

窄带的自同步音频水印算法

雷 赞¹⁾ 刘 建¹⁾ 严 波²⁾ 颜永红¹⁾

¹⁾(中国科学院声学研究所中科信利语音实验室 北京 100190)

²⁾(国家广播电影电视总局无线电台管理局信息化工作组 北京 100045)

摘 要 提出了一种适应于短波窄带信道的自同步音频水印算法. 该算法具有如下优点: (1) 在隐藏水印信息的同时, 嵌入同步信号, 使得水印具有时钟自同步和数据自同步的能力. (2) 水印信号基于窄带信道的传输, 适用于短波广播. (3) 水印信号能够抗拒短波传输中的各种干扰. 实验表明: 该算法能够实际地应用于短波节目的水印嵌入, 对于短波传输中的各种干扰都有较好的鲁棒性.

关键词 数字水印; 音频水印; 自同步; 短波; 窄带

中图法分类号 TP391

Narrowband-Based Audio Watermarking with Self-Synchronization

LEI Yun¹⁾ LIU Jian¹⁾ YAN Bo²⁾ YAN Yong-Hong¹⁾

¹⁾(ThinkIT Speech Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

²⁾(Administrative Bureau of Radio Station, The State Administration of Radio Film and TV, Beijing 100045)

Abstract This article presents a novel self-synchronizing audio watermark algorithm for short-wave narrow band channel. This algorithm has the following merits: (1) While the watermark information being hideaway, synchronized signal is inserted, which enables the watermark to have the clock self-synchronizing and the data self-synchronizing abilities. (2) The watermark can be transmitted through narrow band channel, which is suitable for the shortwave broadcasting. (3) The watermark signal can resist disturbances during shortwave transmission. The experiments indicate that, this algorithm can be applied to watermark insertion for shortwave program, and it shows satisfactory robustness for real-world application.

Keywords digital watermark; audio watermark; self-synchronizing; shortwave; narrowband

1 引 言

数字水印是近年来多媒体信息处理的研究热点, 对于音频水印的研究有其自身的特点. 声音信号带宽较窄, 在传输上比图像和视频信号更为便利, 形式也更为多样. 像电话、音频广播以及视频伴音等都是日常生活中所常见的, 其覆盖面非常广泛.

音频水印研究至今已产生了多种方法, 主要可以分为两类: 时域算法^[1-2]和变换域算法^[1,3-5]. 之前算法研究的对象大都是宽带音频信号, 一般采样率都为 32kHz 或者 44.1kHz. 对于数据同步和帧同步的研究也缺少鲁棒且有效的方法.

本文提出了一种应用于窄带音频(短波广播)的音频水印自同步盲检测算法, 实现了基于短波广播的台站鉴别系统. 该算法利用同步信号定位音频帧

收稿日期: 2005-04-21; 最终修改稿收到日期: 2007-11-09. 雷 赞, 男, 1982 年生, 硕士, 主要研究方向为数字音频水印. 刘 建, 男, 1971 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为嵌入式语音识别与合成、口语语言学习算法、数字音频水印技术等. E-mail: liujian@hcl.ia.ac.cn. 严 波, 男, 1976 年生, 工程师, 主要研究方向为信息处理和分析算法在发射信道中的影响. 颜永红, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为大词表非特定人连续语音识别、语音信号前端处理、多媒体数据检索、音频水印、多模口语系统、嵌入式系统、系统自适应和快速搜索算法.

的位置和数据起始,应用双向调制技术^[6]、RS 纠错码技术^[7]、冗余嵌入^[8]、数据重组^[8]和可信度量等技术增强水印信号的鲁棒性. 对于同步信号的嵌入方法,一般分为在小波域上嵌入同步信号^[9-10]或者通过分析音频信号的内容来同步^[10]. 在本文中我们把同步信号完全嵌入到频域中,讨论了两种方案并分别进行了实验,实验结果表明该算法对于短波信道具有较好的性能.

本文第 2 节首先介绍所提算法的思路和原理;第 3 节描述水印的嵌入和检测算法;第 4 节描述水印同步的嵌入和检测原理;第 5 节描述冗余嵌入、数据重组和可信度度量的方法;第 6 节是实验数据和结果;最后给出实验结论和总结.

2 算法原理

本文研究的信号主要是短波音频广播信号,其特点^[11]是带宽较窄,通常只有 4kHz,又由于是天波传输,所以干扰相对较大,并同时伴有干涉衰落、多普勒频移、多径效应和同频临频干扰等问题. 嵌入水印的目的是通过在音频信号中嵌入包含广播节目来源(如发射台和发射天线等)的信息,来鉴别接收到的音频的来源,从而对节目的播出质量进行检测. 因此该系统对于水印信号的鲁棒性要求较高,但是对于嵌入水印的信息量要求不大. 因此本文使用扩频的方法把同步信号和水印信号依次嵌入音频信号的 FFT 的低频系数中,通过对同步信号的解码来定位水印信号嵌入的帧位置和数据起始位置. 为了增强系统的鲁棒性,我们还使用了平衡 GOLD 码^[12]、双向调制编码和 RS 纠错技术,并且提高了掩蔽模型^[13]曲线子带的划分精度.

