

引用格式:何禹洪,陈雨,杜婷婷. 一种前后向多回声核隐藏算法[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(2): 25-29. [HE Y H, CHEN Y, DU T T. A forward-backward multi-echo kernel hiding algorithm[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(2): 25-29.]

一种前后向多回声核隐藏算法

何禹洪,陈 雨,杜婷婷

(四川大学 电子信息学院,四川 成都 610065)

摘 要: 数字音频水印是保护信息安全、实现防伪溯源、版权保护等的有效办法. 多回声核隐藏算法的信息隐藏能力较强,并且具有良好的不可感知性,但后向回声个数的增多所带来的问题是后向回声之间干扰大,导致系统误码率增加,系统鲁棒性能下降. 本文提出一种前后向多回声核隐藏算法,在多回声核隐藏算法的基础上引入前向回声,利用前向回声在倒频谱里对延迟点位置处幅度的增强来降低误码率和改善系统的鲁棒性能. 结果表明:所提出的改进算法误码率相比多回声核隐藏算法下降 22 个百分点,且具有更好的鲁棒性能和不可感知性.

关键词: 多回声核;前向回声;误码率;鲁棒性

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2021)02—0025—05

A forward-backward multi-echo kernel hiding algorithm

HE Yu-hong CHEN Yu, DU Ting-ting

(School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: Digital audio watermarking is an effective method to protect information security, realize anti-counterfeiting traceability, and copyright protection. The multi-echo kernel hiding algorithm has strong information hiding ability and good imperceptibility. However, the problem brought by the increase of the number of backward echoes is that the interference between the backward echoes is large, which leads to the increase of bit error rate and the decrease of system robustness. This paper presents a forward-backward multi-echo kernel hiding algorithm. The forward echo is introduced based on the multi-echo kernel hiding algorithm, and the amplitude of the forward echo in the cepstrum is enhanced to reduce bit error rate and improve the robustness of the system. The results show that the bit error rate of the proposed improved algorithm is 22% lower than that of the multi-echo kernel hiding algorithm, and it has better robust performance and imperceptibility

Key words: multiple echo nucleus; forward echo; bit error rate; robustness

1 引言

数字水印的基本思想是利用某些技术手段将需要隐藏的信息嵌入到图像、音频和视频等载体中,通过检测或提取这些载体中包含的隐藏信息来验证产品的版权、证明产品的真实性完整性^[1]. 隐藏到载体中的信息称之为水印信息,它可以是符号、文字等.

水印信息必须具备不可察觉性,并且可以被某种算法提取出来. 按照数字多媒体不同,数字水印技术可以分为:音频水印技术、图像水印技术、文本水印技术等^[2].

回声隐藏是音频水印技术的一种. 最早是由 Bender 等人^[3]在 1996 年提出的一种信息隐藏技术. 利用回声实现的信息隐藏大体分为两步:第一

步,先确定延时时间,不同的延时时间可代表不同的信息位(密文);第二步,利用确定的延时时间产生回声,并加入到载体音频(明文)中.在接收端,密文可被延时检测算法提取出来.根据人耳的听觉系统对音频具有时域掩蔽特性,载体音频会把回声信号掩蔽起来而不被人感知,密文信息得以隐藏.该算法实现简单,难以察觉,隐藏效果好,且不产生噪声^[4];能实现不需要原始音频也能提取隐藏信息的盲检测;具有不可感知性这一天然的优势;对同步要求不高.但它同时也存在缺点:当回声幅度较大时,隐藏效果将会降低,当回声幅度较小时,回声在变换域的峰值容易被覆盖,提取水印的误码率就会变高^[5].因此,研究出能降低水印信息检测的误码率而又能保证音频具有良好感知透明性的算法是回声隐藏技术的难点.

改造回声核是改进回声隐藏算法最直接的方法.国内外专家、学者对此进行了大量的研究,取得了丰富的成果.比如 Xu 等人在 Bender 原始算法的基础上提出了多回声核隐藏算法^[6],即引入多个小幅度回声,提高了不可感知性,但算法的鲁棒性能较差;oh 等人提出的双极性回声核隐藏算法^[7],提高了不可感知性,并且算法的鲁棒性能也没有下降;Huang 以双极性回声核隐藏算法为基础,提出了一种基于心理声学模型分析的回声隐藏算法^[8],该算法鲁棒性提升不明显,但进一步提升了不可感知性;Kim 等人的前后向回声隐藏方法^[9],该算法提升系统鲁棒性较为明显.

