

基于现场可编程模拟阵列 FPAA 的音频均衡器设计

周 萍, 景新幸, 刘 卓

(桂林电子科技大学, 广西桂林 541004)

摘 要: 数字音频均衡器中最关键的部分就是滤波系统, 滤波系统精度的高低、效果的好坏直接决定着整台均衡器对音频的修饰效果. 本文采用开关电容技术的现场可编程模拟阵列 FPAA 构成的数字音频均衡器, 选择了一种全新构建音频均衡器的设计方法, 以求获得一个使用方便、音效调节效果好、成本低的音频均衡器系统. 开关电容椭圆函数滤波器的整体频率响应特性与标准曲线比较接近, 是一种较好的音频均衡器滤波器系统. 随着开关电容技术、电流模和电压模技术的进一步发展, FPAA 可广泛用于工控、医疗、仪器、高级音频、自动测试设备、汽车、通信等领域.

关键词: 音频均衡器; FPAA; 滤波器; 仿真

中图分类号: TN715

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2009) 01-0212-04

Design of Audio EQ Based on Field Programmable Analogy Arrays

ZHOU Ping, JING Xin-xing, LIU Zhuo

(Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The filter system is the most pivotal part of the digital audio equalizer; its precision and effect influence the whole audio equalizer performance. In this paper a new design method for audio equalizer is proposed, that is digital audio equalizer system based on Field Programmable Analogy Arrays (FPAA) of switch capacitance technology. With this method, the audio equalizer system will be greatly enhanced in convenience, efficiency and performance, low cost. The frequency responses of Elliptic function filters of switch capacitance is very closely to the ideal sound styles frequency response curves, which is a good system of the audio equalizer filters. With the further development of switch capacitance technology, current model and voltage model technology, FPAA will expect a considerable development and wider application in medical, instrument, senior audio, automatic test equipment, communications and motor vehicle etc.

Key words: audio equalizer; field programmable analogy arrays (FPAA); filters; simulation

1 引言

音频均衡器是一种可以分别调节声音各种频率成分电信号放大或衰减量的音频设备, 通过对不同声音频率的电信号的调节来补偿扬声器或声场的缺陷. 因此, 它能补偿由于各种原因造成的音频信号欠缺的频率成分、修饰各种声源及抑制音频信号中过多的频率成分.

目前市场上均衡器电路使用以恒定品质因子 Q 的为主, 使得均衡器的应用受到一定程度的限制; 当前均衡器的滤波器性能与无源器件的精度、温度变化特性密切相关, 因此高性能音频滤波器的制造需要大量非标准的高精度阻容器件, 制造成本较高; 由于采用的是分立元件和运算放大器构成的有源滤波器, 使得 31 段及以上均衡器整机电路中板卡占用面积大, 运放消耗功率可观, 均衡器整机体积大.

采用开关电容技术的现场可编程模拟阵列 FPAA

构成的数字音频均衡器, 其品质因子 Q 动态受控可调, 且 FPAA 采用的是高精度的开关电容技术, 不易产生温度和电压漂移, 可实时动态和静态进行编程, 使得音频信号处理的精度及效果的进一步提高成为可能.

2 音频均衡器

音频均衡器是专业音响处理设备之一, 它可以分段控制音频信号的增益与衰减, 其核心部分是连续的多频段带通滤波系统. 以 1 倍频程均衡器为例, 来确定均衡滤波器的频点与参数.

首先, 列出 20Hz 到 20kHz 的 1 倍频程均衡器频点如下: 20Hz、40Hz、80Hz、160Hz、320Hz、640Hz、1280Hz、2560Hz、5120Hz、10240Hz、20480Hz, 即 20Hz 到 20kHz 之间有 10 个音程. 以 20Hz 到 40Hz 这个音程为例, 推导 f_c 、 B 和 Q . 有 $f_2 = 2f_1$, 不难推出 $f_1 = 20\text{Hz}$, $f_2 = 40\text{Hz}$. 可推出: 第一个带通滤波器中心频率 $f_{c1} = \sqrt{20 \times 40}\text{Hz} = 28.28\text{Hz}$,

$B1 = f_2 - f_1 = 20\text{Hz}$, 由 $Q = f_c / B$ 得 $Q = f_c / B_1 = 28.28 / 20 = 1.414$.

再以 1/3 倍频程均衡器设计为例进行参数推导. 在此, 给出一个带通滤波器 - 3dB 开始频率, 推导终止频率的通用公式: $f_2 = \sqrt[m]{f_1}$, 其中 m, n 根据 m/n 倍频程均衡器取值. 1/3 倍频程均衡器将每一个音程分成 3 段, 由 3 个窄带通滤波器进行控制, 所以 20Hz 到 20kHz 频带被分为 30 个带通滤波器来控制, 并且有各带通滤波器质量因子 Q 恒为 4.318.