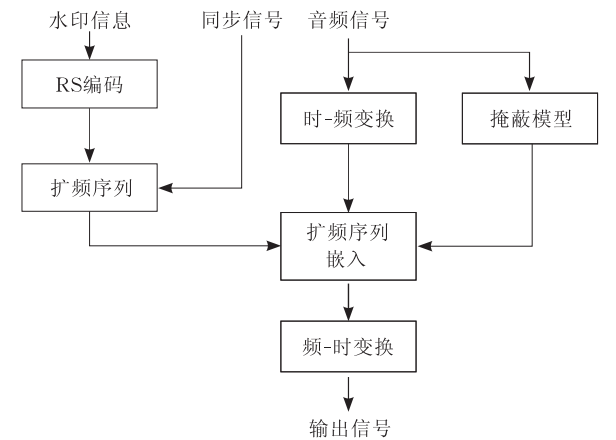


图 1 水印嵌入算法框图

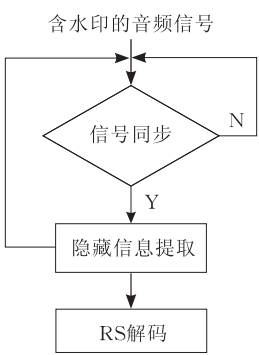


图 2 水印提取算法框图

3 水印编码解码算法

本文使用双向调制扩频序列的方法嵌入水印^[6],将一个比特的信息 B 隐藏在连续的八帧信号中. 首先对输入的音频信号加汉宁(Hanning)窗分帧,然后做 FFT 变换,滑动步长为帧长的 $1/4$,得到原始载体音频的频谱 $X(n)$,再根据式(1)嵌入水印信息

$$Y(n) = X(n) \cdot 10^{\alpha w_j(n)S} \tag{1}$$

其中 S 代表双向码基带信号. 其中,当隐藏信息 B 为 1 时,令 S 在前 4 帧中等于 1,而在后 4 帧中等于 -1 ;若隐藏信息 B 为 0 时,则 S 的取值顺序相反. 双向码没有直流分量,低频段的能量较小,而载体相关噪声的能量集中在低频段,所以当用相关器进行信息提取时,会在很大程度上减小载体相关噪声,信噪比会明显提高.

修正项指数参数中的另一个参数 α 用于限制基带信号的幅度,保证信号不失真. α 通过掩蔽模型计算得到. 由于短波广播是窄带信号,所以使用人耳心理模型 $2^{[13]}$ (HAS),同时为了提高嵌入水印的强度,我们把掩蔽模型输出的掩蔽曲线的频带精细度由原来的 32 个子带增大到 512 个子带. 这是因为在生成掩蔽曲线的时候,每个子带的输出都是该子带中的最小值,如果使用 32 个子带,则嵌入的强度很小,对于噪声的抵抗能力较差. 为了提高嵌入的强度以便增加系统的鲁棒性,我们提高输出子带的精细度,由原来的 32 个子带增大到 512 个子带,这样既提高了水印的嵌入强度同时又不会使嵌入强度超过掩蔽曲线而使人耳察觉. 生成的 $Y(n)$ 再经过 IFFT 反变换和汉宁窗恢复成时域信号,最后输出.

$w_j(n)$ 为扩频码序列,这里我们使用的是平衡 GOLD 码,其特点是自相关性能好,能够有效地降低错误率.

水印的提取是通过对接收信号的频谱进行相关

检测的. 在同步的条件下, 将收到的信号的第 k 帧变换到频域, 再用扩频序列 $w_j(n)$ 与该帧信号的频谱 Y^k 做相关处理, 得到相关结果 C^k , 如式(2)所示:

$$\begin{aligned} C^k &= \sum_n w_j(n) \cdot \log_{10}(Y^k(n)) \\ &= \sum_n w_j(n) \cdot (\log_{10} X^k(n) + \alpha w_j(n) S^k) \\ &= \alpha \cdot S^k \sum_n w_j^2(n) + \sum_n w_j(n) \cdot \log_{10} X^k(n) \quad (2) \end{aligned}$$

由于 $w_j(n)$ 是 PN 序列, $X^k(n)$ 是原始音频信号, 理论上两者不相关, 所以式(2)的第二部分期望为 0, 而第一部分是 $w_j(n)$ 的自相关, 根据 PN 序列的特性其绝对值应该较大, 正负取决于 S^k 的取值.

