

使用噪声整形的多比特数字扬声器系统

张自力 沙家正

(南京大学声学所 南京 210093)

1996年4月1日收到

摘要 本文讨论了 PCM 数字式换能器的特点, 采用了过采样和噪声整形技术对多比特数字扬声器系统进行改进, 给出了计算机模拟结果.

关键词 数字扬声器, 过采样, 噪声整形

Multi-bit digital loudspeaker system using noise-shaping

Zhang Zili, Sha Jiazheng

(Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing, 210093)

Abstract This paper discusses the features of PCM digital transducers. We report the new way using oversampling and noise shaping to improve the performance of low bits PCM digital loudspeakers. The results from computer simulations are presented.

Key words Digital, Loudspeaker, Over-sampling, Noise shaping.

1 引言

声信号记录、编码和解码的数字化取得了前所未闻的高音质, 但由于扬声器仍为模拟式的, 电-声转换成了声重放系统性能的“瓶颈”。于是提出: 能否将扬声器(换能器)也数字化, 从而大大提高其性能? 70年代末以来, 美、日等国陆续有一些关于数字扬声器(数字式换能器)研究的报道^[1,3]、本文将在介绍研究背景之后, 提出利用噪声整形技术改进 PCM 数字扬声器系统的新研究方案和计算机模拟结果。

2 PCM 数字式换能器

2.1 工作原理

据采样定理, 采样频率高于信号最高频率两倍以上 ($f_s \geq 2f_b$) 时, 采样脉冲序列 (PAM, 脉冲幅度调制) 通过带宽与原信号相同的理想低通滤波器, 可不失真地还原, 如:

$$\chi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \chi \left(\frac{n}{2f_0} \right) \cdot \frac{\sin(2\pi f_0 t - n\pi)}{2\pi f_0 t - n\pi} \quad (1)$$

PCM (Pulse Code Modulation) 即将 χt 表示成 m 位二进制数, 此过程称之为量化。量化比特数 m 越高, 越接近于原信号真值。量化后的脉冲序列可表示为

$$\chi \left(\frac{n}{2f_0} \right) = \sum_{i=0}^{m-1} K_i \cdot \chi_i \left(\frac{n}{2f_0} \right) \quad (2)$$

其中 K_i 为第 i 位 ($i = 0, 1, \dots, m-1$) 的权值, $K_i = 2^i$, 由 (1)、(2) 得
据 (3) 式, 若有 m 个换能单元, 其特性符合 2 的幂次方关系, 输入以 m 位并行 PCM 信号, 叠加后经过理想低通机械滤波器或声学滤波器,

就可以还原出原声. 原理图如图 1 示:

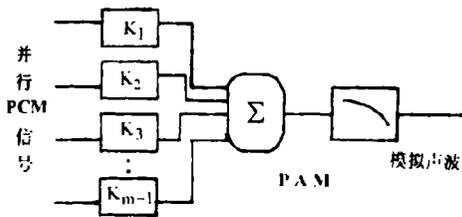


图 1 PCM 数字换能器原理图

2.2 PCM 数字受话器

美国的 J.L.flanagan 于 1979 年、1980 年先后发表了声滤波器和数字受话器的研究 [1,2], 制出了 4、5 和 6 位线性 PCM 驻极体数字受话器的试样.

对于驻极体换能器, 其振膜位移正比于所加电压:

$$X \propto E \quad (4)$$

而每一辐射单元的声体积位移满足:

$$X_a = S \cdot X \quad (5)$$

S 为声辐射面积.

这样, 数字式驻极体换能器可根据辐射单元面积进行加权. $m-1$ 个环形区的面积与各位幅值对应, 若某位值为“1”, 则其对应的辐射单元产生一个声压脉冲, 幅度正比于该位的权值. 声压脉冲在共用小空腔里叠加, 再通过声低通滤波器输出. 所用的声滤波器是由多个短的圆孔(声质量)、刚性壁的圆柱腔(声顺)及附加的阻尼材料组合而成. 对于 1500Hz 信号, 4 位和 6 位数字受话器试样的信噪比分别为 19 和 26dB, 再提高比特数将面临工艺上的困难.

2.3 PCM 数字扬声器

日本的稻永洁的研究集中于扬声器的直接 D/A 转换上 [3]. 制出了八位多音圈方式 PCM 数字扬声器的试样, 对于电动式扬声器有

$$F(t) = B(t) \cdot l \cdot I = B \cdot l \cdot I(t) \quad (6)$$

可以改变音圈的圈数等性质进行加权. 实验试样的音圈是在金属线轴上用八根编织线绕制而成, 各音圈的磁场条件都基本相同. 实验结果显示, 在量化位数范围内, 输入-输出线性理想, 对频率的依赖性也小; 量化比特数增加, 特性也随之变好.

