文章编号:1001 - 9081(2005)06 - 1274 - 03

基于自适应神经网络模糊系统的混沌音频水印盲检测

王炳和,管先念,吕 明
(武警工程学院 通信工程系,陕西 西安 710086)
(gxn_98@163.com)

摘 要:自适应神经网络模糊推理系统(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS)是将Sugeno一阶模糊系统以网络的形式来实现而得到的一种多输入单输出的神经网络。它能够很好的模拟出输入输出之间的关系,且收敛速度快,误差小,所需训练样本少,非常有利于水印信号的盲分离。利用ANFIS良好的自适应控制能力提出了一种具有较强鲁棒性的DCT域音频水印盲检测算法,实验证明,该水印检测算法准确性高,时间代价小,具有较强的抗攻击性,很有实用价值。

关键词:数字音频水印;自适应神经网络模糊推理系统;混沌;盲检测;鲁棒性
中图分类号: TP393.08 **文献标识码**:A

Blind detection of chaotic digital audio watermark in DCT domain based on ANFIS

WANG Bing-He, GUAN Xian-nian, LV Ming
(*Department of Communication Engineering, College of Armed Police Force, Xi'an Shaanxi* 710086, *China*)

Abstract: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System(ANFIS) is a neural network system with one input and several outputs, which is got through achieving one step sugeno fuzzy system by the format of network. It can simulate the connection of the in-out very well, and its constringency is very soon, error is very little and the necessary swatch is little, which are very favourable for blind separation of watermark signals. Based on the upstanding adaptive control ability of ANFIS, a strongly robust audio watermarking algorithm in DCT domain was given in this paper. Experiments show that the performance in watermark detection is high, the time expense is litlle, the resisting to attacks is strong and the imperceptibility is good.

Key words: digital audio watermarking; ANFIS; chaotic; blind detection; robustness

0 引言

近年来,随着网络和信息技术的发展,各种音频产品的编辑、复制和传播显著的提高了信息传播的效率和准确度。但是有人未经作者的同意也可以通过网络对原作品任意复制、修改、再传输,这就给版权所有者带来巨大的损失。因此如何实施网络环境下的版权保护和信息安全,就成为迫在眉睫的课题。密码学是保护数字产品的常见方法,但密码只能保护传输中的内容,被破解的音频副本可以被任意盗版和传播,因此,不能有效判定用户的合法性,必须结合新的技术对解密后的产品进行全程跟踪。数字水印技术解决了这个问题。水印最初的开发目的是解决版权保护问题,然而在实际的研究中,其应用领域远远超出了版权保护[1],包括:

1) 所有者鉴别。嵌入代表所有者身份的水印,防止作品的整体或部分被非法使用;

2) 操作跟踪。水印中记录使用者的身份,如果作品被滥用,可以通过水印查证该由谁负责;

3) 内容认证。用水印判定内容的是否被篡改;

4) 拷贝控制。使用水印来告知设备不能录制该内容。

音频水印算法可分为空域和变换域两大类[2]。与空域算法相比,变换域音频水印鲁棒性较高,具有较好的不可感知性,隐藏信息量大,目前主要集中在DCT域、小波域。基于小波变换的水印技术虽然发展较快,但很多实际问题尚待解决,其中盲水印问题最引人关注。盲水印算法,就是在水印检测过程中不需要原始数据。但是目前大部分基于DWT的水印算法在检测水印时,都需要将加入水印后的数据与原始数据进行比较以提取水印。这样水印的检测常常具有很好的鲁棒性。但是在某些如数据检测和跟踪的场合,无法得到原始数据,对另外一些应用,如水印在网络和数字图书馆上的自动验证以及动态水印,因为信号的数据量太大,使用原始数据是不现实的。所以,有必要设计不需要原始数据的水印盲检测算法。为了保证盲检测结果的准确,盲水印算法对嵌入数据的强度、数据量和鲁棒性提出了很高的要求,从而加大了水印算法抵抗如裁剪、压缩、延迟等攻击的难度。许多算法嵌入和检测时计算极复杂,计算量很大,在一些简单的攻击下就难以生存。为此,必须寻求新的盲检测算法。

1 数字音频水印的产生和嵌入

水印嵌入的具体过程如图1(a)所示。假设具有N个采样点的原始数字音频信号为$x(n)$,$n \in [1,N]$,水印$w(i)$长度M,$i \in [1,M]$,$w(i) \in [-1,1]$。选择在DCT域嵌入数字水印。图像、视频压缩标准JPEG、MPEG和H.261等都采用了DCT技术。在DCT域加入水印有利于抗压缩攻击。

收稿日期:2004 - 11 - 25;**修订日期**:2005 - 03 - 04 **基金项目**:武警部队重点科研项目;陕西省自然科学基金资助项目(2001X28)
作者简介:王炳和(1964 -),男,陕西岐山人,博士,教授,主要研究方向:信号处理和系统建模; 管先念(1980 -),男,湖北随州人,硕士研究生,主要研究方向:信号处理与数字音频水印.