3 基于 FPAA 的开关电容滤波器设计

以二阶开关电容滤波器模块为基本单元构建带阻滤波器如图 1 所示.

电路传输函数为:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{-G_H s^2 - 4^2 f_0^2 G_L}{s^2 + \frac{2f_0}{Q}s + 4^2 f_0^2} \quad (1)$$

G_L : 低频增益; G_H : 高频增益; Q : 滤波器质量因子; f_0 : 截止频率;

当 $G_L = G_H$ 时, 带阻波谷频点 $f_{notch} = f_0$,

当 $G_L \neq G_H$ 时:

$$f_{notch} = f_0 \sqrt{\frac{G_L}{G_H}}$$

电路中开关电容选择须满足式(2)的限制条件:

$$f_0 \cong \frac{f_c}{2} \sqrt{\frac{C_2 C_3}{C_A C_B}}, G_L = \frac{C_1}{C_2} \quad (2)$$

$$G_H \cong \frac{C_{mp}}{C_B}, Q \cong \frac{C_B}{C_4} \sqrt{\frac{C_2 C_3}{C_A C_B}}$$

其中, f_c 为采样频率.

4 FPAA 音频滤波器设计与仿真

以基于开关电容技术的 FPAA 芯片 AN22E04 设计一个高精度、高稳定性的 20kHz 低通滤波器为例. 根据

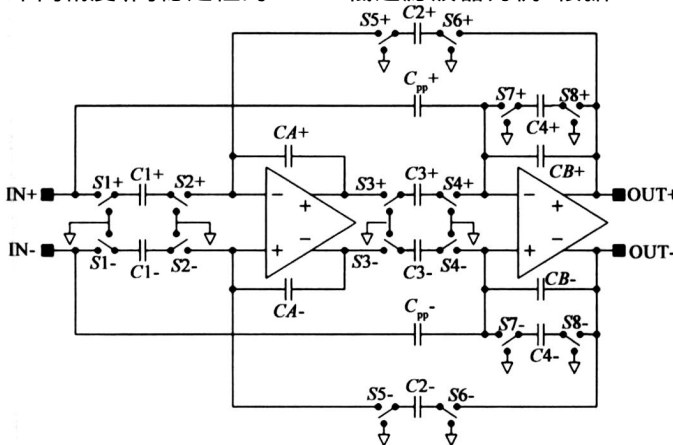


图1 二阶线性开关电容滤波器模块带阻原理图

要求^[1], 设定 20 kHz 低通滤波器的技术参数. 确认后即可生成能在一片 FPAA 芯片 AN22E04 上实现的 8 阶椭圆函数开关电容滤波器, 该滤波器由 4 个二阶带阻滤波器组成, 参数见表 1, 在 20kHz 的截止频率下, 采样频率在 200kHz ~ 8000kHz 可调.

20kHz 低通滤波器的频率响应、幅度响应与技术指标如图 2.

表 1 20kHz 低通滤波器模块参数表

模块编号	模块类型	滤波器类型	截止频率 (kHz)	低频增益	高频增益	质量因子
1	二阶开关电容滤波器模块	带阻	20.9	1	0.675	15
2			19.3	1	0.475	3.86
3			15.7	1	0.17	1.46
4			10.3	1	0.0103	0.609

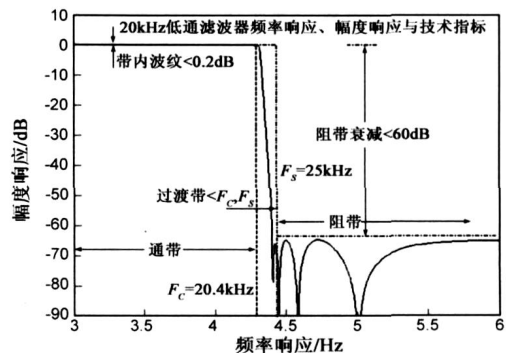


图2 20kHz低通滤波器的频率响应、幅度响应与技术指标

根据 Z 域四口等效电路对开关电容网络进行双口分析的理论, 利用常用双口 SC 网络单元积木的 Z 域四口等效电路, 建立 20kHz 低通滤波器的 Z 域等效电路, 这些 Z 域等效电路包括 3 种基本元件: 与开关电容值成反比例的等效电阻器、正“存储元件”和负“存储元件”. 将等效电阻器, 正“存储元件”及负“存储元件”用它们的连续时间等效电路代替, 就得到整个开关电容 20kHz 低通滤波器的频域仿真模型. 仿真结果如图 3、图 4 和图 5 所示. 从图中可以看到, 过渡带宽度为 4.4kHz, 在 25kHz 处的带外衰减大于 60dB, 0Hz ~ 20kHz 带内有 3 个波动点, 其最大波动为 0.2dB, 仿真结果符合 20kHz 低通音频滤波器的技术要求.

