

# 一种音频信息的时域非均匀误码保护算法

毛 倩<sup>1</sup> 徐军军<sup>1</sup> 董德存<sup>2</sup>

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)<sup>1</sup> (同济大学交通运输工程学院 上海 200092)<sup>2</sup>

**摘 要** 提出了一种基于循环不等保护码的音频可靠性传输方法。循环不等保护码通过一次编译码为音频信号的不同信息位提供两个误码保护等级  $f_1, f_2 (f_1 > f_2)$ 。译码时如果一个码字内的误比特数小于或等于  $f_2$ , 则采用循环码的一般译码算法译码; 误比特数大于  $f_2$ , 则通过对  $f_2$  子空间校正子的计算对高保护等级的信息位实现  $f_1$  的误码保护。本方法可应用到音频编解码器的设计中。实验表明本方法能有效提高音频传输可靠性, 一定噪声下语音信号的 SNR 值提高了 2~5dB, 并具有良好的听觉效果。

**关键词** 音频传输, 不等保护, 信噪比

**中图分类号** TN912.3 **文献标识码** A

## Time-domain Non-uniform Error Protection Algorithm of Audio Information

MAO Qian<sup>1</sup> XU Jun-jun<sup>1</sup> DONG De-cun<sup>2</sup>

(College of Optical-Electro-Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)<sup>1</sup>

(School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)<sup>2</sup>

**Abstract** A new method about audio safe transmission based on unequal error protection codes was proposed. Unequal error protection codes provide two levels of error-correcting capabilities:  $f_1$  and  $f_2 (f_1 > f_2)$  for the different audio information bit with once codec. If the number of error bits less than or equal to  $f_2$  in the decoding process, a common decoding algorithm is adopt, then provides high protection lever with the error-correcting capabilities  $f_1$  by computing the syndromes of the sub-codespace of  $f_2$ . It's suitable for better audio codec design. Simulation shows that this method improves the security transmission of the audio signal. Under a certain noise the SNR value of the audio signal is obviously advanced and has a good hearing effect.

**Keywords** Audio transmission, Unequal error protection, SNR

## 1 引言

数字音频信号在传输时必须进行编码压缩。压缩后的信号去掉了多种冗余, 如时域冗余、频域冗余、听觉冗余; 编码包括波形编码、参数编码和混合编码 3 种形式。其中波形编码包括 PCM, DM, SBC 等。压缩编码后的信息的可靠传输是音频质量的重要保证。编码后的音频信息从高位到低位所对应的信息位有着不同的重要性级别, 这些信息位在传输中要求的差错保护措施是不同的。一般来说越是重要的信息位在误码保护时其冗余度应该越大, 针对不同级别的信息位需要采用不同的编解码技术。目前主流的音频信息不等保护编码都是以这种二重或者多重编码实现的, 但这样需要多套编解码设备, 不但提高了解码端的成本, 还带来了复杂的运算。

本文将循环不等保护码(Cyclic Unequal Error Protection, CUEP)应用到音频信息的可靠传输中, 针对码字对的不同信息位提供两个误码保护等级, 以达到非均匀误码保护<sup>[1]</sup>的效果, 非常适合音频信息的高可靠性传输。这种音频编码

传输方式不需要经过频域变换, 仅在空域中对音频信息码字的不同比特位进行非均匀保护, 一次编码就能达到不等保护目的, 如图 1 所示。本文针对的处理过程就是图 1 中纠错编码到发送比特流然后解码的过程。由于编解码过程没有在频域做处理, 而只在空域对码字的不同比特位提供不等保护, 使得算法比较简单, 应用在编解码器的设计中时可简化编码器的结构。

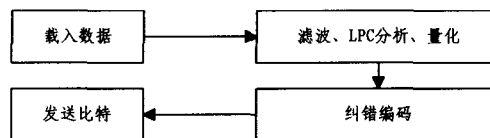


图 1 音频编码原理框图

## 2 循环不等保护码

数字通信中, 一般采用差错控制编码技术来提高信息的抗干扰能力和传输的可靠性。但具有等保护能力的差错控制码对信息中各个码元的保护能力均相等, 而循环码不等保护

到稿日期: 2009-11-12 返修日期: 2010-01-29 本文受 863 项目(2007AA11Z247), 上海市科委课题(08201202100)资助。