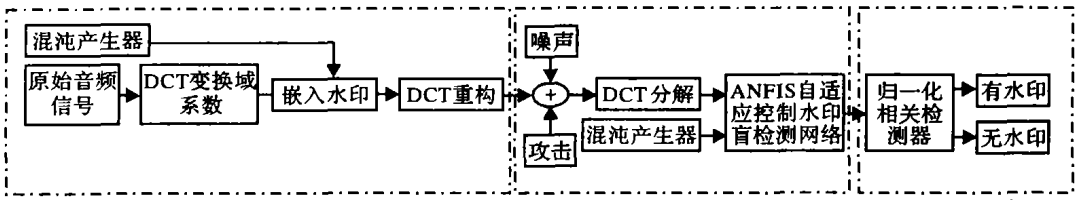


图 1　基于自适应神经模糊推理系统的 DCT 域盲检测水印算法原理图

具体步骤如下:

1) 对原始音频信号 $x(n)$ 进行 DCT 变换,得到 DCT 变换系数 C。

2) 选择水印的嵌入点。本算法中将水印嵌入在 C 中 M 个幅值较大的系数上。将 C 按幅度大小排序,挑选出幅度较大的 M 个系数 $c_x(m)$。低频成分含有信号的大部分信息,在其中嵌入水印有利于提高算法的鲁棒性。另外,根据声学掩蔽效应,人耳对强信号之中的弱信号是不敏感的,所以本嵌入算法也具有较好的不可感知性。

3) 水印的产生。有序列发生器生成长为 M 的混沌序列 $x_1(m)$ 和 $x'_1(m)$。则所需的水印信号 W 为:

$$w(m) = 0.5 \times (x_1(m) + x'_1(m)), m \in [1, M]$$

4) 由公式 $c'_x(m) = c_x(m)(1 + \alpha w(m))$ 将水印嵌入到挑选出来的小波系数 $c_x(m)$ 中。式中 α 为可调尺度参数,用来平衡鲁棒性和掩蔽性。α 增加则鲁棒性增强,掩蔽性变弱。反之,则鲁棒性变弱,掩蔽性增强。

5) 对加入水印后的 DCT 系数进行 DCT 重构,得到加入水印后的音频信号 $x'(n)$。

2　ANFIS 水印提取模型的建立

考虑到对音频信号中是否含有水印的判断具有模糊性,可以运用模糊推理系统。模糊推理系统的结构非常适合于表示人的定性或模糊的经验和知识,通常采用 if - then 的模糊条件句来表示。但模糊推理系统的设计相当依靠操作人员的经验和知识,本身不具备学习功能,如果缺乏这样的经验和知识,很难期望它能获得满意的效果。对于这个的问题,自适应是一种解决方法。但是自适应的方法涉及到许多专业的高深理论,而且实用性比较窄,最终模糊自适应系统的设计都是比较困难的。神经网络可以通过其学习功能实现自适应,在模型特征的分析和建模中,它能够利用其自适应的学习功能映射输入输出之间的关系。但人工神经网络又不能表达模糊语言,实际上类似一个黑箱,不能很好的表达人脑的推理功能。ANFIS 将二者有机的结合起来,用神经网络的学习机织补偿模糊控制系统的缺点[4]。其模型分为五层,是将 Sugeno 一阶模糊系统以网络的形式来实现而得到的一种多输入单输出的神经网络,网络中同层的节点具有相同类型的输出函数,如图 2 所示。

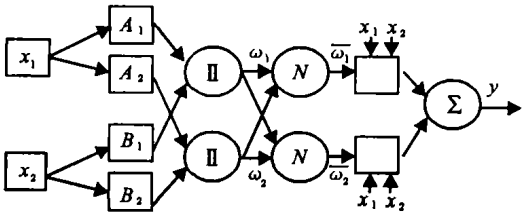


图 2　ANFIS 模型

第一层:该层每个节点 i 是以节点函数表示的方形节点(该层参数是可变的)。

$$o_{1,i} = \mu_{Ai}(x_1), i = 1,2;$$

$$o_{1,i} = \mu_{B(i-2)}(x_2), i = 3,4$$

其中,x_1, x_2 为节点 i 的输入,A_i, B_i 是与该点函数值相关的变量。或者说 $o_{1,i}$(第一层第 i 节点输出)是模糊集 $A(A = A_i, B_i)$ 的隶属度函数。

