

## 基于音频统计特性的数字水印 嵌入算法

王向阳<sup>1,2</sup> 牛盼盼<sup>1</sup>

**摘要** 结合数字音频时频域统计特性及同步码技术,提出了一种可有效抵抗去同步攻击的混合域数字音频水印嵌入算法.该算法首先结合数字水印与同步码(大小),对原始音频载体进行分段处理,并将每个音频数据段分割成两部分用于嵌入同步码与水印信息;然后利用时域音频样本统计特性,将同步码信息嵌入到音频样本的统计均值上;最后根据频率域小波系数统计特性,将数字水印嵌入到低频小波系数的平均值内.

**关键词** 音频水印,去同步攻击,统计特性,同步码  
**中图分类号** TP391

### A Content-based Digital Audio Watermarking Scheme

WANG Xiang-Yang<sup>1,2</sup> NIU Pan-Pan<sup>1</sup>

**Abstract** In this paper, a new robust digital audio watermarking algorithm against desynchronization attacks is proposed, in which the audio statistic characteristics and synchronization code are utilized. Firstly, the origin digital audio data are segmented and then each segment is cut into two sections. Secondly, with the spatial watermarking technique, synchronization code is embedded into the statistic average value of audio samples in the first section. Finally, the DWT is performed on the second section, and the digital watermark is embedded into the statistic average value of low frequency components.

**Key words** Audio watermarking, desynchronization attack, statistic characteristics, synchronization code

截止到目前,人们主要采用四种措施设计抵抗去同步攻击的鲁棒音频水印方案<sup>[1-3]</sup>.其中,穷举搜索方案具有计算量较大、虚警率较高等弱点<sup>[2]</sup>;大多数扩频水印扩频码相结合方案无法实现水印信息的盲检测<sup>[2-3]</sup>;利用原始音频重要特征方案具有特征点提取不稳定、所需阈值过多而不利于实际应用等不足.相比之下,同步码方案具有更为明显的技术优势.文献[4]选用具有良好自相关性的巴克码(Barker

code)作为同步标记,并在时域内将其嵌入到数字音频,同时将水印信息嵌入到数字音频的DCT系数上;文献[5]提出了一种基于小波变换的自同步音频水印算法,都是比较好的抵抗去同步攻击解决方案,但其普遍存在如下不足:1)未能结合原始音频时频域统计特性进行嵌入,影响了数字水印的隐藏效果,同时缺乏有关幅度缩放、变调、时间延展、抖动等去同步攻击的实验结果报道.2)未能结合听觉掩蔽特性确定水印嵌入深度,影响了数字水印的不可感知性与鲁棒性.

本文结合数字音频时频域统计特性<sup>[6]</sup>及同步码技术,提出了一种可抵抗去同步攻击的混合域数字音频水印嵌入算法,而且实验结果也证明了其有效性.

### 1 数字水印的嵌入

假设原始数字音频信号为  $A = \{a(i), 0 \leq i < Length\}$ , 其中,  $Length$  为音频数据的个数,  $a(i) \in \{0, 1, 2, \dots, (2^p - 1)\}$  是第  $i$  个音频数据的幅度值,  $p$  为表示每个数据所使用的比特数.假设二值水印图像为  $W = \{w(i, j), 0 \leq i < M, 0 \leq j < N\}$ , 其中,  $w(i, j) \in \{0, 1\}$  代表二值水印图像的第  $i$  行、第  $j$  列象素值.假设同步码为  $F = \{f(i), 0 \leq i < Lsyn\}$ , 其中,  $f(i) \in \{0, 1\}$ ,  $Lsyn$  为同步码的长度.则数字水印嵌入过程可描述如下.

#### 1.1 预处理

本文对二值水印图像分别进行置乱、降维处理、BPSK调制映射,以得到一维的  $\{-1, 1\}$  反相序列  $W_3$ .

$$W_3 = \{w_3(k), k = 0, 1, \dots, M \times N - 1, w_3(k) \in \{-1, 1\}\}$$

对原始数字音频信号进行分段处理,其中,第  $i$  个音频数据段可以表示为

$$A(i) = \{a(iL + k), 0 \leq k < L\} \left( 0 \leq i < \left\lfloor \frac{Length}{L} \right\rfloor \right)$$

这里,  $L = L_1 + L_2$ ,  $L_1 = Lsyn \times n$ ,  $n$  为常数(本文选取为 5).

设某个音频数据段为  $A^0$ (其长度为  $L_1$  和  $L_2$  的两部分为  $A_1^0$  和  $A_2^0$ ),则同步码与数字水印信息的嵌入过程如下.

#### 1.2 同步码嵌入

本文采用修改多个音频样本值( $n$ 个音频样本值)的方法,将同步信息嵌入到音频样本的统计均值中,以取得不可感知性与鲁棒性的良好平衡.具体步骤为:

1) 将  $A_1^0$  按同步码长度  $Lsyn$  分成  $Lsyn$  段,每一段  $PA_1^0(m)$  含有  $n$  个音频样本,即

$$PA_1^0(m) = \{pa_1^0(m)(i) = a_1^0(i + m \times n), 0 \leq i < n, 0 \leq m < Lsyn\}$$

2) 计算  $PA_1^0$  的平均值  $\overline{PA_1^0(m)}$ .

