域算法和变换域算法。在时域上,比较早一些的水印算法大部分是基于不重要分量的水印嵌入,它不能抵抗一些常见的攻击,如 Ko 等人^[4]提出回声隐藏算法等;在变换域,一般都是将水印信号或者音频载体信号进行离散小波变换或者离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT),然后在变换域中嵌入水印信号,但这种方法一般都不能实现水印盲提取,不利于实际应用^[5]。陈金儿等人^[6]对音频的小波系数作离散余弦变换,采用量化系数的方法把鲁棒水印和脆弱水印嵌入到不同小波系数的 DCT 域系数里,该方案运算量较大,且量化系数算法的信噪比较低。此外,有些算法还进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),通过计算其频谱求其频率

遮掩和时间掩蔽函数,再逆变换回时域嵌入水印,但是这种算法过程比较复杂,而且计算量很大。

针对上述问题,本文提出了一种基于提升小波与 DCT 的自适应鲁棒水印算法。采用提升小波变换(Lifting Wavelet Transform, LWT)对音频信号进行分解,大大提高了水印信息嵌入和提取的执行效率。对 LWT 分解后的低频部分进行了 DCT,根据 DCT 系数的趋零特性,把水印序列加在 DCT 后的直流 DC 系数上,使得水印的鲁棒性和不可感知性达到了更好的平衡。水印提取时不需要原始音频载体和原始水印图像,同时算法大大提高了信号的处理速度,更利于硬件实现。

1 水印嵌入方法

1.1 提升小波

传统的小波变换是用信号与滤波器卷积的方式进行,计算量很大,需要另外的数据空间存放卷积的结果。提升小波是小波变换实现的一种算法——提升算法^[7],由贝尔实验室的 Sweldens 等人于 20 世纪 90 年代中期提出,是一种不依赖于傅里叶变换的提升小波构造方法,被誉为第二代小波变换^[8],是一种更为快速的小波变换实现方法。

收稿日期:2010-07-05;修回日期:2010-09-01。 基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(1020708920090147)。

作者简介:陈新龙(1970-),男,江西萍乡人,副教授,硕士,主要研究方向:多媒体通信、网络; 李晓艳(1985-),女,山西太原人,硕士研究生,主要研究方向:数字水印、网络; 胡国庆(1970-),女,甘肃静宁人,讲师,主要研究方向:计算机仿真; 沈嘉皓(1985-),男,河南确山人,硕士研究生,主要研究方向:认知无线电、网络安全。

提升算法的基本思想是将现有的小波滤波器分解成基本的构造模块,分步骤完成小波变换,分为分解、预测和更新3个过程。

1) 先把 λ_{j+1} 划分为 λ_j (偶抽样序列) 和 γ_j (奇抽样序列) 两个子集。

2) 用数据集 λ_j 预测数据集 γ_j , 并用预测误差 $\gamma_j - p(\lambda_j)$ 来代替 γ_j , 即 $\gamma_j = \gamma_j - p(\lambda_j)$, 其中 p 为预测算子; γ_j 即为分解后的高频信号部分。

3) 定义一更新算子, 用 γ_j 来更新数据集 λ_j , 令 $\lambda_j = \lambda_j + u(\lambda_j)$, 此时 λ_j 就是分解后的低频信号部分。

信号的重构过程是分解过程的逆过程, 即更新、预测、合并, 并改变分解公式中的数据流方向和加减号即可得到。

1.2 水印序列嵌入位置的选择

王向阳等人^[9]提出了把水印序列嵌入到 DCT 后的高频系数中, 但是音频信号的高频部分对常见的信号处理和噪声比较敏感, 因此这种算法的鲁棒性较差。Cox 等人^[11]为了提高鲁棒性, 将水印嵌入在 DCT 域中的低频系数, 即信号能量较集中的区域, 即使音频信号有一定的失真, 也可以保留其主要成分, 鲁棒性较好, 但是对于各种抗攻击能力较弱。后来一些研究人员进行了折中, 把水印嵌入到 DCT 域的中频系数上。黄继武等人^[10]提出对于图像水印, DCT 的直流分量比交流分量有更大的感觉容差, 水印应该更多地嵌入在 DCT 的直流分量上, 此算法在鲁棒性和不可感知性上达到了一个较好的平衡。