根据上面的算法分别计算第 k 帧到第 $k+7$ 帧的相关结果, 然后根据式(3)确定水印比特信息.

$$I = \sum_{k=0}^{N/2-1} C^k - \sum_{k=N/2}^{N-1} C^k \quad (3)$$

当 $I > 0$ 时, 接收比特信息 B' 为 1; 当 $I < 0$ 时, 接收比特信息 B' 为 0.

4 同步信号嵌入和检测原理

由于短波广播信道很窄, 所以使用扩频的方法就很难再单独留出带宽用来同步, 但是如果正确地检测出嵌入水印的信息, 首先必须完成两个方面的同步问题: 帧同步和数据同步. 首先, 因为对于音频信号的处理都是分帧的, 在嵌入水印信息的时候也是按照帧为单位嵌入, 所以在解码时首先必须确定每帧的位置才能进行之后的时频变化和相关等计

算. 其次, 在确定了帧的位置后, 数据的同步也是通信系统中必需的, 用来确定数据的起始位置. 在我们的系统中, 因为主要考虑到水印及同步信号的鲁棒性, 而扩频的方法的鲁棒性较好, 所以我们将同步信号也嵌入到频域中, 以确保其较好的鲁棒性.

考虑到带宽的限制, 在实验中我们设计了两种同步的方法, 并分别做了实验.

第 1 种方案中, 我们使用 2~3 个比特信息作为同步标志, 嵌入方法和水印信息的嵌入方法相同, 但是使用和水印信息不同的 PN 序列, 如图 3 所示.

同步所使用的 PN 序列和水印信息所使用的 PN 序列不一样, 同步的 PN 序列是从一组平衡 GOLD 码序列中选择一个, 该组码序列构成一个 PN 序列码本. 在解码的时候, 我们使用通信中滑动相关的方法, 首先用已知的同步 PN 序列按照提取水印信息的方法滑动提取同步头, 当解码得到连续 2 个比特“1”时, 再用整个码本中所有的扩频序列分别去做相关处理, 求出相应 I_i , 然后按照式(4)得到相关最大的码序列:

$$t = \arg[\max_i(|I_i|)] \quad (4)$$

如果得到的码序列 t 就是同步所使用的 PN 序列, 则做进一步的精细搜索: 使用同步的 PN 序列在该位置周围滑动提取相关值, 得到相关值最大的位置被确定为同步信号的嵌入位置. 在确认了同步信号的嵌入位置后, 也就相当于完成了帧同步和数据同步, 根据同步信号的位置得到水印信息的嵌入位置, 然后按照第 3 节中的方法进行解码.

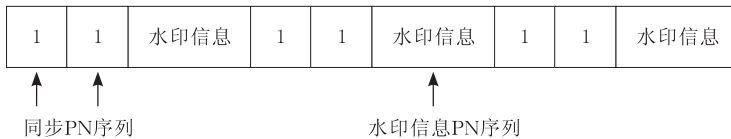


图 3 同步码嵌入方案 1

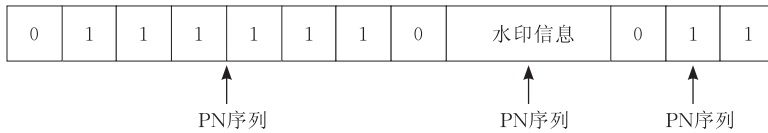


图 4 同步码嵌入方案 2(图中扩频序列 PN 为相同的扩频序列)

对于该方法误同步率的理论分析: 假设信号中没有嵌入任何的水印信息, 且近似为平稳的白噪声信号, 码表的大小为 127, 则误同步率为

$$1/2 \cdot 1/2 \cdot 1/127 \cdot 1/127 = 1/64516 \quad (5)$$

通过后面的实验验证, 该误同步率满足实际的使用要求.

第 2 种方案中, 我们使用一个字节的同步头

“7E”, 即“01111110”. 这里同步信息和水印信息使用相同的扩频码序列, 在嵌入水印信息的时候当碰到连续 5 个“1”时在其后添一个 0. 解码的时候同样使用滑动相关的方法, 为了增加相关阈值的差别以便提高同步准确率. 通过式(6)可计算同步头相关值,

$$I_{\Sigma} = \sum_{k=0}^7 |I_k| \quad (6)$$

根据对准确率和同步率的要求, 设定一个阈值 I_0 , 当解码解得信息序列 7E, 且 $I_{\Sigma} > I_0$ 时认为完成了同步, 之后按照方案 1 的方法进行水印信息的提取. 在提取水印信息过程中, 同样, 当碰到连续 5 个“1”的时候去掉其后的一个 0.

对于方案 1, 同步头长度较短, 能够传输更多的有效信息量; 但是解码速度较低, 且抗干扰能力较差. 而对于方案 2, 解码计算量较低, 同步性能较好, 在有较强干扰的情况下依然能较好工作; 但是需要根据条件和环境确定阈值的大小.