分析发现椭圆滤波器在过渡带下降曲线陡峭度上表现最好, 虽然引入了通带和阻带的带内波动, 但是对均衡器来说, 只要滤波系统的整体频率响应 - 3dB 通带带内波动小于 3dB 即是接受的. 椭圆滤波均衡器带通滤波系统参数如表 2.

在表 2 所示参数条件下, 每个带通滤波器都需要 3 个二阶开关电容滤波器模块级联, 即都是 6 阶滤波器, 均衡器带通滤波系统频率响应如图 3. 由图 3 可以看出带内波动小于 1dB, 过渡带 - 3dB ~ - 80dB 下降曲线陡峭度也比较理想. 但是, 响应曲线有明显的

波峰,峰值达到 6.3dB,为什么会造成这些波峰呢,以单个带通滤波器响应曲线为对照分析,如图 4 所示。

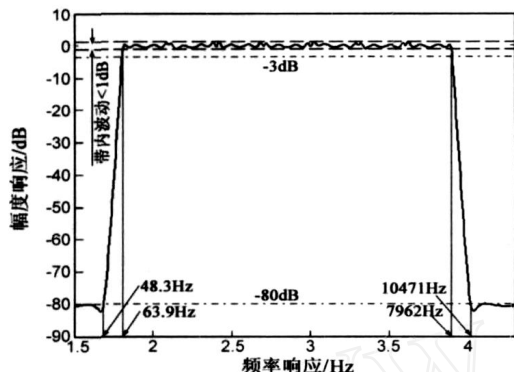


图3 椭圆滤波均衡器带通滤波系统频率响应

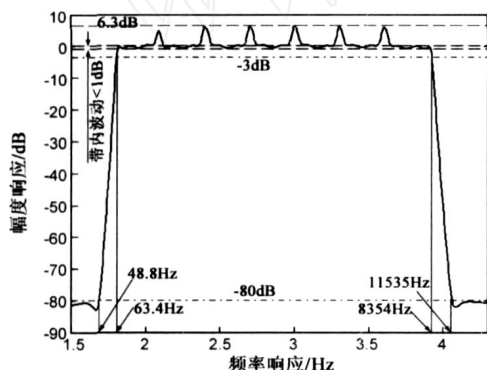


图4 均衡器各带通滤波器频率响应

表 2 椭圆滤波均衡器带通滤波系统参数

参数项目	BPF1	BPF2	BPF3	BPF4	BPF5	BPF6	BPF7
带内抖动 (dB)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
通带增益 (dB)	0	0	0	0	0	0	0
阻带衰减 (dB)	46	46	46	46	46	46	46
中心频率 (Hz)	89.1	178.2	356.4	712.8	1425.5	2851.1	5702.1
通带宽度 (Hz)	66.8	133.6	267.3	534.6	1069.1	2138.3	4276.5
阻带宽度 (Hz)	133.7	267.3	534.6	1069.1	2138.3	4276.6	8552.9
采样频率 (kHz)	2	5	6.25	12.5	25	50	100

表 3 椭圆滤波均衡器带通滤波系统调整后参数

参数项目	BPF1	BPF2	BPF3	BPF4	BPF5	BPF6	BPF7
带内抖动 (dB)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
通带增益 (dB)	0	0	0	0	0	0	0
阻带衰减 (dB)	46	46	46	46	46	46	46
中心频率 (Hz)	89.1	178.2	356.4	712.8	1425.5	2851.1	5702.1
通带宽度 (Hz)	57.5	114.9	229.9	459.7	919.5	1838.9	3677.8
阻带宽度 (Hz)	115.0	229.9	459.7	919.5	1838.9	3677.9	7355.5
采样频率 (kHz)	2	5	6.25	12.5	25	50	100

带通滤波器频率响应曲线带内波动和衰减陡峭度均比较理想,但是不同中心频率的带通滤波器响应曲线 0dB 点相交,出现在两个相邻带通滤波器交接处,显然是由于两相邻带通滤波器在交接频率段之间的相互加强引起的,为了使均衡器带通滤波系统整体响应曲线平稳,需要减少相邻滤波器之间的相互增益量,于是将带