由于音频信号经过 DCT 后的直流系数存在明显的趋零性, 即最大的听觉容差性, 本文选择将水印序列嵌入到 DCT 后的 DC 系数上。

1.3 嵌入算法

水印嵌入框图如图 1 所示。

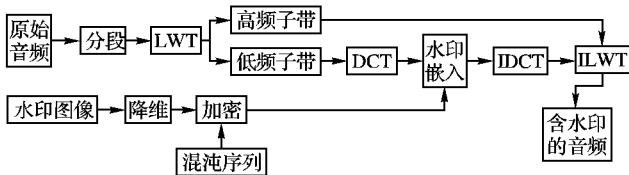


图1 音频水印嵌入流程

1) 二值图像降维。

二维水印图像嵌入到一维数字音频信号中需要对其进行降维处理, 降维以后转变为一维的二进制水印序列。

设图像大小为 $P \times Q$, 可以将其表示为 $\{I_m(i, j) | 0 \leq i < P, 0 \leq j < Q\}$, 其中 $I_m(i, j)$ 代表着二维图像的第 i 行第 j 列像素的数据, 降维后 $I'(k) = \text{Image}(i, j), 0 \leq i < P, 0 \leq j < Q, K = i \times Q + j$ 。

2) 混沌加密。

混沌序列具有易生成性、可完全重现性和对初始条件可敏感性等特点, 可利用混沌序列对上述二进制水印序列进行置乱加密。若一个混沌系统在混沌区输出序列 x_k , 将这个随机序列作为密钥流去调制图像信息流, 则可以实现对图像的加密。本文采用 logistic 映射产生的混沌序列 v_k 对水印进行加密置乱, 即 $w = \{W(K) = I'(k) \oplus V_k | 1 < k < i \times Q + j\}$, 在不知密钥的情况下, 无法恢复水印图像。置乱的目的为了消除二值图像的像素空间的相关性, 提高水印算法的鲁棒性。置乱变换前后的图像对照如图 2 所示。



(a) 原始水印 (b) 置乱变换后图像

图2 原始水印与置乱变换后的图像

3) 分段处理。

对原始音频信号 A 进行分段, 即将整个音频载体划分为若干个音频数据段。设每个音频段含有 L 个数据, 考虑到水印的透明性和鲁棒性, 音频段长度 L 的取值应比较大, 则可将整个音频信号划分为 N/L 个音频数据段, 即 $A = \{A(k) | 0 \leq k < N/L\}, A(k) = \{a(kl + i) | 0 \leq i < L\}$ 。

4) 提升小波变换。

采用 Haar 小波基对分段后的每个音频数据段 $A(k)$ 分别进行三级提升小波变换, 得到各分段后的提升小波系数; 每段有 4 个小波系数, 其中 A_3 代表音频信号的低频小波系数, D_3 、 D_2 、 D_1 分别代表音频信号小波分解的各级高频系数。

5) 离散余弦变换。

对每段信号中经过提升小波分解后的低频系数 A_3 进行一维的离散余弦变换。经过变换后, 取出其中的直流系数作为待嵌入水印系数。

6) 自适应水印嵌入。

由于经过 DCT 后的直流系数存在着明显的“趋零”特性, 即有着最大的听觉容差, 因此最适合嵌入水印信息。同时为了提取的方便, 把“0”、“1”序列中的“0”改为“-1”, 即改为双极性码流, 具体嵌入算法如下。

记经过 DCT 后的分段直流系数为 $D(i)$, 其中: $i = 1, 2, \dots, N/L$ (N/L 为总段数), $Det(k)$ 表示嵌入后的直流系数。嵌入强度 β 为一大于零的值。

$$\begin{cases} Det(k) = D(i) + k\beta, & bit = 1 \\ Det(k) = D(i) - k\beta, & bit = -1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: k 为调制系数, 根据实验中的参数调整, 本实验选取的为 $k = 1.8 \sim 2.2$ 。对于 β 的取值, 有如下的研究:

对于音频水印系统, 鲁棒性和不可听性是最基本的要求, 相互影响相互制约, 而嵌入强度的大小直接影响到两者, 为了保证每段的鲁棒性和不可听性, 采用自适应嵌入强度调整。

首先根据人类心理声学特性确定一个最佳的嵌入强度, 根据此嵌入强度计算出此时的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR), 即最佳 SNR。当每段音频数据段嵌入水印后, 都要进行一次 SNR 的计算, 然后与最佳 SNR 进行比较, 得到调整的参数, 最后进行参数反馈调整。当该系统稳定时则得到最佳的嵌入算法参数, 最佳嵌入强度的算法流程如图 3 所示。