由于滑动相关逐位搜索计算量较大, 为了降低计算量, 我们参照 Kirovski 对音频水印去同步攻击的分析^[8], 对于嵌入算法的时域平移特性进行分析. 假设音频处理的帧长为 X , 则滑动步长为 $X/4$, 8 个音频帧中完整嵌入一个比特的数据, 嵌入图像如图 5(a) 所示. 可以看到, 一个比特的信息嵌入在 $2X$ 长度的音频信号中, 如果原始信号发生偏移, 但还希望能保持正确的解码, 即在原来嵌入“1”的位置解码结果依然为 $I > 0$, 则理想情况下该算法最多可以抵抗小于 $X/2$ 的时间尺度上的偏移, 如图 5(b) 所示.

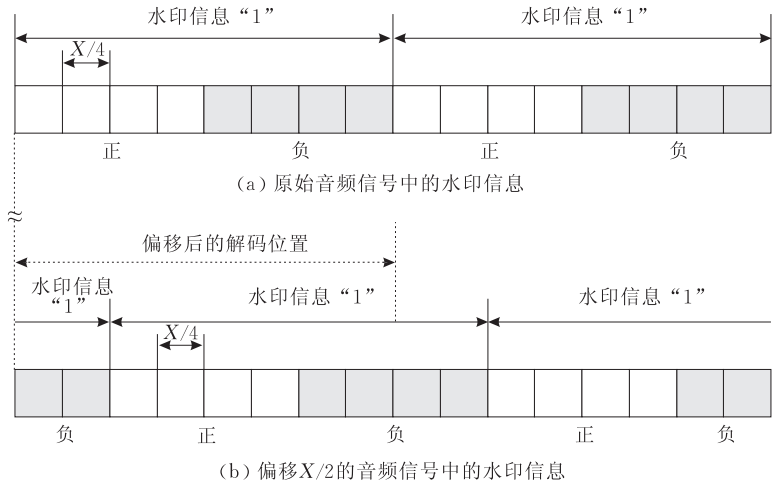


图 5 算法对于时间偏移的鲁棒性能

只要音频信号的偏移小于这个范围, 则不会产生解码错误, 仅仅是其相关值 I 的幅度发生了变化. 因此说明使用的嵌入水印的算法对于同步并不敏感, 只要使得滑动步长小于 $X/2$, 则依然会保持正确的解码. 在实用中, 考虑到音频信号处理间的相互重叠和信号的时变、计算量和相关值的幅度等因素, 我们使用 $X/20$ 或 $X/16$ 为步长进行滑动相关即可得到较满意的同步效果, 在后面的实验数据中我们使用 $X/20$ 为步长滑动相关.

对于其它方面的偏移, 如时间尺度上的拉伸、频域上的偏移和拉伸^[8]在短波通信中都不明显, 例如频率上的偏移, 通常的多普勒频偏仅仅有 $1 \sim 2\text{Hz}$, 对于解码的影响不大.

5 冗余嵌入和数据重组

为了能够适应短波传输中的一些特别恶劣的情况(例如同频干扰, 即两个或多个发射台使用相同频率发射不同的节目内容), 系统依然能够从接收到的混杂的节目信号中提取出各自不同的水印信息, 我们使用了包括冗余嵌入、数据重组和数据可信度度

量的方法.

(1) 冗余嵌入

为了进一步提高水印信息的鲁棒性, 使其在同频的环境下依然能够得到满意的效果, 我们对水印数据进行冗余嵌入, 具体的嵌入方法如下: 对于一组水印信息我们使用 3 个扩频序列(相同或不相同)进行调制, 假设 3 个扩频序列分别为

$$\begin{aligned}\tilde{w}_0 &= [w_{00}, w_{01}, \dots, w_{0n}], \\ \tilde{w}_1 &= [w_{10}, w_{11}, \dots, w_{1n}], \\ \tilde{w}_2 &= [w_{20}, w_{21}, \dots, w_{2n}]\end{aligned}\tag{7}$$

其中 n 为扩频序列的长度. 由这 3 个扩频序列交错合成一个长度为 $3n$ 的新的扩频序列 \tilde{w} ,

$$\tilde{w} = [w_{00}, w_{10}, w_{20}, w_{01}, w_{11}, w_{21}, \dots, w_{0n}, w_{1n}, w_{2n}]\tag{8}$$

使用该扩频序列进行调制, 按照第 3 节提到的嵌入方法把水印信息嵌入到音频载体中. 在解码的时候使用每个扩频序列与相应的音频信号中该扩频序列嵌入位置的数据做相关处理. 假设含水印的音频信号为

$$\tilde{y} = [y_{00}, y_{10}, y_{20}, y_{01}, y_{11}, y_{21}, \dots, y_{0n}, y_{1n}, y_{2n}]\tag{9}$$

则可以得到 3 个相关值 C_0, C_1, C_2 , 分别为

$$C_k = \sum_n \tau_{kn} \cdot \log_{10} y_{kn}$$

(10)

