

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108030

音频多段均衡处理算法研究与 DSP 实现*

姚丽娜 马天阳

(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

摘要: 针对音频不同播放设备的频率响应不同的特点,设计了一种用于音频频率均衡调节与噪声消除的 Equalizer 算法并在 DSP 上进行实现。基于数字信号处理时域滤波原理,设计了不同频段可通的 IIR 低通及高通滤波器,不同频段设置不同的增益,输入音频经过 IIR 滤波器后的输出信号进行叠加,实现音频在不同频率处能量改变的调节效果;同时设计了单独且可控的噪声抑制器,其由 50 阶的 FIR 带阻滤波器组成,用于指定频率的噪声衰减。测试表明,该算法最高可处理 16 kHz 的 16 Bit 数字音频信号,实现了对特定频段噪声的滤除。

关键词: 音频处理;DSP;频率均衡;时域滤波;FIR;IIR

中图分类号: TN99 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4040

Research on Audio multi-band equalization processing algorithm and DSP realization

Yao Lina Ma Tianyang

(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the different characteristics of the frequency response of different audio playback devices, the Equalizer algorithm for audio frequency equalization adjustment and noise elimination is designed and implemented on the DSP. Based on the principle of time-domain filtering in digital signal processing, the IIR low-pass and high-pass filters that can pass through different frequency bands is designed. Different frequency bands are set with different gains. The output signal after the input audio passes through the IIR filter is superimposed to realize the audio regulating effect of energy changes at different frequencies; at the same time, the separate and controllable noise suppressor is designed, which is composed of a 50-order FIR band-stop filter for noise attenuation at a specified frequency. The test shows that the 16 Bit digital audio signal up to 16 kHz can be processed, and the filtering of noise in a specific frequency band is achieved.

Keywords: audio processing; DSP; frequency equalization; time domain filtering; FIR; IIR

0 引言

数字音频在现代生活中无处不在,随着互联网和媒体技术的发展以及物联网基础建设的兴起,数字媒体广泛应用于云监控、网络直播、远程对讲等多种场景。目前基于 PC 和移动终端等特定平台以及基于云服务器的数字媒体处理系统被广泛采用^[1]。

数字音频处理算法的硬件实现有很多种,例如常用的 FPGA 实现, FPGA 可以静态重复编程和在线调试,大大提高产品的容错率,但这是以牺牲硬件成本和能源效率为代价的。因此, FPGA 的资源利用率通常低于专用芯片^[2]。此外, DSP 以其适合数字信号处理的软硬件资源在市场上

占有主导地位。使用 DSP 芯片开发数字音频处理设备,兼顾了 FPGA 资源利用率低和专用音频处理芯片开发周期长的缺点,在现代数字信号处理领域广为应用^[3]。文献[4]提出了一种基于 TMS320C5402 的数字语音处理系统,在 DSP 处理器上载入基于小波分析的语音特征处理算法,提取语音信号中的噪声。文献[5]提出一种心肺音分离系统,利用 DSP 处理器采用基于小波变换的迭代多分辨率分解-多分辨率重构(MRD-MRR)分离算法对心肺音信号进行分离而后分别输出对应的音频。文献[6]提出了一种可定制的噪声监控插件,利用滤波器、时间和图形均衡算法提供多种场景的噪声监控和数据收集功能。

以上文献利用 DSP 对各类声音信号进行频率特征提

收稿日期:2021-10-09

* 基金项目:国家自然科学基金(61902301)、陕西省教育厅科学研究计划(21JK0661)项目资助

取、分析和分离等处理,其主要目的是抑制或分离语音信号中的噪声^[7]。为了改善音频播放听感,利用 DSP 时域滤波对音乐的某些频段进行增益或衰减,进而实现音频均衡及频率调节的效果。综上,提出了一种音频多段均衡处理算法,通过数字处理改变声音在不同频段的能量分布从而实现数字音频调节。模拟音频由高清音频编解码芯片完成采集,通过 DSP 处理器对数字音频进行频率均衡及其他数字处理,然后经音频编解码芯片完成数模转换并功率放大后进行输出,实现了音频信号的片上处理。均衡处理算法的 DSP 实现为电子产品的音频处理提供了新的解决方案。

1 声学特性

人耳主观上对声音的听觉由声音的响度、音色和音调组成。从音频的信号学角度,音频特性对应的主要特征为振幅、频率和音频信号所分解的基波类型。不同基波类型的信号在听觉上往往表现为声音的不同音色成分。听觉神经利用耳部生理结构将音频播放输出的声音转化为生物电信号一直传导到大脑皮层,于是听觉形成^[8-9]。

研究发现,高频频率会增加空间临场感,而低频部分包括语音信号的基音和乐器、节奏等的主音,通过音频处理手段改变音频的频率成分往往使声音的音色有明显变

化。在一些场景,为了使音频输出的频率响应更加接近原始频率,会结合播放设备的频率响应对输入音频进行频率域的调节^[10-11]。本系统实现了高低音调节的均衡效果,根据听觉特性设置了以 1 kHz 为高低频分界点的一个 IIR 低通滤波器和 IIR 高通滤波器,这两个滤波器配合各自不同的增益可调节输出音频的声学效果。除此之外,音频处理功能上设计了一个 FIR 带阻滤波器实现对特定频率的滤波削减。