毛 倩(1978-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为信道编码及无线通信, E-mail: mmcat1978@yahoo.com.cn; 徐军军(1986-), 男, 硕士生, 主要研究方向为信道编码及无线通信; 董德存(1958-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为信息通信理论与系统、多媒体信息处理与通信。

码可以较方便地对不同的信息元根据其重要程度不同提供不等的抗干扰能力,并能应用于随机差错和突发错误的纠错<sup>[2]</sup>。

考虑一个 $(n, k)$ 循环码 $C$ ,设信息多项式为 $m(x) = m_0 + m_1x + \dots + m_{k-1}x^{k-1}$ ,则码空间的分离矢量为 $S = (s_0, s_1, \dots, s_{k-1})$ ,其中 $s_i (i=0, \dots, k-1)$ 为第 $i$ 个信息位的分离距离。循环不等保护码对第 $i$ 个信息位 $m_i$ 的纠错能力为 $f_i = \lfloor (s_i - 1)/2 \rfloor$ ,其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示不超过 $x$ 的最大整数。若码空间的最小汉明距离为 $d$ ,那么码字纠错能力 $t = \lfloor (d-1)/2 \rfloor$ 。当码字中错误比特数 $\epsilon$ 小于或等于 $f_i$ 时,所有保护能力 $f_i$ 大于或等于 $\epsilon$ 的信息位都可以被正确译出<sup>[3]</sup>。码字的纠错能力 $t$ 和每个信息位的纠错能力 $f_i$ 的关系为 $t = \min(f_1, f_2, \dots, f_{k-1})$ 。

CUEP码的生成多项式 $g(x)$ 为 $x^n + 1$ 的因式,而 $x^n + 1 = g(x)h(x)$ ,这里 $h(x)$ 为循环码 $C$ 的校检多项式。假设CUEP码的完备定义集为 $\Psi = \{\alpha^i | i \in X_{l_1} \cup X_{l_2} \cup \dots \cup X_{l_v}\}$  ( $X$ 表示集合 $X$ 的补集(以 $n$ 为模)),因此 $\Psi = \{\alpha^i | i \in X_{p_1} \cup X_{p_2} \cup \dots \cup X_{p_u}\}$ ,  $\{p_1, p_2, \dots, p_u\} = \{l_1, l_2, \dots, l_v\} \bmod n$ 。

为提供具有非均匀纠错能力的循环码,首先要构造非均匀的码空间 $G_{opti}$ 。假设CUEP码为 $v$ 个最小理想 $\langle g_{l_1}(x) \rangle, \langle g_{l_2}(x) \rangle, \dots, \langle g_{l_v}(x) \rangle$ 的直和,则其最佳生成矩阵 $G_{opti}$ 为<sup>[4]</sup>

$$G_{opti} = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_v \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $G_{l_i} (i=1, \dots, v)$ 表示主理想 $\langle g_{l_i}(x) \rangle$ 的生成矩阵。如果子空间 $\langle g_{l_i}(x) \rangle$ 和 $\langle g_{l_j}(x) \rangle$ 的汉明距离不相等,则它们对应的信息元的分离距离就不相等。设发送序列为 $m = (m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7)$ ,则根据

$$c = mG_{opti} \quad (2)$$

所生成的码就具备不等保护的特性。

译码时,首先假设接收多项式为 $r(x) = r_0 + r_1x + \dots + r_{n-1}x^{n-1}$ ,则 $r(x) = c(x) \oplus e(x)$ 。其中 $c(x) = c_0 + c_1x + \dots + c_{n-1}x^{n-1}$ 为发送的码字多项式, $e(x) = e_0 + e_1x + \dots + e_{n-1}x^{n-1}$ 为错误多项式。译码算法主要分为4步:

1)由接收码字计算校正子 $S_{p_1}, S_{p_2}, \dots, S_{p_u}$ 。定义校正子为 $S_j = r(\alpha^j) (j \geq 0)$ 。当 $\alpha^j \in \Psi$ 时,码字 $c(\alpha^j) = 0$ ,所以有 $S_j = r(\alpha^j) = e(\alpha^j)$ 。