其中 $k=0,1,2$. 然后根据第 3 节的方法求出相应的 I_k , 根据得到的 I_k 按照式(11)求出最终的 I , 从而判定出水印的信息.

$$I = \sum_k I_k$$

(11)

(2) 数据重组

考虑到短波信道的衰落具有时变性, 忽大忽小, 对于水印数据的影响随着时间的不同变化很大. 假设某一时段信道对音频信号产生了一个很大的影响, 则即使根据上面的冗余嵌入方法, 完全可能三个相关值都受到影响, 导致最终的解码结果错误. 为了避免这样的现象, 我们把水印信息进行数学上的重新排列, 得到三组不同的水印信息序列, 然后再用 3 个扩频序列进行调制. 假设原始的水印信息为

$$m = [m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, \cdots]$$

(12)

则重组后的 3 组序列可以分别为

$$\begin{aligned} m^0 &= [m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, \cdots] \\ m^1 &= [m_2, m_3, m_4, m_5, \cdots, m_0, m_1] \\ m^2 &= [m_4, m_5, \cdots, m_0, m_1, m_2, m_3] \end{aligned}$$

(13)

把式(13)中的 3 组水印信息序列按照冗余嵌入的方法使用 3 个扩频序列分别嵌入音频载体中. 在解码端先使用 3 个扩频序列解调得到对应的相关值, 然后按照已知的排列规则恢复出 3 组水印序列, 再根据冗余嵌入中的判定水印方法求出 I , 从而确定水印的信息. 这样的方法的好处在于即使水印序列在某时刻被严重干扰, 冗余嵌入的 3 组信息都被干扰, 产生错误, 只要其它位置的信息不被干扰, 最终依然能够得到正确的水印信息.

(3) 数据可信度量

对于解码得到的水印数据, 其可信程度是我们关心的一个主要问题. 为了确认可信度较高的水印信息, 同时丢弃可信度较低的水印信息, 我们基于冗余嵌入设计了简单的可信度量.

假设水印信息在传输过程中没有受到任何的干扰, 则从 3 组水印中解码得到的 I_k 应该具有相同的符号, 即使用 3 组扩频序列解码并重新排列恢复后得到的水印数据应该完全相同. 随着干扰的不断增多, 3 组水印数据中的不全部相同的位数开始增加, 因此 3 组水印数据中不全部相同的位数可以在一定程度上反映出水印信号的被干扰情况. 我们根据 3 组水印数据中全部相同的个数来衡量该数据的可信度, 全部相同的数据个数越多则水印信息的可信度越大, 反之亦然. 根据可信度的大小, 设定一定的门限, 可以排除一些可信度较低的解码信息, 从而进一

步地提高水印信息提取的准确率; 但是可信度门限也不宜设置过高, 因为可信度设置过高可能导致信息的检出率下降很多, 从而得不偿失.

6 实验结果和结论分析

(1) 模拟实验

在实验室里我们对含水印的音频信号做了一次 ADDA 转换, 验证测试算法的可行性, 数据如表 1、表 2. 其中, 同步率定义为被提取的同步头与总嵌入的同步头的比值.

表 1 同步方案 1 模拟测试

扩频码长度/bit	同步位数 bit	解码准确率/%	同步率/%
127	2	99.92	58.80
511	2	99.89	54.22

表 2 同步方案 2 模拟测试

扩频码长度/bit	同步码值	阈值	解码准确率/%	同步率/%
127	7E	1	99.98	99.40
511	7E	0.35	99.93	99.42

(2) 近场实验结果和分析

把嵌入水印的数据通过短波发射机发射, 在发射台附近接收, 实验地点为无线局某短波发射台, 接收设备是 NRD-545 接收机和自台检测天线, 使用频率分别为 11970Hz 和 17880Hz. 使用 127 位长度和 511 位长度的 GOLD 码作为扩频序列. 由于多种客观因素的影响(如天气、发射机状态等), 实验的条件具有不可重复性, 因此我们在列出测试数据的同时给出相应的波形文件以作参照.

对于同步方案 1, 使用 2bit 和 3bit 进行测试. 为了分别测试解码准确率和同步能力, 我们对水印信息的长度进行了调整, 以便在有限的时间内得到足够的数据. 由于短波发射对多方面环境的影响都很敏感, 所以我们进行了多组测试, 以确认算法的有效性. 同时验证了嵌入内容对水印解码准确率的影响. 对于水印信息解码准确率的测试如表 3、表 4 所示.