通滤波器通带和阻带宽度进行适当压缩,使相邻带通滤波器响应曲线相交于 -3dB 附近,以消除波峰。调整后的参数如表 3。

通带宽度、阻带宽度调整后均衡器带通滤波系统频率响应如图 5。参数调整后频率响应曲线带内波动较调整之前有较大改进,通带内波动控制在 1dB 之内,过渡带下降曲线陡峭度也比较理想,但是较参数调整之前通带范围有所缩小,原因是中心频率为 89.1Hz 和 5702Hz 两个带通滤波器的通带和阻带压缩到了原来的 0.86,所以整个均衡器带通滤波系统的频率响应带宽也响应缩小,-3dB 带宽由调整前的(63.4Hz~8354Hz)压缩到调整后的(63.9Hz~7962Hz)。参数调整后各带通滤波器频率响应曲线相交点有所改变,基本在 -3dB 左右,截取部分频率响应曲线为例,如图 6 所示。

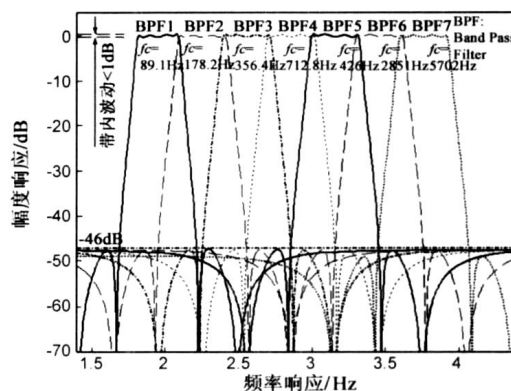


图5 调整后均衡器带通滤波系统频率响应

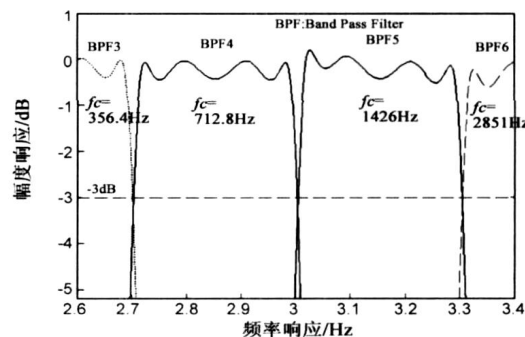


图6 调整后均衡器各带通滤波频率响应曲线交点

5 结论

本文通过对当前音频均衡器技术与现场可编程模拟阵列 (FPAA) 技术发展现状和应用状况的理解,从音频均衡器使用的方便性和有效性出发,选择了一种全新构建音频均衡器的设计方法,以求获得一个使用方便、音效调节效果好、成本低的音频均衡器系统。通过比较最后确定选取椭圆函数滤波器来设计 FPAA 音频滤波器系统,根据常用音效调节时,音频均衡器频率响应曲线特性,设计 FPAA 滤波器系统参数,并进行 FPAA 音频

带通滤波器系统整体频率响应曲线仿真,经过比较仿真曲线与标准音效频率响应曲线,发现用椭圆函数滤波器设计的 FPAA 滤波器系统的整体频率响应特性与标准曲线比较接近,所以选择基于 FPAA 技术的开关电容椭圆函数滤波器来实现本文所设计的音频均衡器滤波器系统。

参考文献:

- [1] 何亚宁. 基于现场可编程模拟阵列的音频测量滤波器的设计及实现[J]. 电声技术, 2005, 2: 34 - 36.
HE Ya-ning. Design and realization of audio test filter based on field programmable analog arrays [J]. Audio Engineering, 2005 (2): 34 - 36. (in Chinese)
- [2] R Timothy Edwards, Kim Strohhahn, Steven E Jaskulek. A field-programmable mixed-signal array architecture using anti-fuse interconnects [A]. ISCAS '2000 [C]. Geneva, Switzerland, 2000. 319 - 322.
- [3] 杨国田, 白焰. 摩托罗拉 Motorola 68HC12 系列微控制器原理、应用与开发技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
YANG Guo-tian, BAI Yan. Motorola 68HC12 Series Micro-Controller Principle, Application and Develop Techniques [M]. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2003. (in Chinese)

- [4] Kutuk H, KANG Sung Mo. A field-programmable analog array (FPAA) using switched-capacitor techniques [A]. 1996 IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. 1996, 4. 41 - 44.
- [5] 金印彬, 王建校. 现场可编程模拟阵列 AN10E40 的应用开发 [J]. 现代电子技术, 2004, (13): 13 - 16.
JIN Yinbin, WANG Jianxiao. Application of field programmable analog array AN10E40 [J]. Modern Electronic Technique, 2004, (13): 13 - 16. (in Chinese)

作者简介:



周 萍 女, 1961 年 6 月出生于山西大同, 桂林电子科技大学计算机与控制学院副教授、硕士生导师。主要研究方向智能控制与语音识别, 发表论文 20 余篇。

景新幸(通信作者) 男, 1960 年 7 月出生于湖北省武汉市, 桂林电子科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向是宽带综合网络和语音识别, 已发表论文 50 余篇。Email: jingzhou@gliet.edu.cn