利用多回声核隐藏技术对广播电台的音频水印系统进行设计能有效解决系统盲检测问题,但在保证有较好的不可感知性和嵌入较大的信息量的情况下会导致系统鲁棒性变差,提取的水印信息误码率变高.为此,本文提出一种前后向多回声核隐藏算法,在多回声核隐藏算法的基础上引入前向回声,利用前向回声在倒频谱里对延迟点位置幅度的增强,并对水印提取算法进行优化以减少前向回声带来的干扰,以此来降低误码率和改善系统的鲁棒性能.

2 前后向多回声核隐藏算法

回声隐藏的目的是以添加回声的方式在原有音频信息中嵌入新信息,实现信息隐藏. Bender 等^[3]给出了回声隐藏的基本原理, Bender 等提出的回声核如式(1)所示.

$$h(n) = \delta(n) + \alpha\delta(n-d) \quad (1)$$

式中,回声是由 $\alpha\delta(n-d)$ 引入的; d 为延迟时间; α 为衰减系数.

在实际场景中,我们听到的声音中都包含不止一路被反射的回声.也就是说,有多路回声的声音比只有一路回声的声音更自然,不可感知性更好.根据这一点, Xu 提出了基于多回声核的隐藏算法,相比传统回声隐藏算法,多回声核隐藏算法能隐藏的信息更多.但是,这也会带来弊端,因为回声之间也存在干扰,每增加一路回声,干扰的几率就会增加,那么系统的鲁棒性能就会下降.根据文献^[5]对回声核的个数做出的推导,结论是回声核个数最优是 4 个,那么多回声核的表达式如下所示:

$$h(n) = \delta(n) + \alpha\delta(n-d_1) + \alpha\delta(n-d_2) + \alpha\delta(n-d_3) + \alpha\delta(n-d_4) \quad (2)$$

对(2)式求倒频谱,得:

$$c_h(n) = \alpha\{\delta(n-d_1) + \dots + \delta(n-d_4)\} - \frac{\alpha}{2}\{\delta(n-2d_1) + \dots + \delta(n-2d_4)\} + \frac{\alpha}{3}\{\delta(n-3d_1) + \dots + \delta(n-3d_4)\} + \dots \quad (3)$$

对于每个延迟点位置 d_i ($i = 1, 2, 3, 4$),都有:

$$c_h(d_i) = \alpha, \alpha \in (0, 1) \quad (4)$$

此时的延迟点位置的幅度相比 α 没有增加.

根据 Kim 等人^[9]提出的前后向回声隐藏算法,即在传统回声隐藏算法中引入前向回声,利用前向回声在倒频谱里对延迟点位置幅度的增强^[5],使得系统的误码率下降,系统的鲁棒性能得到有效的改善,在多回声核隐藏算法中引入前向回声,得到本文算法的数学模型,即如式(5)所示:

$$h(n) = \delta(n) + \alpha\delta(n-d_1) + \alpha\delta(n-d_2) + \alpha\delta(n-d_3) + \alpha\delta(n-d_4) + \alpha\delta(n+d_1) + \alpha\delta(n+d_2) + \alpha\delta(n+d_3) + \alpha\delta(n+d_4) \quad (5)$$

$$y(n) = x(n) * h(n) \quad (6)$$

嵌入回声之后的信号表示如式(6)所示.对(5)式求倒频谱,为了方便观察,我们只保留 $\delta(n-d_i)$ 项,不包含此项的完全省略可得: $c_h(n) = \alpha\{\delta(n-d_1) + \dots + \delta(n-d_4) + \dots\}$

$$\dots + \frac{\alpha^3}{3}\{3\delta(n-d_1) + \dots + 3\delta(n-d_4) + \dots\} \quad (7)$$

对于每个延迟点位置 d_i ($i = 1, 2, 3, 4$),都有:

$$c_h(d_i) = \alpha + \alpha^3 + \alpha^5 + \dots = \frac{\alpha}{(1-\alpha^2)} > \alpha, \alpha \in (0, 1)$$