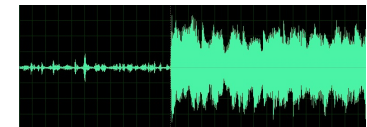
表 3 同步方案 1 近场测试数据(同步位数为 3)

扩频码长度/bit	同步位数/bit	嵌入信息内容	解码准确率/%	同步率/%	测试频率/Hz
127	3	全 0	99.88	70.59	11970
127	3	0/1 交替	99.84	59.42	17880
127	3	全 1	99.76	44.67	17880
511	3	全 0	99.98	52.42	17880
511	3	0/1 交替	99.82	44.60	11970
511	3	全 1	98.47	23.61	11970

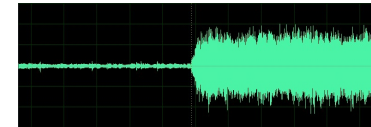
表 4 同步方案 1 近场测试数据(同步位数为 2)

扩频码长度/bit	同步位数/bit	解码准确率/%	同步率/%	测试频率/Hz
127	2	99.83	50.04	17880
511	2	99.74	39.58	11970

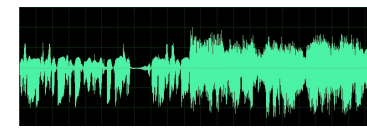
波形如图 6、图 7 所示,图中前半部分为干扰信号,其强弱与当时测试的天气、发射机和天线的工作状态等客观因素有关,说明了短波发射的不稳定性;



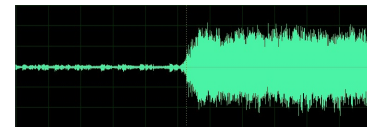
(a) 扩频长度127bit,嵌入信息内容全0



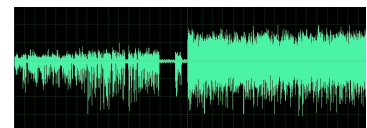
(b) 扩频长度127bit,嵌入信息内容0/1交替



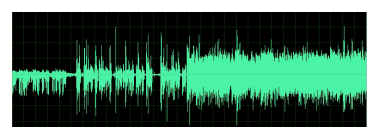
(c) 扩频长度127bit,嵌入信息内容全1



(d) 扩频长度511bit,嵌入信息内容全0

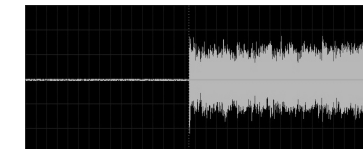


(e) 扩频长度511bit,嵌入信息内容0/1交替

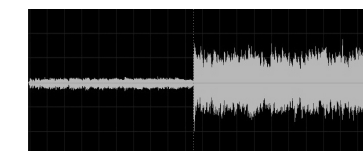


(f) 扩频长度511bit,嵌入信息内容全1

图 6 近场录制的同步位数为 3 的音频段波形图



(a) 扩频长度127bit



(b) 扩频长度511bit

图 7 近场录制的同步位数为 2 的音频段波形图

而后半部分为嵌入水印的音频段,其中包含着和前半段相似的噪声信号。

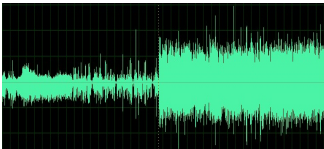
通过表 3 中的测试数据可以看到,在同步率相差差不多的情况下,不同的嵌入信息的解码准确率也差不多,可以认为嵌入信息内容对于解码准确率相关性较小.而对照表中同步率和相应的波形可以看出,随着信号信噪比的降低,同步率也随之减小.另外对于较高同步率的信号则相应的解码准确率也高.对于不同长度的扩频码,同步率相差较大的原因是其相应的解码码本大小不同.对于长度 127 位的扩频码,其搜索码本大小为 127,而对于长度 511 位的扩频码,其搜索码本大小为 511,因此同步率相差较大.

对于同步方案 2,实验数据如表 5 所示.

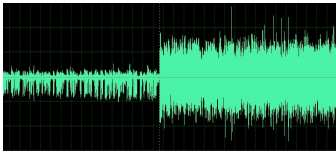
表 5 同步方案 2 近场测试数据

扩频码长度/bit	同步码值	阈值	解码准确率/%	同步率/%	测试频率/Hz
127	7E	1	99.61	68.02	17880
127	7E	0.9	99.49	76.74	17880
127	7E	0.8	99.53	81.98	17880
127	7E	0.7	99.34	87.02	17880
511	7E	0.6	99.76	25.19	17880
511	7E	0.5	99.70	44.96	17880
511	7E	0.4	99.34	64.34	17880
511	7E	0.3	99.18	85.56	17880

通过表 5 和图 8 的测试,可以发现同步率随着阈值的下降而增加,准确率则随着阈值的下降而下降.不同扩频长度所对应的阈值范围也不同,在准确率和同步率相近的条件下,扩频码长度越长,阈值越低.