第二层:该层的节点在图 2 中用 Π 表示,将输入信号相乘,而将其乘积输出为:

$$o_{2,i} = \omega_i = \mu_{Ai}(x_1)\mu_{Bi}(x_2), i = 1,2$$

第三层:该层的节点在图 2 中用 N 表示,第 i 个节点计算第 i 条规则的 ω_i 与全部规则的 ω 值之和得比值为:

$$o_{3,i} = \bar{\omega}_i f_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, i = 1,2$$

第四层:该层每个节点 i 为自适应节点,其输出为:

$$o_{4,i} = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i), i = 1,2$$

第五层:该层的单节点是一个固定节点,计算所有输入信号的总输出为:

$$o_{5,i} = \sum_i \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i}$$

网络的训练和学习中采用的是最小二乘和梯度下降结合的算法来训练 FIS 系统的隶属度函数参数。训练中步长的调整采取如下策略:当误差连续 4 次减小时则增加步长;当误差连续两次出现振荡,则减小步长。通过学习,能有效的计算出隶属度函数的最佳参数,使得设计出来的 Sugeno 型 ANFIS 能够最好的模拟出输入输出之间的关系,且收敛速度快,误差小,所需训练样本少。

自适应神经网络模糊系统的基本思想非常简单,它为模糊建模的过程提供了一种能从数据集中提取相应信息的一种学习方法,它主要用于以下情况:

1) 已经获得大量希望用于建模或希望模型能够跟随的输入输出数据对;

2) 不一定需要或不能预先得到所研究系统的基本变量特征的结构模型。

ANFIS 这种自适应的学习和控制输出的能力非常有利于水印信号的盲分离提取,具体过程如图 1(b)所示。ANFIS 的输入为接收端所获得的加入水印后的音频信号的 DCT 变换系数和按照密钥产生的混沌序列。通过网络的训练和逼近后,输出端所要获得的是音频信号受到攻击后保留的水印成分。

为了便于比较提取水印与原始水印的相似性,通常计算原始水印和提取水印的归一化相关系数 NC 作为评价水印有无的标准,其定义为:

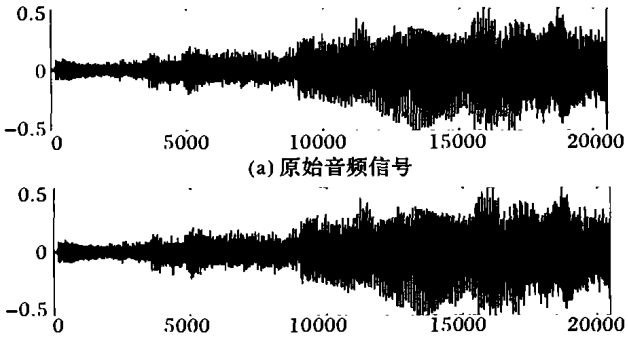
$$NC(w,z) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} z(i)w(i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} z^2(i)}\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} w^2(i)}}$$

其中 $z(i)$ 为 ANFIS 提取的可能受过攻击的水印，$w(i) = x_1(i) + x'_1(i)$，检测时先设定判决门限 τ，若求出的归一化互相关大于 τ，则水印存在；反之，没有水印。

3 实验结果和性能测试

采用采样频率为 22.5kHz，长度 $N = 20480$ 的 16 位数字音频信号作为原始信号。如图 3(a) 所示。水印加入时 α 取 0.005，$M = N/4$，加入后的信号如图3(b) 所示。由图看出嵌入前后的音频信号很难从视觉上区别出来，嵌入算法具有很好的听觉掩蔽性。

水印的提取时在 ANFIS 的输入端输入三个信号：加入水印后可能受到过各种有意或无意攻击的音频信号的 DCT 变换系数、接收端根据发射端提供的参数产生的混沌序列 $x_1(m)$ 和 $x'_1(m)$。希望网络的输出为近似的水印信号。网络的训练和学习采用高斯型隶属度函数，初始步长为 0.01，当隶属度函数个数为 5，训练次数为 50 时，归一化相关检测器输出便取得了很好的效果。为了防止音频信号和混沌信号固有的相关性，算法中设定 $\tau = 0.4$，当相关检测峰值高于 0.4 时，判断有水印。