2)当码字中的错误比特数小于或等于 $f_2$ 时,采用循环码的一般译码算法由校正子求错误位置多项式,并得出错误图样。

3)将错误图样与码多项式相加进行纠错。

4)当码字中的错误比特数大于 $f_2$ 时,对高保护位进行二次译码。首先对 $m_0$ 值做出假设,并计算 $f_2$ 子空间的校正子,由这些校正子判断假设正确与否,直到找到正确的 $m_0$ 值<sup>[3,5]</sup>。

### 3 基于不等保护码的音频信息传输

音频一般采用11.025kHz, 22.05kHz, 44.1kHz的采样频率,采样精度为8位、16位和32位。本文采用的wav音频文件都是经过A律的PCM编码处理过的,即采用13折线的分段方法进行压扩。把Y轴均匀分为8段,每段再均匀分为16份,每份表示一个量化级,则Y轴一共有 $16 \times 8 = 128$ 个量

化级;X轴采用非均匀划分来实现非均匀量化的目的,划分规律是每次按二分之一来进行分段。由于分成128个量化级,故有7位二进制码( $2^7 = 128$ );又因为Y轴有正值和负值之分,需加一位极性码,故共有8位二进制码。

当利用CUEP码对由8位二进制码构成的采样点进行纠错时,对8位二进制信息位做调整,以最高位为符号位,剩下7位从左到右依次对应压扩后二进制码的高位到低位。如8位信息位为 $m = (m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7)$ ,那么从左到右信息位对传输误码的敏感程度越来越低。

在MATLAB环境下分别对11.025kHz的采样频率、8位采样精度的ringin.wav和ringout.wav文件做仿真分析。由于采样文件的8位元是以unsigned integer方式来储存的,因此所能表示的数值是介于0和255之间,现量化归一到+1和-1之间。对于音频序列的编码,我们将符号位作为最高位,余下用作数字的编码。本实验采用(15,13)CUEP码,其分离矢量为 $s = (3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)$ ,保护能力矢量为 $F = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ ,码的最佳生成矩阵为

$$G_{opti} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

编码时,首先将8比特音频编码补0变为13比特的信息序列 $m$ ,则码字为 $c = m \cdot G_{opti}$ 。在通过噪声信道后(本文采用二进制对称信道),在接收端采用上述的CUEP译码算法译码。传输模型如图2所示。

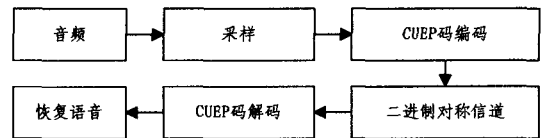


图2 音频信息传输模型框图

综上所述,利用CUEP码能为左侧的信息位 $m_0$ 提供更高等级的误码保护,使译码后的错误比特尽量落在 $m_1$ 到 $m_7$ 上,从而降低了误码对音频信息的影响程度,提高了传输质量。不等保护码针对信息组中的不同信息位提供非均匀误码保护,从而避免了一般不等保护码采用复杂的频率变换算法的缺点<sup>[3,4,6]</sup>。

### 4 实验仿真结果

以下是在MATLAB平台对音频传输的仿真结果,并以SNR值来衡量音频解码后的效果<sup>[7]</sup>。对ringin.wav和ringout.wav的仿真结果如图3和图4所示,图3(a)为原信号波形图;图3(b)为信道错误概率0.12%时一般循环等保护码EEP译码后的音频波形图;图3(c)为信道错误概率0.12%时

基于本文 CUEP 码纠错后的音频波形图,可见采用 CUEP 码的失真较小,听觉效果也有所改善。图 3(d)为各种噪声下分别采用 UEP 和 EEP 纠错后音频信号的 SNR 曲线,其中信道错误概率为 0.03% 到 1%,可以清晰地看出音频传输采用 UEP 纠错比采用 EEP 纠错的 SNR 值提高了 2dB 到 5dB。