(a) 扩频码长度为127bit的音频段



(b) 扩频码长度为511bit的音频段

图 8 方案 2 的近场实验音频段波形图(前半部分为噪声干扰,后半部分为含水印的音频段)

对比上面的实验,说明在近场的环境下(即没有通过天波信道传输,仅通过发射机的窄带发射,空中电磁干扰,重采样),同步方案 2 的同步性能高于同步方案 1;而对于扩频码长度的选取,对比使用 511bit 的扩频码长度和使用 127bit 扩频码长度的实验结果,发现前者的准确率与后者相比没有显著

的变化。

(3) 远场实验结果

我们从北京某发射台发射嵌入水印的短波广播，在服务区异地选择两个接收台：A 台和 B 台，分别在短波广播服务区的中心和边缘，接收设备为 NRD-545 接收机和自台检测天线，使用频率分别为 11970Hz 和 17880Hz，重复近场实验。接收的数据有部分程度的截幅，因此对于解码率和同步率都有一定的影响。采用同步方案 2，实验数据如表 6、表 7 所示。

表 6 同步方案 2 A 台远场测试数据

扩频码长度/bit	同步码值	阈值	准确率/%	同步率/%	测试频率/Hz
127	7E	0.9	97.15	13.37	17880
127	7E	0.8	97.41	25.00	17880
127	7E	0.7	96.93	42.64	17880
511	7E	0.35	94.55	9.30	17880
511	7E	0.3	95.93	25.19	17880
511	7E	0.25	94.47	45.93	17880

表 7 同步方案 2 B 台远场测试数据

扩频码长度/bit	同步码值	阈值	准确率/%	同步率/%	测试频率/Hz
127	7E	0.9	98.26	17.64	17880
127	7E	0.8	97.93	25.39	17880
127	7E	0.7	97.09	34.69	17880
511	7E	0.4	96.73	12.60	17880
511	7E	0.35	96.58	22.87	17880
511	7E	0.3	86.77	38.18	17880

表 6 中扩频长度为 127bit，阈值为 0.9 的解码准确率低于阈值为 0.8 的，我们分析认为主要原因是由于阈值增加，同步率降低，使得水印的测试数据量下降，从而导致计算准确率的误差增加，因此可能出现上述情况。扩频码长度为 511bit 的音频段在相近同步率的条件下准确率低于扩频码长度为 127bit 的，主要是因为扩频码长度越长，对于截幅的影响就越敏感。因此准确率降低的一个主要原因是截幅导致的。

尽管远场数据在录制的时候有较大的截幅，对同步率和准确率都有较大的影响，但是在噪声较大的环境下，算法依然能够进行信号的同步并且有较高的准确率，从而证明了算法能够适应于短波信道，对于短波信道中的干涉衰落、多普勒频移、临频或同频干扰、多径展宽效应都具有较好的鲁棒性能。

(4) 冗余嵌入、数据重组和可信度设定对解码的影响

我们在信号被严重干扰的情况(同频干扰)下测试了冗余嵌入、数据重组和可信度技术对水印信息提取准确率的影响。实验条件为：由某地一个发射台向北京发射含水印信息的音频节目信号，同时由同

一地区的另一发射台发射相同频率、相同功率的干扰节目信号，我们在北京接收信号并进行解码。为了能最好地反映相应方法对准确率的影响，根据前面实验得到的嵌入数据对准确率影响不大的结论，对于嵌入的数据进行适当的选择，以便我们能够在同一段信号中使用多种不同的策略进行解码。因此我们选用的嵌入水印信息为 0,1 交错、长度为 16bit 的序列，并且使用相同的扩频码。通过对同一段音频信号使用多种不同方法解码，得到如表 8 所示的实验数据。通过对表 8 的分析，可以看出通过使用多种抗干扰的方法，水印信息提取的准确率有了大幅上升，从而证明了我们的方法是很有效的。

表 8 冗余嵌入、数据重组和可信度设定对解码的影响

解码方法	准确率/%	同步率/%
A0	88.14	56.78
A1	92.71	50.19
A2	97.42	50.19
A3	98.02	40.89

表 1 中：A0 表示使用同步方案 2，扩频码长度为 127 位的方法解码；A1 表示使用冗余嵌入的方法解码；A2 表示使用数据重组的方法解码；A3 表示在 A2 的基础上使用可信度度量的判定。

为了进一步比较使用 A0 和 A3 的提取方法对解码准确率的影响，我们采用和表 8 相同的实验条件，节目 1 和节目 2 分别为两个发射台播出的不同的轻音乐节目，分别含有使用不同扩频码嵌入的水印数据；在接收端对接收到的混杂的音频信号分别进行解码，提取水印信息，并且改变两个发射台的发射机的功率进行了多组实验，得到表 9 的数据。通过对表 9 的分析，可以发现各种恶劣的环境下，使用 A3 的解码方法可以明显提高解码的准确性，保证了提取的水印信息的可靠性，完全能够达到台站鉴别的目的。