2 算法与仿真验证

整个音频处理的频率均衡部分利用声学原理,通过对音频进行频带划分,不同频带的音频设置相应的增益,从而改变其不同频带的能量分布,达到改变主观听感的效果。

考虑到音频传输对实时性的要求,在处理数字音频时避免了进行离散傅里叶变换(DFT)的频域处理,而是通过时域滤波完成频带分离,在算法设计中选用了无限长脉冲响应(IIR)滤波器并联和有限长脉冲响应(FIR)滤波器组合的方法实现对输入音频的时域滤波,从而将输入音频的不同频段划分为不同信号。滤波器的频率响应范围根据声学特征设定。音频频率处理部分主要处理过程和连接关系如图 1 所示。

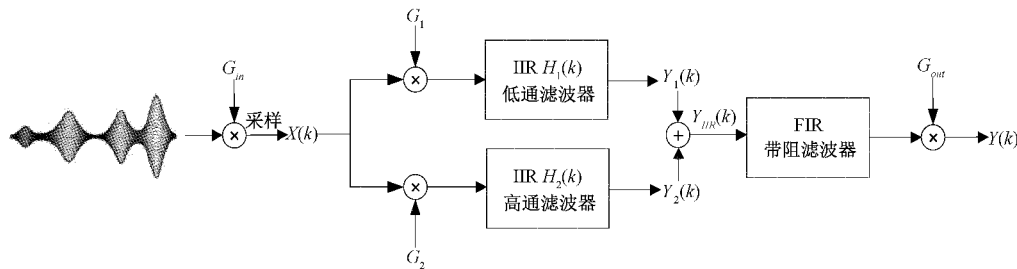


图 1 音频频率处理过程原理

模拟音频经过采样进行前级模拟放大, G_m 为采样系统的增益,将模数转换后的离散数字音频 $X(k)$ 送入滤波系统中,分别送入多个频带的 IIR 滤波器进行频段划分,输入 IIR 滤波器的信号增益决定了输出音频在不同频段的能量, G_1 和 G_2 在图 1 中分别表示了低频和高频的输出增益: G_1 值越大, $Y_1(k)$ 能量越高,输出信号 $Y_{IR}(k)$ 中低频能量越高; G_2 值越大, $Y_2(k)$ 能量越高,输出信号 $Y_{IR}(k)$ 中高频能量越高。采集到的数字音频经过两个并行的 IIR 滤波器之后对输出信号 $Y_1(k)$ 和 $Y_2(k)$ 累加得到频率均衡处理后的数字音频 $Y_{IR}(k)$ 。若需要对全频段进行更精确的频率控制,则划分多个频段分别设计其对应频段 IIR 滤波器的起始截止频率及中心频率,常见的音频处理器中有 10 段、20 段甚至 30 段多段均衡处理^[12]。当采用多个滤波器并联实现均衡 EQ 效果时可将最低频段的滤波器设置为低通型,最高频段设置为高通型,其余中间不同频段均设置为带通型 IIR 滤波器,可实现音频全频段的频率调节。

理论上,设 IIR 滤波系统传递函数 $H_{IR}(k)$, 输入音频

通过滤波系统输出如式(1)所示。

$$Y_{IR}(k) = X(k) * H_{IR}(k) \quad (1)$$

式中: $Y_{IR}(k)$ 为采集到的数字音频通过多个并联 IIR 滤波器组成的 EQ 频率均衡系统输出信号; $X(k)$ 采集到的原始离散数字音频; $H_{IR}(k)$ 为频率均衡系统的脉冲传递函数。

结合频带的划分及频带滤波增益,设 IIR 滤波系统中每一个频带对应的滤波器传递函数为 $H_i(k)$, 最终输出 IIR 滤波系统、输入 FIR 滤波器时的信号时域表示如式(2)所示。

$$Y_{IR}(k) = \sum_{i=1}^{BandNum} G_i * (X(k) * H_i(k)) \quad (2)$$

同样式(2)中 G_i 后的“*”表示信号与增益值的乘积,而 $X(k)$ 后的“*”表示输入信号与该频段滤波器响应的卷积。其中 $BandNum$ 表示划分的频带个数,在该 IIR 滤波系统中 $BandNum$ 为 2; G_i 表示对应频带的增益; $H_i(k)$ 为对应频段的滤波器脉冲传递函数, $H_i(k)$ 可以表示为式(3)所示。

$$H_i(k) = \frac{Y_i(k)}{X(k)} = \frac{\sum_{m=0}^N b_m k^m}{1 - \sum_{m=1}^N a_m k^m} \quad (3)$$