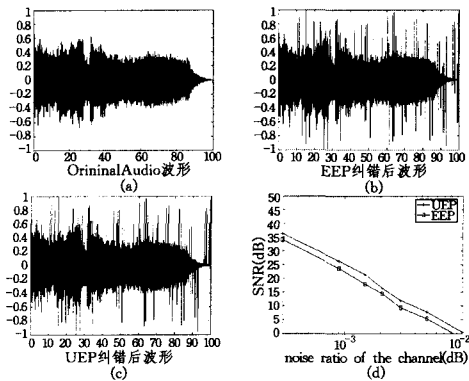


图 3 对 ringin.wav 的仿真结果

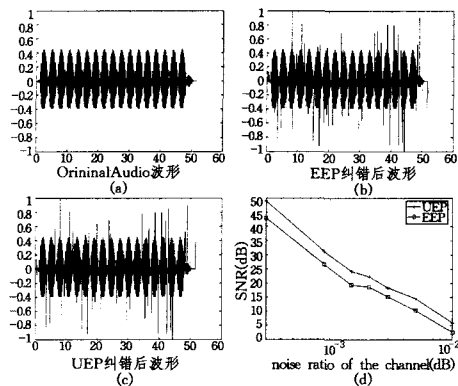


图 4 对 ringout.wav 的仿真结果

从仿真结果可以看出,UEP 解码恢复的波形更接近原始声音,PSNR 值明显比 EEP 解码出来的要高。本文为了说明问题只采用了(15,13)CUEP 码,实际操作时可以采用其他循环码,以获得更多的不等保护能力。

**结束语** 利用 CUEP 码对音频信息传输进行非均匀误码保护,保证高位信息的有效传输,提高了音频传输的可靠性和效率,将音频信号的 SNR 值提高了 2dB 到 5dB 左右,算法简单,纠错效果明显,抛弃了在编解码时需经行复杂的频域变换,而只需在空域对码字的不同比特位进行非均匀误码保护。将此算法应用到音频的编码器和解码器的设计中,可以精简编解码器的结构和算法复杂度,提高特别是低噪声信道下的音频传输可靠性,具有良好的应用前景。

## 参考文献

- [1] Gan Tong, Ma Kai-kuang. Weighted unequal error protection for transmitting scalable object-oriented images over packet-erasure networks[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14 (2): 189-199
- [2] Rahnvard N, Fekri F. Unequal error protection using low-density parity-check codes Communications[C]// International Zurich Seminar on. 2006:142-145
- [3] 毛倩,曾小清,张树京. 一种适用于二进制循环不等保护码的译码算法[J]. 计算机应用
- [4] Van Gils W J. Two topics on linear unequal error protection codes: bounds on their length and cyclic code classes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, IT-29(6): 866-876
- [5] Lan C, Narayanan K R, Xiong Zixiang. Source-optimized irregular repeat accumulate codes with inherent unequal error protection capabilities and their application to image transmission[C]// Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Volume 2, Nov. 2003: 1505-1509
- [6] Lin Shu, Costello D J Jr. Error Control Coding[M]. Beijing, China: Machine Press
- [7] Beaton R J, High L, Narayanan C, et al. Audioencoding within 128 kbit/s[C]// Proceeding of Conference IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. June 1989: 388-391

(上接第 73 页)

- [6] Lun D, Medard M, Ho T, et al. Network coding with a cost criterion[C]// International International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA). Parma, Italy: IEEE Communication Society, 2004: 342-348
- [7] 陶少国, 黄佳庆, 杨宗凯, 等. 基于最大流的网络编码组播路由算法[J]. 计算机科学, 2008, 35(6)
- [8] Youail R S, Cheng Wen-qing, Tao Shao-guo. Cost minimization for multi-source multi-sink network coding[C]// The 9th International Conference for Young Computer Scientists. IEEE Communication Society, 2008: 253-258
- [9] 方旭明. 下一代无线因特网技术: 无线 Mesh 网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006
- [10] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: Practical wireless network coding[C]// Proc. of SIGCOMM '06. Pisa, Italy,

Sep. 2006

- [11] Ho T, Koetter R, Medard M, et al. A random linear network coding approach to multicast[J]. IEEE Trans. on IT, 2006, 52 (10): 4413-4430
- [12] Jin J, Ho T, Viswanathan H. Comparison of network coding and non-network coding schemes for multi-hop wireless networks [C]// Proc. of ISIT. Seattle, WA, July 2006
- [13] Alimi R, Li (Erran) Li, Ramjee R, et al. iPack: in-Network Packet Mixing for High Throughput Wireless Mesh Networks[C]// Proc. of IEEE INFOCOM '08. Anchorage, AK, March 2008
- [14] 张先迪, 李正良. 图论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005
- [15] 于斌, 孙斌, 温暖, 等. NS2 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007
- [16] NS2[EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, updated, 2007