3) 采用量化方法嵌入同步码,即对每一段  $PA_1^0(m)$ ,修改其均值  $\overline{PA_1^0(m)}$ ,以嵌入一位同步码.修改策略为

$$pa_1^{0'}(m)(i) = pa_1^0(m)(i) + (\overline{PA_1^0(m)} - \overline{PA_1^0(m)})$$

其中,  $PA_1^0(m) = \{pa_1^0(m)(i), 0 \leq i < n\}$  为修改前的音频样本值,  $PA_1^{0'}(m) = \{pa_1^{0'}(m)(i), 0 \leq i < n\}$  为修改后的音频样本值,且有式(1)(见下页)成立,其中,  $\text{mod}(\cdot)$  为取模运算,  $S_1$  为量化步长.

收稿日期 2007-06-11 收修改稿日期 2007-07-16  
Received June 11, 2007; in revised form July 16, 2007  
国家自然科学基金(60773031),信息安全国家重点实验室(中国科学院软件研究所)开放基金(03-06),大连市科技基金(2006J23JH020),“图像处理与图像通信”江苏省重点实验室(南京邮电大学)开放基金(ZK205014)和江苏省计算机信息技术重点实验室(苏州大学)开放基金(KJS0602)资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (60773031), the Open Foundation of State Key Laboratory of Information Security of China (03-06), the Natural Science Foundation of Dalian City of China (2006J23JH020), the Open Foundation of Key Laboratory of Image Processing and Image Communication of Jiangsu Province (Nanjing University of Posts and Communications) (ZK205014) and the Open Foundation of Jiangsu Province Key Laboratory for Computer Information Processing Technology (Suzhou University) (KJS0602)  
1. 辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116029 2. 中国科学院软件研究所信息安全国家重点实验室 北京 100039  
1. School of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029 2. State Key Laboratory of Information Security, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.01001

1.3 水印信号嵌入

- 1) 将音频数据段后部分  $A_2^0$  划分成长度为  $L_2/M \times N$  的音频数据节  $A_2^0(k) (k = 0, 1, \dots, M \times N - 1)$ ;
- 2) 对音频数据节  $A_2^0(k)$  实施 DWT;
- 3) 计算音频数据节  $A_2^0(k)$  的小波域近似分量  $A_2^0(k)^H$  的小波系数平均值  $\overline{A_2^0(k)^H}$ ;
- 4) 本文结合人类听觉系统掩蔽效应, 将数字水印嵌入到音频数据节  $A_2^0(k)$  的小波域近似分量平均值内. 而水印信息位  $w_3(k)$  的嵌入方法为

$$a_2^{0'}(k)(t)^H = \begin{cases} a_2^0(k)(t)^H - \overline{A_2^0(k)^H} + \Delta, & \text{如果 } w_3(k) = 1 \\ a_2^0(k)(t)^H - \overline{A_2^0(k)^H} - \Delta, & \text{如果 } w_3(k) = -1 \end{cases}$$

$$(k = 0, 1, \dots, M \times N - 1; \quad 0 \leq t < L_2/(M \times N \times 2^H))$$

这里采用了自适应水印嵌入深度  $\Delta(k)(t) = \alpha \times a_2^0(k)(t)^H$  ( $\alpha$  为智能调节因子);

- 5) 逆 DWT, 以  $A_2^{0'}(k)^H$  代替  $A_2^0(k)(t)^H$  得到含有水印的音频数据节  $A_2^{0'}(k)$ .

1.4 循环嵌入

为抵抗剪切、平移等去同步攻击, 增强水印的鲁棒性, 重复步骤 1.2 ~ 1.3 对其他音频数据段嵌入同步码与水印信息.

2 数字水印的检测

本文讨论的抗去同步攻击数字音频水印算法属于盲水印算法, 检测过程如下:

- 1) 采用通讯中的帧同步码逐位比较方式, 查找同步码, 定位检测器的起始位置  $B$ ;

- 2) 将起始位置  $B$  后的含水印音频数据区划分成音频数据节  $A^*(k)$ , 并对其进行  $H$  级 DWT, 得到小波系数, 计算近似分量  $A^*(k)^H$  的小波系数平均值  $\overline{A^*(k)^H}$ ;

- 3) 提取水印信息, 提取公式为

$$w_3'(k) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } \overline{A^*(k)^H} > 0 \\ -1 & \text{如果 } \overline{A^*(k)^H} \leq 0 \end{cases} (k = 0, 1, \dots, M \times N - 1)$$

- 4) 对所提取出的一维序列  $W_3'$  进行解 BPSK 调制、升维处理、逆置乱解密, 即得到所提取的二值图像水印  $W^*$ .