2.4 调查结论

通过以上调查, 结合理论公式(参见下文 3.1), 我们发现, PCM 数字换能器的性能依赖于量化比特数. 量化比特数低, 性能还无法与传统换能器相比, 提高比特数, 又面临着加工精度问题. 即便工艺上可以实现, 也因成本高昂而难以实用. 而且, 由于短波效应、泄漏及横向交叉模式, 要设计出接近理想特性的声滤波器很困难. 数字式换能器的研究因此停滞不前. 然而, 随着数字信号处理技术的发展, 使得我们有可能从一些新的方向推动数字扬声器的研究.

3 改进的数字扬声器系统

3.1 过采样

对频带宽度为 f_B 的信号, 以 f_s 频率采样, 量化比特数为 m , Δ 为量化阶梯, 转换后信号成分功率近似为 $(2^m - 1)^2 \cdot \Delta / 2$, 量化噪声功率为 $G^2 = \Delta^2 / 12$. 由于高于信号频带的噪声被滤波器滤除, 得噪声功率为 $G^2 2f_B / f_s$, 输出最大信噪比为 [5,6]:

$$SNR |_{max} = 6m + 1.8 + 3 \log_2(f_s / 2f_B) \quad (7)$$

若采样频率仅为信号带宽的两倍时, $SNR |_{max} = 6m + 1.8$, 这个式子是我们熟悉的, 它常被用来分析线性 PCM 调制的传输信噪比, 此时调制系统的性能仅与量化比特数有关. 而在式 (7) 中, 提高采样率也有助于改善信噪比. 更重要的是, 过采样是噪声整形的基础条件.

3.2 噪声整形

噪声整形即对送入反馈环的二次量化信号进行滤波, 改变量化噪声的频率分布 [4]. 图 2 中, 输入 b 比特细量化信号, 量化器将求和电

路送来的信号低位 ($b - b'$) 截断, 误差信号由滤波器 $H(z)$ 整形, 回馈输入端, 输出信号为 b' 比特的粗量化信号. 我们可以根据关心的频带选择适当的滤波器. 针对音频, 选择噪声传递函数为高通形式的滤波器, 式中 N 为滤波器阶数:

$$H(Z) = 1 - (1 - Z^{-1})^N \quad (8)$$

噪声整形的效果与阶数、过采样率和二次量化数成正比. 我们的目的是在适当的阶数和过采样率下降低量化比特数, 并且保持音频信号的质量. 若不采取噪声整形, 直接以 b' 量化的噪声就会均匀分布, 音频内的信噪比也就比噪声整形的差.



图 3 改进的 PCM 数字扬声器系统

J.L.Flanagan、稻永洁采用的都是未经处理的线性量化 PCM 信号, 它对 PCM 数字扬声器 (换能器) 的量化数提出了严格的要求. 虽然他们设想过利用非线性量化改善之, 但也会带来数字换能器设计上的困难. 以前, 噪声整形常用于 D/A 芯片的中间处理部分, 应用在数字扬声器系统中后, 解决了后者量化比特数的局限, 可以使低比特数的数字式扬声器系统重放出相当于 16 比特量化的信号.

4 计算机模拟

为了预估上述方案的效果, 我们进行了计算机模拟, 用相互联接的 C 语言软件模拟各单元电路, 输出结果经多阶抽取音频频带, 经过旁瓣特性优良的 Minimum 4-term 窗函数^[7]进行 1024 点 FFT. 对 1000Hz 标准信号直接以 705600Hz (与标准采样频率 44100Hz 相比, 过采样率为 16) 采样, 这样就省去了内插电路. 16 比特线性量化后, 经 3 阶噪声整形变为 6 比特信号. 通过频谱分析发现, 其噪声主要集中在

因此, 可以对 PCM 数字扬声器系统作出如下改进, 如图 3 示:

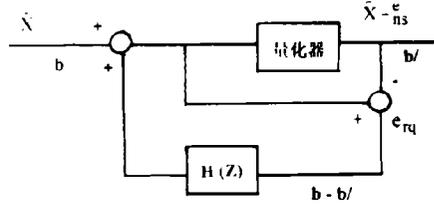


图 2 噪声整形电路框图

在高频 (如图 4 示), 音频范围内的噪声则很小 (图 5), 与 16BIT 量化的信号差不多.