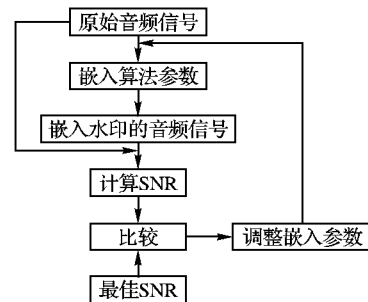


图3 最佳嵌入强度的算法流程

2 水印提取算法

水印的提取过程就是上述嵌入过程的逆过程, 对嵌入水印信息后的直流系数进行离散余弦反变换 (Inversion Discrete

Cosine Transform, IDCT);然后和提升小波变换后的高频子带同时进行提升小波反变换(Inversion Lifting Wavelet Transform, ILWT)变换,转换为时域样值;并根据相应的置乱变换的逆变换算法将音频文件恢复,即得到了嵌入水印后的音频信号。该算法实现了水印的盲提取,提取的时候检测到其直流系数大于零,提取信息“1”;反之,提取信息“0”。

提取和恢复过程如下:

1)输入和嵌入时相同的私人密钥,对含有水印的音频信号进行与嵌入相同的置乱变换。

2)对置乱变换后的音频信号进行与上述嵌入算法相同的分段,并进行相同的提升小波变换,变换后得到了高频子带和低频子带。

3)对其低频子带进行 DCT,并提取出其直流系数。若其直流系数大于零,则提取水印信息为“1”;若其直流系数小于零,则提取水印信息“0”。

4)对提取出的比特流进行相同的反置乱变换,并将其转换为水印图像。

3 仿真实验及分析

实验主要从不可感知性、鲁棒性和算法的信号处理时间 3 方面进行测试。

在仿真试验中,采用乡村、流行、古典、民歌 4 种不同的音乐形式来进行测试。音频信号是一段时常为 30 s,采样率为 44.1 kHz、量化精度为 16 位的单声道的歌曲,一幅 32 × 32 大小的“重庆大学”字样图像作为水印信息。仿真实验通过 Matlab 实现,波形处理用到了 Cool Edit 软件。

3.1 水印的不可感知性测试

客观评价:根据式(2)可以计算出其含水印的音频信号的信噪比为 32.978 dB。

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^N x^2(i)}{\sum_{i=1}^N (x(i) + y(i))^2} \quad (2)$$

主观评价:随机对 20 个人进行 MOS 测试,测试结果如表 1。

表 1 水印音频信号 MOS 测试			
分数	人数	分数	人数
5	19	2	0
4	1	1	0
3	0		

测试结果为 1 人听出与原始音频有细微的差别,其余的人认为与原始音频相同,MOS 得分为 4.95 分,图 4 为信号波形对比图。

从波形图上可以看出,嵌入前和嵌入后几乎没有差别,算法的不可感知性较好。

3.2 鲁棒性测试(水印的抗攻击能力测试)

实验对嵌入水印的音频信号做如下的处理:1)加噪声。加入均值为 0、均方差为 0.05、信噪比为 1.8 dB 的高斯白噪声。2)低通滤波。采用截止频率为 22.05 kHz 的巴特沃斯低通滤波器。3)下采样。将水印音频的采样频率降低到 22.05 kHz,然后再利用二项插值技术将原始水印的采样频率还原为 44.1 kHz。4)上采样。将水印音频的采样频率提升到原来的两倍,再利用插值技术还原。5)重量化。由 16 位量化到 8 位,再由 8 位量化到 16 位。6)裁剪攻击。在水印音频中随机选择 5 个位置,各裁剪掉 50 个采样点。7)抖动攻击。在水印

音频中随机剪切掉 10 个采样点,然后采用归一化相关系数定量分析嵌入前和嵌入后的图像的相似度,从受攻击后的音频中提取的水印情况和归一化相关系数 NC 值如图 5 所示。