(8)

由公式(8)可以看出前向回声的引入确实能够增强延迟点位置的幅度。

2.1 水印信息的嵌入

本文基于前后向多回声核隐藏算法的水印信息嵌入系统框图如图1所示。

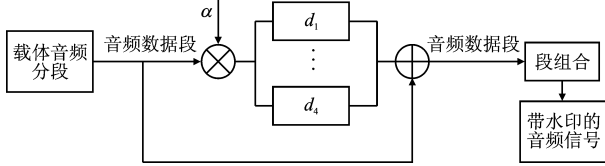


图1 水印信息嵌入系统框图

设水印信息的二进制 bit 流为 $\{a_1, a_2, \dots, a_{16}\}$, 水印信息嵌入的具体步骤如下:

(1) 先将原始音频信号分成若干个大小相同的数据段(大约为每个片段几个或者几十个 ms), 这里以一个片段为例说明。

(2) 每一个片段用来嵌入 16 比特信息. 将二进制 bit 流 $\{a_1, a_2, \dots, a_{16}\}$ 进行编码, 每四位二进制数编码成一个十进制数, 得到编码后要嵌入的信息流 $\{n_1, n_2, n_3, n_4\}$, 在嵌入信息过程中, 对每段信号使用式(7), 选择适当的衰减系数 α , 以下为每路信号的延迟时间。

第一路:

$$d_1 = M + F \times n_1, d_1 \in [M, M + 15 \times F]$$

第二路:

$$d_2 = d_1 + F \times n_2 + K, d_2 \in [d_1 + K, d_1 + K + 15 \times F]$$

第三路:

$$d_3 = d_2 + F \times n_3 + K, d_3 \in [d_2 + K, d_2 + K + 15 \times F]$$

第四路:

$$d_4 = d_3 + F \times n_4 + K, d_4 \in [d_3 + K, d_3 + K + 15 \times F] \quad (9)$$

式中, M, F 和 K 均为大于零的常量, 对于本文提出的算法模型, 根据文献[5]给出的推导方法, F 的取值固定为 2, 而根据推导和实验, K 的最佳取值为 23, $M = 45 \times F + 3 \times K + 1 = 160$. 该算法可以保证 $d_4 > d_3 > d_2 > d_1$, 从而确保了每路信号不发生重叠。

(3) 将每段音频数据连接起来, 得到最后完整的带水印的音频信号。

2.2 水印信息的提取

检测隐藏信息比特的过程就是检测回声延迟时间的过程, 本文采用能量倒频谱分析的方法进行水印信息的提取. 由于本文算法模型中引入了前向回声, 前向回声也会带来一定的干扰, 所以在这里不能用传统的提取算法来提取水印信息, 而需要对提取算法做一定的优化. 水印信息提取系统框图如图2所示。

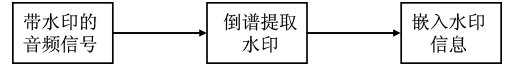


图2 水印信息提取系统框图

具体提取步骤如下:

(1) 将带水印信息的音频信号分成若干大小相同的数据段(大约为每个片段几个或者几十个 ms), 这里以一个片段为例说明。

(2) 计算每段带水印信号的能量倒频谱:

$$p(n) = (IFFT(\ln(|FFT(y(n))|^2)))^2 \quad (10)$$

(3) 找出 $p(n)$ 中四个峰值点对应的延迟点位置。

由于本文所提出的算法引入了前向回声, 为了减少前向回声带来的干扰, 所以在提取的时候需要对多回声核的提取算法做优化, 以此来作为本文的提取算法. 改进的地方在于这里所找的延迟点的范围和嵌入时的范围不同, 需要做一定的调整, 经过大量实验, 最佳的调整方法见式子(11), $\max$ 函数在这里表示的是 $p(n)$ 在给定范围内的最大值, $p^{-1}(\max(p(n)))$ 对应的就是延迟点位置的取值。

$$\max_1 = p^{-1}(\max(p(n))),$$

$$n \in [M, M + 15 \times F]$$

$$\max_2 = p^{-1}(\max(p(n))),$$

$$n \in [M + K + \max_1, M + K + \max_1 + 15 \times F]$$

$$\max_3 = p^{-1}(\max(p(n))),$$

$$n \in [M + 2 \times K + \max_1 + \max_2, M + 2 \times K + \max_1 + \max_2 + 15 \times F]$$

$$\max_4 = p^{-1}(\max(p(n))),$$

$$n \in [M + 3 \times K + \max_1 + \max_2, M + 3 \times K + \max_1 + \max_2 + \max_3 + 15 \times F] \quad (11)$$