图 6 为同一过采样率下, 二阶噪声整形的结果, 可见, 三阶的效果优于二阶. 提高阶数至四阶, 如图 7 示, 频响更为平直. 图 8 为过采样率降低 4 倍的四阶噪声整形的频谱. 过采样率降低后, 高频噪声开始进入音频域. 以标准采样频 44100Hz 对 1000Hz 信号进行 6 比特线性 PCM 采样的频谱如图 9 示, 信噪比只有 50DB 左右. 而将经噪声整形的信号通入 6 比特 PCM 数字扬声器, 重放效果相当于 16 比特线性量化信号 (参见图 5).

5 结论

尽管先前的 PCM 数字换能器性能相当原始, 但根据我们的理论分析与计算机模拟结果, 我们有理由相信, 应用了过采样、噪声整形技术后, 数字换能器可以达到甚至超过传统换能器的性能, 从而解决声重放系统的瓶颈问题. 进一步的工作, 尤其是实验在进行中.

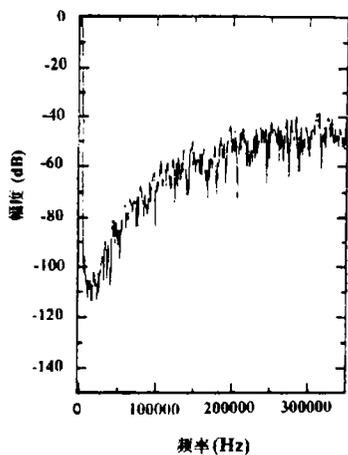


图 4 三阶噪声整形、全频带

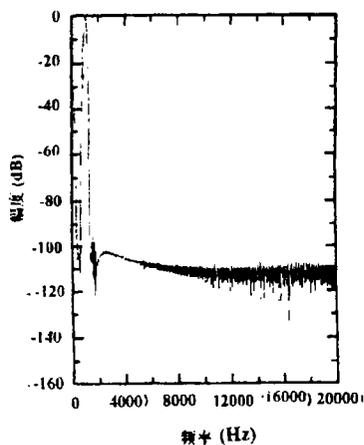


图 5 三阶噪声整形、音频

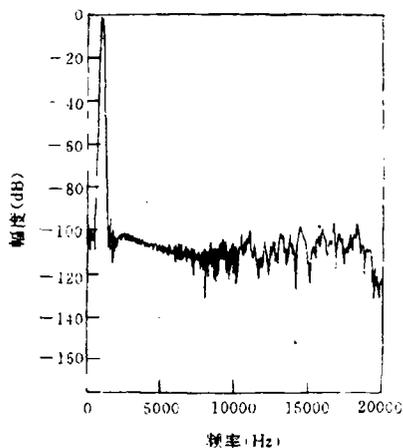


图 6 二阶噪声整形、16 倍过采样

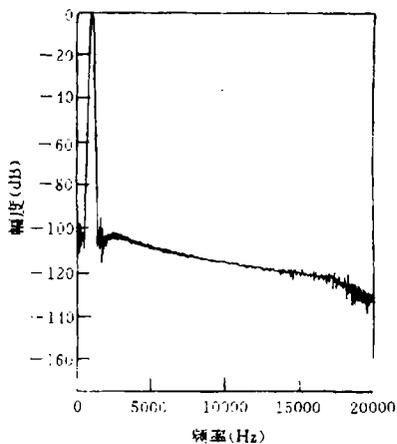


图 7 四阶噪声整形、16 倍过采样

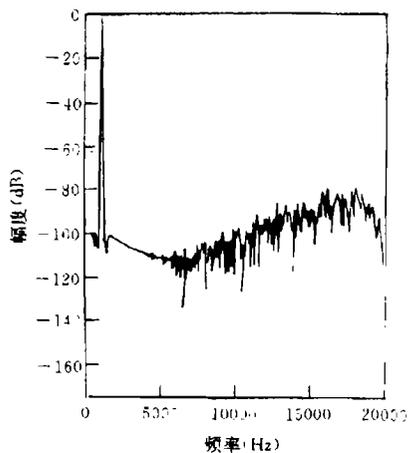


图 8 四阶噪声整形、4 倍过采样

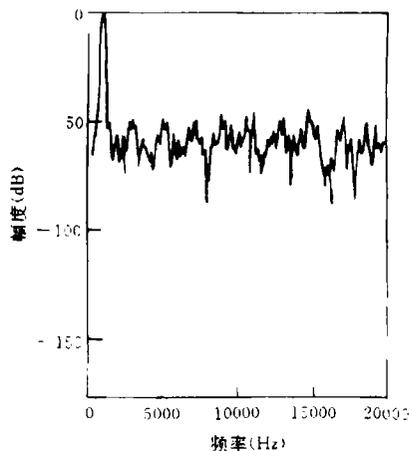


图 9 6bit 线性采样

(下转第 31 页)