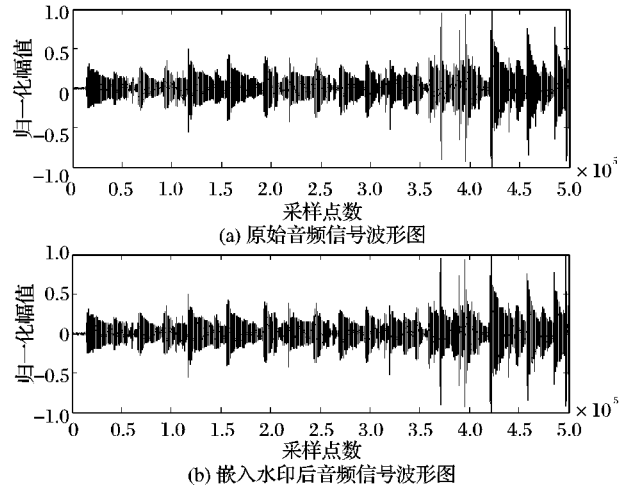


图 4 原始音频信号与嵌入水印后的信号波形

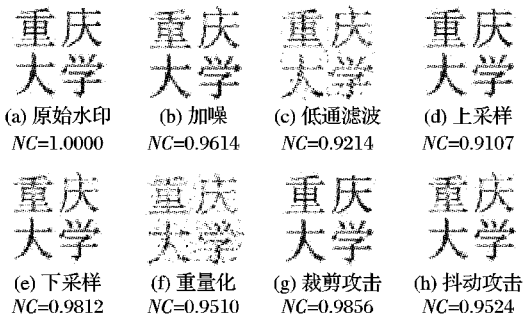


图 5 鲁棒性测试结果

从图 5 提取出的水印图像和 NC 值可以看出对一些常见的攻击有很强的鲁棒性。

3.3 算法的信号处理时间

提升小波变换的应用使得算法中的信号处理时间有了很大的提高,对同一段音频信号,计算同等条件下进行信号处理的平均时间如表 2 所示。

表 2 信号处理速度比较	
变换	时间/s
普通小波变换	3.015
小波包	4.621
提升小波变换	2.288

实验表明该方案有很好的时间效率,相对于离散小波变换效率提高了 24.11%,相对于小波包提高了 50.49%,因此很适合硬件实时实现。

可以看出,此水印算法有较强的鲁棒性和较高的稳健性,有着较高的归一化相关性;同时水印嵌入和提取的执行率有较大的提高,更利于实际应用。与现有的小波域直接嵌入水印相比,在不可感知性、信号处理时间和抗攻击性上都有很大的提高。与文献[5]相比,在水印嵌入的位置选择上有了改进,文献[5]中鲁棒水印的嵌入采用的是对小波系数进行量化嵌入水印,而本文根据的是 DC 系数的最大听觉容差性,把水印序列自适应嵌入在低频小波系数进行离散余弦变换后的 DC 系数上,使得鲁棒性和不可听性达到了更好的平衡。由实验结果可知,在抗攻击性方面,本文的鲁棒性得到了明显的增强。

色;然后针对系统每个功能菜单,进行菜单权限设置,如图6所示,包括配置菜单的权限拥有者、菜单操作权限和权限拥有者可访问的数据范围。系统中所有用户的访问界面是统一的,根据具体用户所承担的角色和权限的差异,显示该用户能享有的功能服务和数据。

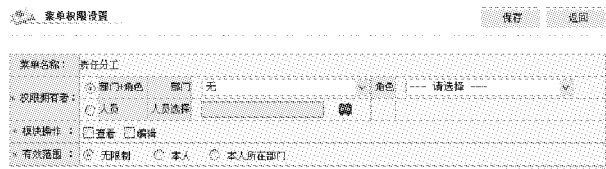


图6 菜单权限设置界面

2) 权限访问。

系统采用单点登录方式,输入用户名和密码信息后,通过自定义的代码实现验证。获取用户的基本信息、用户的角色列表、用户直接的功能列表等信息后,系统根据用户、角色和功能之间的关联关系,计算出用户的权限,在业务逻辑层采用 T-SQL 查询语句实现此服务,并返回权限关系表,保存在 Session 中。

3) 权限控制。

用户登录系统时,验证完登录信息后,系统读取 Session 中保存的用户功能权限列表,根据列表中的所有模块和功能的编号与名称动态生成用户可访问的菜单树。

系统主界面分为左右两个框架,左边是树状的结构,显示用户可以访问的模块和功能,右边是具体的功能页面。当用户点击左框架功能菜单链接或右框架中跳转页面时,在 Page_Load 事件中,根据用户权限列表中所拥有的该页面的操作权限和可访问的数据范围,显示相应的操作按钮和数据结果,实现细粒度访问控制。

3.3 应用效果

基于 D-RBAC 模型的某装备保障综合管理信息系统,把系统角色与组织机构的各部門相关联,通过顶层部门管理所有装备的全面装备保障信息,中层部门管理所辖机构的大部分装备保障信息和基层部门管理本单位的日常装备保障信息,灵活有效地实现了对单位全部装备和人员的分级精确管控和责权利精确划分,取得了很好的应用效果。

(上接第 522 页)