(4) 对(3)中得到的 $\max_1, \max_2, \max_3$ 和 $\max_4$

进行归一化处理,得到的是四位二进制编码之后的十进制数. $round$ 函数表示四舍五入取整.

$$m_1 = round(\frac{\max_1}{F}), m_2 = round(\frac{\max_2}{F})$$
$$m_3 = round(\frac{\max_3}{F}), m_4 = round(\frac{\max_4}{F}) \quad (12)$$

(5) 将(4) 中得到的十进制数 m_1 、 m_2 、 m_3 和 m_4 转化为相应的 4 比特二进制数.

$$m_1 \rightarrow \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_2 \\ a'_3 \\ a'_4 \end{bmatrix}, m_2 \rightarrow \begin{bmatrix} a'_5 \\ a'_6 \\ a'_7 \\ a'_8 \end{bmatrix}, m_3 \rightarrow \begin{bmatrix} a'_9 \\ a'_{10} \\ a'_{11} \\ a'_{12} \end{bmatrix}, m_4 \rightarrow \begin{bmatrix} a'_{13} \\ a'_{14} \\ a'_{15} \\ a'_{16} \end{bmatrix} \quad (13)$$

最终,提取出的水印信息为 $\{a'_1, a'_2, \dots, a'_{16}\}$.

3 改进算法性能分析

本实验主要通过改变衰减系数和对系统进行攻击分别对系统性能进行仿真测试. 在实验中,采用长度为 258s 的 wav 格式的单声道音频作为载体音频对多回声核隐藏算法和本文算法进行性能的测试. 实验平台为 MATLAB R2020a.

3.1 衰减系数对系统的影响

由公式(1)可知回声信号的衰减大小是由衰减系数 α 决定的,而 α 的大小决定着系统性能的优劣. 如果 α 取值过大,会导致回声信号的能量过大,将会破坏带水印信号的音频质量,水印的隐藏效果将会变差,影响系统的不可感知性能;反之,如果 α 取值过小,会导致回声信号的能量过小,将会影响水印的提取,进而造成较高的误码率,并且系统的鲁棒性能也会下降,也就是抗攻击能力下降^[10].

本文通过改变算法的衰减系数 α ,在其他参数不变的情况下,对多回声核隐藏算法和本文算法进行性能的测试. 在实验中,通过计算误码率和解码信息与水印信息的归一化相关系数进行系统性能分析. 衰减系数对系统误码率的影响结果如表 1 所示.

根据表 1、表 2 可看出本文所提出的前后向多回声核算法性能明显优于多回声核隐藏算法,说明在传统多回声核隐藏算法中引入前向回声是有效的. 当衰减系数 α 减小时,嵌入回声的幅度减小,系统的不可感知性将会越好,然而提取出的水印信息的误码率却越高,与原水印信息相似度将会越低. 本

文提出的算法在 $\alpha = 0.1$ 时准确率依然有 92%,且准确率比多回声核隐藏算法高出 14 个百分点. 也就是本文算法在保证嵌入信息量的同时具有较高的准确率和较好的不可感知性.

表 1 系统误码率

衰减系数 α	多回声核隐藏算法(%)	本文改进算法(%)
0.1	21.26	7.21
0.15	6.43	1.73
0.2	2.35	0.52
0.25	1.16	0.33
0.3	0.79	0.31
0.35	0.71	0.35
0.4	0.62	0.43

解码信息与水印信息的归一化相关系数如表 2 所示.

表 2 归一化相关系数

衰减系数 α	多回声核隐藏算法(%)	本文改进算法(%)
0.1	76.38	92.59
0.15	93.02	98.21
0.2	97.45	99.46
0.25	98.72	99.66
0.3	99.14	99.67
0.35	99.23	99.64
0.4	99.33	99.56

3.2 系统的鲁棒性测试

在日常生活中,音频信号经常会遭受到一系列的攻击,比如信号加噪、信号滤波等等. 本文实验采用对带水印的信号加噪声、加回声、高通滤波、低通滤波,将处理后的信号解码并计算其误码率.