表 9 A0 和 A3 水印提取方法解码准确率比较

发射功率/kW		A0 解码准确率		A3 解码准确率	
节目 1	节目 2	节目 1	节目 2	节目 1	节目 2
100	50	88.14	77.55	99.11	99.65
100	100	90.45	83.49	98.93	97.98
50	100	86.59	91.93	98.96	98.89
100	100	88.02	90.63	99.38	98.66

7 结论及改进

本文实验了在窄带条件下水印嵌入的鲁棒性；把同步信号完全嵌入在频率中，使得同步信号有非

常强的鲁棒性;并且实现了应用于短波广播的台站鉴别系统.对于两种不同同步方案的远近场比较以及不同扩频码长度对于实际系统影响的分析表明,使用 127 位的扩频码长度,同步方案 2 能够最好地适用于短波音频广播的台站鉴别;同时针对短波信道的特点和实际应用,采用了多种抗干扰的方法进一步提高了系统的鲁棒性和准确性.在最后的系统中我们再加入了 RS 纠错码,进一步提高了系统的准确性.

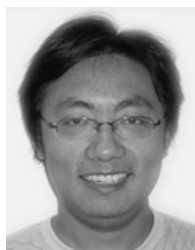
参 考 文 献

- [1] Bender W, Gruhl D, Morimoto N. Techniques for data hiding. IBM Systems Journal, 1996, 35(3-4): 313-336
- [2] Gruhl D, Lu A, Bender W. Echo hiding//Proceedings of the Information Hiding Workshop, University of Cambridge, Cambridge, UK, 1996: 295-315
- [3] Boney L, Tewfik A H, Hamdy K N. Digital watermarks for audio signals//Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems. Hiroshima, Japan, 1996: 473-480
- [4] Niu Xin-Xin, Yang Yi-Xian. A new algorithm for digital watermarking based on the wavelet transform. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(1): 21-27(in Chinese)
(钮心忻,杨义先.基于小波变换的数字水印隐藏与检测算法.计算机学报,2000,23(1):21-27)
- [5] Chen B, Wornell G W. Quantization index modulation methods for digital watermarking and information embedding of multimedia. Journal of VLSI Signal Processing, 2001, 27: 7-33
- [6] Zhang Zhi-Ping. Information hiding in audio based on the

theory of auditory perception[Master dissertation]. Peking University, Beijing, 2004(in Chinese)

(张志平.基于听感知机理的音频隐藏通信研究[硕士学位论文].北京大学,北京,2004)

- [7] Jiang Teng Liang Chun. Error Correcting Codes and Their Applications. Jin Zi-Min translate. Beijing: Science Press, 2004(in Chinese)
(江藤良纯著.纠错码及其应用.金子敏译.北京:科学出版社,2004)
- [8] Kirovski D, Malvar H. Spread-spectrum watermarking of audio signals. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(4): 1020-1033
- [9] Wu Shao-Quan, Huang Ji-Wu, Huang Da-Ren. DWT-based audio watermarking with self-synchronization. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(3): 365-370(in Chinese)
(吴绍权,黄继武,黄达人.基于小波变换的自同步音频水印算法.计算机学报,2004,27(3):365-370)
- [10] Wu C P, Su P C, Kuo C C J. Robust audio watermarking for copyright protection//Proceedings of the SPIE. 1999, 3807: 387-397
- [11] Shen Qi-Qi, Zhu De-Sheng. Shortwave Communication. Xi'an: Xidian University Press, 1989(in Chinese)
(沈淇淇,朱德生.短波通信.西安:西安电子科技大学出版社,1989)
- [12] Xin Xiao-Ming, Chen Qiong. Selection of m-sequence and balanced GOLD sequence. Journal of Beijing Institute of Technology, 1990, 10(4): 106-113(in Chinese)
(辛肖明,陈琼.m序列优选对及平衡 GOLD 码序列.北京理工大学学报,1990,10(4):106-113)
- [13] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG, IS11172-3. Information technology—Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1.5Mbits/s, Part 3: Audio, 1992



LEI Yun, born in 1982, M. S..

His research interests focus on digital audio watermarking.

audio watermark technology.

YAN Bo, born in 1976, engineer. His research interests focus on digital audio signal processing.

YAN Yong-Hong, born in 1967, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor. His research interests include large scale non-specific person consecutive term voice recognition, voice signals end processing, multimedia data retrieval, audio watermarks, multimode language system, plug-in systems, adaptive systems and rapid search algorithm.

LIU Jian, born in 1971, Ph. D., associate professor.

His research interests include embedded speech recognition and synthesis, spoken language learning algorithm, digital

Background

This article presents a radio station identification system for shortwave broadcasting. This identification system is based on digital audio watermark technology. The watermark information is embedded into program audio signal before transmission. Through the watermark information decoder,

the system can identify the source broadcasting station of the received program signal, which can also help to evaluate the quality of the broadcasting program. Due to the complications of the shortwave narrow band, the work of this article mainly focuses on the robustness of watermark algorithm.