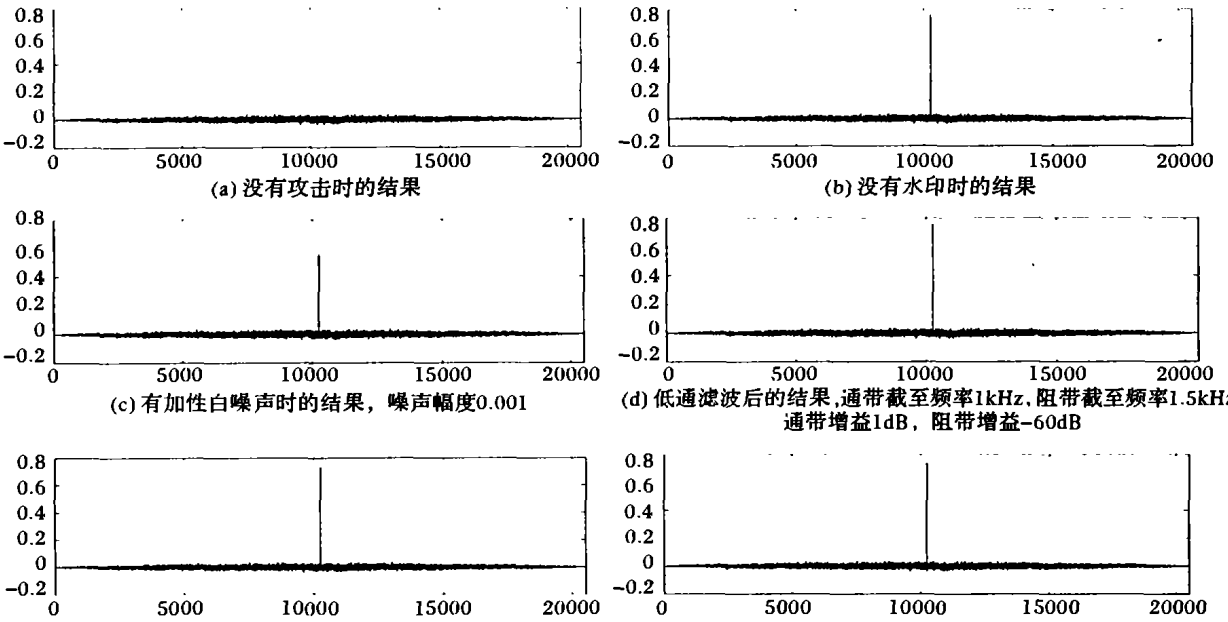


(a) 原始音频信号

(b) 加入水印后的音频信号

图3 音频信号

数字音频信号在传输中可能受到各种有意或无意的攻击，为了检测算法的鲁棒性，需要对嵌入水印后的音频信号做各种攻击处理。图 4 给出了几种情况下的处理结果。



(a) 没有攻击时的结果

(b) 没有水印时的结果

(c) 有加性白噪声时的结果，噪声幅度0.001

(d) 低通滤波后的结果，通带截至频率1kHz，阻带截至频率1.5kHz，通带增益1dB，阻带增益-60dB

(e) MPEG第三层压缩后的结果，压缩比4:1

(f) 重采样后的结果，先进行2kHz的采样，再进行8kHz的插值恢复

图4 检测结果

综合图 4 可以看出，攻击后依然能很准确的检测出结果。所以，基于 ANFIS 的水印检测算法在对抗滤波、重采样、压缩和噪声时有很好的鲁棒性。

4 结语

本算法利用 ANFIS 的自适应控制功能实现了一种新的 DCT 域盲检测音频水印算法。实验证明，该算法具有很好的自适应能力。由于采用了检测能力很强的 ANFIS 网络，相当于提高了水印抗攻击的容限，从而提高了水印的鲁棒性能。

参考文献：

[1] COX IJ. MILLER ML. Jeffrey A. Bloom. Digital Watermarking[M]. 北京：电子工业技术出版社，2003.

[2] COX IJ, KILIAN J, LERGHTON T, *et al.* Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE trans. on: image processing, 1997, 6(12): 1673 - 1687.

[3] SWANSON M, ZHU B, TEWFIK A. Current state of the art, challenges and future directions for audio watermarking[J]. IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, 1999, 1: 19 - 24.

[4] 吴晓莉，林哲辉. MATLAB 辅助模糊系统设计[M]. 西安：电子科技大学出版社，2003.

[5] 胡金艳，张太镒，陆从德，等. 一种基于神经网络的小波域音频水印算法[J]，西安交通大学学报，2003，4(37)：355 - 358.

[6] WU C-P, SU P, JAY KUO C C. Robust audio watermarking for copy right protection[A]. proceedings of SpIE-The International Society for Optical Engineering[C]. Denver, USA, 1999.

[7] PAQUET AH, WARD RK. Wavelet-based Digital Watermarking for image authentication[A]. Proceeding of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering[C], 2002. 879 - 884.