为了保证系统具有较好的不可感知性,因此在测试的时候,衰减系数的值不能取的太大,在这里,我们将衰减系数 α 设置为 0.2. 通过比较多回声核隐藏算法和本文算法的误码率来判断鲁棒性的优劣. 实验结果如表 3 所示:

表 3 系统误码率

攻击类型	多回声核隐藏算法(%)	本文算法(%)
加入 SNR=40db 的白噪声	4.89	1.22
加入延时为 10ms 的回声	2.50	0.52
高通滤波	2.31	0.77
低通滤波	9.31	1.17

根据表 3 可知,本文所提出的前后向多回声核

隐藏算法的鲁棒性明显优于多回声核隐藏算法。对于本文提出的算法,除了加噪声和低通滤波,其他攻击误码率均低于1%,且对于低通滤波攻击的表现明显优于多回声核算法,相比多回声核算法,抗低通滤波攻击的性能提升了7倍,总体来说,本文算法的鲁棒性能很好。对于加回声和高通滤波两种攻击来说,两种算法的误码率均没有很大幅度的变化。在加入白噪声攻击下,改进算法的误码率为1.22%,提取水印信息的准确率为98.78%。虽然抗噪声比抗其他攻击性能稍差一点,但与多回声核算法比较,抗噪性能提升了3倍。

4 结束语

本文针对多回声核隐藏算法回声之间干扰增大,误码率增大,系统鲁棒性下降的问题,再结合前后向回声隐藏算法对比传统回声隐藏算法误码率低、鲁棒性好的特点,在传统多回声核隐藏算法中引入前向回声来改善系统的误码率和鲁棒性。经过实验验证证明,在每段载体音频嵌入水印信息量不变的前提下,本文所提出的改进算法有效地解决了系统误码率高、鲁棒性差的问题。传统前后向回声隐藏算法由于其能够隐藏的信息量较少,很难应用在实际当中,本文所提出的改进算法在实际应用场景当中有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] ZHANG Q Y, YU D M, GUAN W, et al. Electronic seal system based on digital watermark and its implementation[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(14): 3483-3485. DOI: 10.16208/j.issn1000-7024.2007.14.063.
- [2] ZHAO C H, LI F C. Digital audio watermark technique: retrospect and prospect[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(6): 57-61. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.2002.06.015.
- [3] BENDER W, GRUHL D, MORIMOTO N, et al. Techniques for data hiding[J]. IBM Systems Journal, 1996, 35(3-4): 313-336. DOI: 10.1147/sj.353.0313.
- [4] WANG J, WANG R D, YAN D Q, et al. Detection method for echo hiding based on convolutional neural network framework[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(2): 375-380. DOI: 10.11772/j.issn.1001-9081.2019081400.
- [5] ZHANG X J. Design of multiple echoes hiding watermarking system for FM radio[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [6] XU C, WU J, SUN Q. Applications of digital watermarking technology in audio signals[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1999, 47(10): 805-812.
- [7] OH H O, SEOK J W, HONG J W, et al. New echo embedding technique for robust and imperceptible audio watermarking[C]//Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2001. DOI: 10.1109/ICASSP.2001.941176.
- [8] HUANG D Y, YEO T Y. Robust and inaudible multi-echo audio watermarking[C]//Proceedings of the 3rd IEEE Pacific Rim Conference on Multimedia. Taiwan, China: Springer, 2002. DOI: 10.1007/3-540-36228-2_76.
- [9] KIM H J, CHOI Y H. A novel echo-hiding scheme with backward and forward kernels[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 885-889. DOI: 10.1109/TCSVT.2003.815950.
- [10] CHEN Q, CHEN Y, DU T T. Echo hidden audio watermarking algorithm based on error correction coding[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(30): 227-231.

作者简介:

何禹洪 男,(1994-),硕士研究生。研究方向为信号与信息处理。

陈雨(通信作者) 男,(1976-),博士,副教授。研究方向为智能材料结构、超声无损检测、水利信息化系统。

Email: ychen@scu.edu.cn.