实验结果可知, 温度与应力都对声速变化有影响, 且还能引起螺栓总长度的变化, 本实验范围内它们的变化都呈良好的线性关系. 反映到实际测量参数声时上, 声时变化也与应力、温度呈线性关系, 这是因为, (1) 声速或螺栓长度随应力或温度的相对变化幅度较小, (2) 本实验的应力、温度测量范围不是很大, 这是考虑到在常温条件下测量小于屈服点应力的情况较多的缘故. 这里特别应注意, 温度对整个螺栓的声速、长度有影响, 而应力仅在等效应力长度区间对声速、长度变化有影响. 准确给出了螺栓材料的线度或声速随应力及温度变化的关系, 就可能据此研究出实用的带温度补偿的智能型超声应力测试仪^[8], 且能够在不同的温度条件下给出由应力引起的螺栓伸长量.

5 结束语

采用声速法测应力的关键是要获得各种材料声速、声时与应力的关系, 而且还要区分温度造成的声速、声时变化. 由于在常温附近螺栓材料的声速、伸长量与应力、温度呈良好的线性关系, 本文将它们之间的关系归结为几个线性关系常数, 这为实用仪器的标定带来了便利, 它为超声波应力仪的推广奠定了基础.

用简单的以单片机为核心的声时、温度测量装置, 根据本文所述的关系系数测量与标定方法, 我们已研制出了适合工业应用的超声波

螺栓紧固应力自动测试仪, 仪器成本较低廉, 比较适合在我国推广, 该仪器可测螺栓的应力、紧固力及伸长量, 并能借助拉力机对待测螺栓材料自行标定, 这对超声波应力测试技术十分有利.

致谢 华东电力试验研究所的季献武、华北电力试验研究所的杨启璋与河北电力试验研究所的张道钢等为本项工作提供了许多帮助并参加了部分实验, 特致衷心的感谢.

参 考 文 献

- [1] Crecraft D I. Ultrasonic Measurement of Stress Ultrasonics, 1968, 6(2): 117.
- [2] Szilard J. Ultrasonic Testing: Non □ conventional testing techniques, Vail □ Ballou Press Inc., 1982, 437 - 458.
- [3] 冉启芳等, 用超声波方法测量螺栓应力, 固体力学学报, 1982, 3(1): 64.
- [4] 朱士明等, 超声波高温螺栓应力监测仪的研制, 同济大学学报, 1991 19(4): 433.
- [5] Bickford J H., Using ultrasonics to measure the residual tension in bolts, Experimental Techniques, 1988, (11):3
- [6] 刘镇清, 一种高精度超声波声速自动测量仪, 应用声学, 1994, 13(1): 29
- [7] Khimunin A S., Numerical calculation of diffraction corrections for the precise measurement of ultrasound phase velocity, Acustica, 1975, 32: 192
- [8] 刘镇清, 单片机为核心的超声波轴向应力仪, 工业仪表与自动化装置, 1993,(5): 49

(上接第 16 页)

参 考 文 献

- [1] J.L.Flanagan. Bell System Technical Journal, 1980, 59(9): 693 - 1719.
- [2] J.L.Flanagan. Bell System Technical Journal, 1979, 58(4): 903 - 941.
- [3] 稻永洁. 电声技术, 1984, 1: 28 - 32.
- [4] J.M.Goldberg, M.B.Sandler, Journal of Audio Engineering Society, 1991, 39(6), 49 - 460

- [5] 骆立俊, 邹家禄. 电声技术, 1993, 7: 22 - 28
- [6] Yusuyuki Matsuya, Kuniharu Uchimura, Atsushi Iwata, IEEE Journal Of Solid-state Circuits, 1989, 24(4), P969 - 975
- [7] Albert H.Nuttall, IEEE Transactions On Acoustics And Signal Processing, 1981, 29(1), 84 - 91
- [8] Stuart.K.Tewksbury, Robert W.Hallock, IEEE Transactions On Circuits And Systems, 1978, 25(7), 436 - 447