3 仿真实验

为了验证本文数字音频水印算法的高效性, 以下分别给出了检测性能测试、抗攻击能力测试的实验结果, 并与文献 [4] 进行了对比. 实验中, 所选用的原始音频载体为采样频率 44.1 kHz, 分辨率为 16 bit, 长度分别为 9.75 s 的单声道数字音频信号. 数字水印采用了  $64 \times 64$  的二值图像, 并选用了码长为 16 位的巴克码 1111100110101110 作为同步信号, 小波变换采用了常见的 Daubechies-1 小波基, 小波变换级数选取为  $H = 3$ , 量化步长  $S_1 = 0.2$ , 智能调节因子  $\alpha = 0.05$ ,  $L_2 = M \times N \times 2^{H+1}$ .

表 1 和表 2 给出了不同数字水印嵌入方案的抗攻击能力对照结果 (包括数字水印的比特失真率 (Bit error rate, BER)、数字音频的峰值信噪比 (Peak signal to noise ratio, PSNR)).

表 1 数字水印对常规信号处理的抵抗能力

Table 1 The detection results for common signal processing

		未攻击	重新量化	重新采样 22 050 Hz	重新采样 11 025 Hz	重新采样 8 000 Hz	高斯噪声	低通滤波 4 KHz
文献 [4] 中算法	BER	0	0	0.49	0.49	0.48	0.01	0.49
	PSNR	48.28	44.49	30.38	27.47	27.23	41.60	42.16
本文算法	BER	0	0.04	0	0.01	0.02	0	0
	PSNR	35.39	35.46	29.28	26.93	26.73	35.02	34.89

表 2 数字水印对去同步攻击的抵抗能力

Table 2 The detection results for desynchronization attacks

		剪切前面 1 秒	剪切中间 1 秒	幅度 放大 150%	升调 1 度	降调 1 度	TSM (-1%)	抖动攻击 (1/10 000)
文献 [4] 中算法	BER	0	0	0.12	0	0	0.46	0.21
	PSNR	49.47	29.18	24.53	27.96	28.22	26.99	27.13
本文算法	BER	0	0	0	0	0	0	0.1
	PSNR	37.02	28.34	24.70	26.91	28.81	28.39	26.74

$$\overline{PA_1^{0'}}(m) = \begin{cases} IQ(\overline{PA_1^0(m)}) \times S_1 + \frac{S_1}{2}, & \text{如果 } Q(\overline{PA_1^0(m)}) = f(m) \\ IQ(\overline{PA_1^0(m)}) \times S_1 - \frac{S_1}{2}, & \text{如果 } Q(\overline{PA_1^0(m)}) \neq f(m) \end{cases} \quad (1)$$

$$IQ(\overline{PA_1^0(m)}) = \left\lfloor \frac{\overline{PA_1^0(m)}}{S_1} \right\rfloor, \quad Q(\overline{PA_1^0(m)}) = \text{mod}(IQ(\overline{PA_1^0(m)}), 2)$$

## 4 结论

抗去同步攻击的高度鲁棒数字音频水印算法研究是一项富有挑战性的工作, 本文提出了一种可有效抵抗去同步攻击的混合域数字音频水印嵌入算法. 仿真实验结果表明, 该算法不仅具有较好的不可感知性, 而且对常规信号处理和去同步攻击均具有较好的鲁棒性.

### References

- 1 Barni M, Cox I J, Kalker T. Digital watermarking. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Digital Watermarking. Siena, Italy: IWDW, 2005. 15–19
- 2 Li Wei, Yuan Yi-Qun, Li Xiao-Qiang, Xue Xiang-Yang, Lu Pei-Zhong. Over of digital audio watermarking. *Journal on Communications*, 2005, **26**(2): 100–111  
(李伟, 袁一群, 李晓强, 薛向阳, 陆佩忠. 数字音频水印技术综述. 通信学报, 2005, **26**(2): 100–111)
- 3 Sun Sheng-He, Lu Zhe-Ming, Niu Xia-Mu. *Digital Watermarking Technique*. Beijing: Science Press, 2004  
(孙圣和, 陆哲明, 牛夏牧. 数字水印技术及应用. 北京: 科学出版社, 2004)
- 4 Huang J W, Wang Y, Shi Y Q. A blind audio watermarking algorithm with self-synchronization. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Arizona, USA: IEEE, 2002. 627–630
- 5 Wu S Q, Huang J W, Huang D R, Shi Y Q. Efficiently self-synchronized audio watermarking for assured audio data transmission. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2005, **51**(1): 69–76
- 6 Li W, Xue X Y. An audio watermarking technique that is robust against random cropping. *Computer Music Journal*, 2003, **27**(4): 58–68

**王向阳** 辽宁师范大学计算机与信息技术学院教授. 主要研究方向为网络信息安全技术、多媒体信息处理技术. 本文通信作者.

E-mail: Wxy37@126.com

(**WANG Xiang-Yang** Professor in the School of Computer and Information Technology at Liaoning Normal University. His research interest covers information security and multimedia processing. Corresponding author of this paper.)

**牛盼盼** 辽宁师范大学计算机与信息技术学院硕士研究生. 主要研究方向为信息安全与数字水印. E-mail: niupanpan3333@163.com

(**NIU Pan-Pan** Master student in the School of Computer and Information Technology at Liaoning Normal University. Her research interest covers information security and digital watermarking.)