4 结语

本文讨论了基于提升小波和 DCT 的音频水印算法,该算法有以下特点:1) 透明性良好,嵌入图像水印时在听觉上没有影响到人耳的听觉质量;2) 图像水印对重采样、加噪声、重量化、随机剪切等常见的攻击均表现出了很强的鲁棒性;3) 水印提取时不需要原始音频信号和二值图像,是一种盲水印算法;4) 算法的信号处理时间有很明显的提高,因此更有利于硬件实现。

参考文献:

- [1] 王宏霞,范明泉. 基于质心的混合域半脆弱音频水印算法[J]. 中国科学:信息科学, 2010, 40(2): 313-326.
- [2] MOULIN P, KOETTER R. Data hiding codes [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(12): 2083-2126.
- [3] 廖琬明,张玉贤,李东晓,等. 基于小波变换的脆弱鲁棒双音音频水印[J]. 浙江大学学报:工学版, 2009, 43(4): 721-726.
- [4] KO B S, NISHIMURA R, SUZUKI Y. Time-spread echo method for

4 结语

权限管理是信息系统的重要组成部分,权限管理的技术和策略对系统的信息安全影响很大。本文通过对 RBAC 模型的分析,结合信息系统访问控制要求,提出了基于部门和角色的细粒度访问控制模型,把角色和部门相关联,权限可以直接分配到角色或用户,通过授权管理,把对象访问控制和数据访问控制灵活配置,实现了访问的精确控制。该改进方法已经经过实际项目的应用检验,可广泛应用于 MIS 的权限管理。

参考文献:

- [1] 杨亚平,李伟琴,刘怀宇. 基于角色的细粒度的访问控制系统的研究与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(2): 178-181.
- [2] 吴江栋,李伟华,安喜锋. 基于 RBAC 的细粒度访问控制方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(20): 52-54.
- [3] SNYDER L. Formal models of capability-based protection systems [J]. IEEE Transactions on Computers, 1981, 30(3): 172-181.
- [4] FERRAILOLO D, KUHN R. Role-based access control [C]// Proceedings of 15th National Computer Security Conference, Washington, DC: IEEE, 1992: 554-563.
- [5] OH S, PARK S. Task-Role-Based-Access-Control (TRBAC): An improved access control model for enterprise environment [C]// Database and Expert Systems Applications, LNCS 1873. Berlin: Springer, 2000: 264-273.
- [6] 陈娟娟,程西军,汪利虎. 基于角色的差异主体协同访问控制模型[J]. 计算机应用, 2009, 26(6): 109-110.
- [7] 李细雨,韩建民,于娟,等. 基于粒逻辑的扩展 RBAC 模型[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版, 2009, 32(3): 304-307.
- [8] 王伟然,张淘,范玉顺. 业务过程管理中基于组织和角色语义的访问控制[J]. 信息与控制, 2009, 38(3): 276-280.
- [9] SANDHU R, FERRAILOLO D, KUHN R. The NIST model for role based access control towards a unified standard [C] // Proceedings 5th ACM Workshop on Role Based Access Control. New York: ACM, 2000: 47-63.
- [10] RAVIS, EDWARD C. Role-based access control models [J]. IEEE Computer, 1996, 29(2): 38-47.
- [11] 潘德锋,徐少平,梁庆中,等. 基于操作的 MIS 多级授权模型的实现[J]. 计算机应用, 2003, 23(21): 100-103.
- [12] 倪冬英,张晓丽. 基于 RBAC 的用户权限管理的设计与实现[J]. 济南大学学报:自然科学版, 2010, 24(2): 167-171.

digital audio watermarking [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2005, 7(2): 212-221.

- [5] 林樵. 提升格式下的小波变换在图像处理中的算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [6] 陈金儿,王让定,王晓丽. 数字音频双重水印算法 [J]. 宁波大学学报, 2006, 19(1): 54-58.
- [7] 王让定,徐达文. 基于提升小波的多重数字音频水印 [J]. 电子与信息学报, 2006, 28(10): 1820-1826.
- [8] CLAYPOOLE R L, DAVIS G M, SWELDENS W, et al. Nonlinear wavelet transforms for image coding via lifting [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(12): 1449-1459.
- [9] 王向阳,杨红颖. 一种新的自适应量化数字音频水印算法 [J]. 声学技术, 2004, 23(2): 117-121.
- [10] 黄继武, SHI YUNQ, 程卫东. DCT 域图像水印: 嵌入对策和算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(4): 57-60.
- [11] COX I J, KILIAN J, LEIGHTON F T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.