转换到时域该频段滤波器的单位脉冲响应如式(4)所示。

$$Y_i(k) = \sum_{m=1}^N a_m Y_i(n-m) + \sum_{m=0}^N b_m X(n-m) \quad (4)$$

根据 IIR 滤波系统的结构,两个 IIR 滤波器并联组成的无限长冲激响应滤波器在时域的单位冲击响应表示如式(5)所示。

$$Y_{IIR}(k) = G_1 * Y_1(k) + G_2 * Y_2(k) + \dots + G_n * Y_n(k) \quad (5)$$

经过频率均衡处理后的信号 $Y_{IIR}(k)$ 经过一个独立使能控制的 FIR 带阻滤波器,用于滤除特定频段的干扰噪声,如街道嘈杂环境的声音、工厂或机房等设备运转的噪声、音频输入源的电源噪声等。该 FIR 滤波器为固定 50 阶的带阻滤波器。

在 MATLAB 中载入一段采样率为 16 K 的 0.1~3 kHz 周期为 1 s 的扫频正弦波音频信号模拟需要处理的数字音频,其时域波形如图 2 所示。

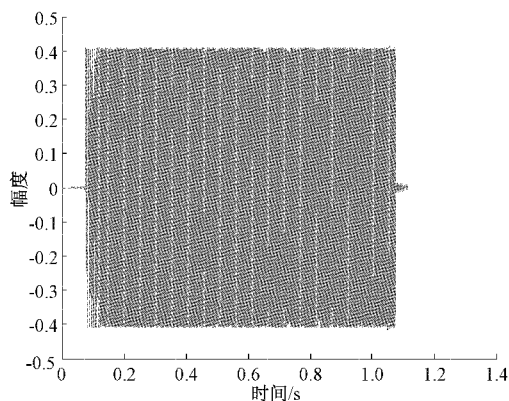


图 2 数字音频扫频信号波形

频率处理系统中设计的 IIR 低通及高通滤波器的阻带截止频率均为 1 kHz,低频增益 G_1 为 1.5,高频增益 G_2 为 0.8。输入信号经 IIR 滤波器组进行分频后输出两种不同频段的信号频谱如图 3 所示。

图 3 中低通滤波器输出与高通滤波器输出进行累加后输入到一个通带截止频率 1 kHz 和 1.5 kHz,阻带截止频率为 1.1 kHz 和 1.3 kHz 的带阻滤波器,最终输出波形 $Y(k)$ 频谱与输入波形 $X(k)$ 频谱如图 4 所示。

图 4 中输出信号频谱为经分频调节和带阻滤波处理后的系统输出。图 3 和 4 的结果可以看出,输入信号在 0.1~3 kHz 频率上均匀分布,经 IIR 滤波器的输出已经对源信号进行了分频和相应频段的能量改变,最终整个系统输出 $Y(K)$ 可见在 1 kHz 以下幅值被放大,1 kHz 以上幅值被缩小,放大和缩小倍数与增益 G_1 和 G_2 对应。同时滤

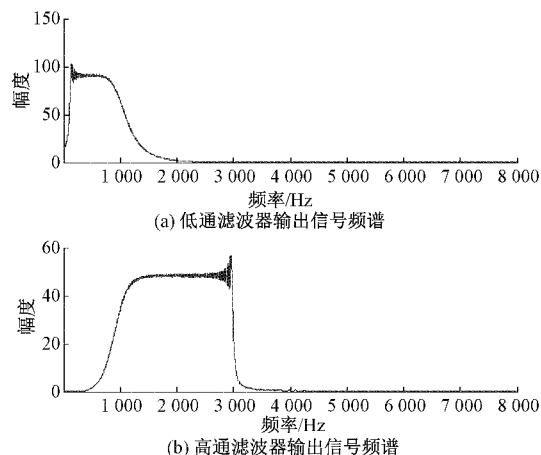


图 3 IIR 滤波器对原始音频分频后的输出信号频谱

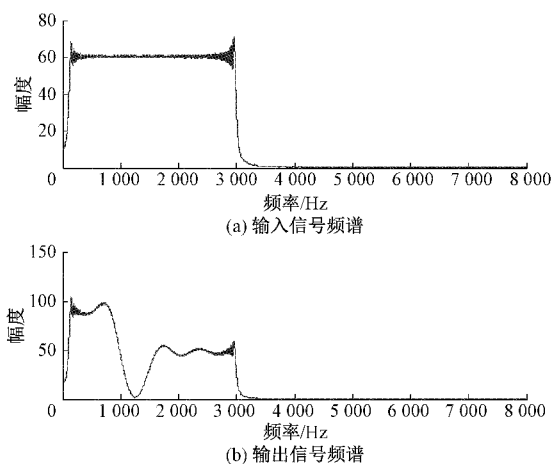


图 4 系统输入输出信号频谱

除了 1.1~1.3 kHz 频段的音频信号。

3 音频处理的 DSP 实现

DSP 从 AIC23 芯片获取采集到的数字音频数据并进行处理,其简要外围通信接口和连接关系如图 5 所示。



图 5 DSP 通信方式连接关系简图

其中,DSP 芯片通过 SPI 通信方式与 AIC23 完成音频数据的接收与发送,通过 I²C 通信完成对 AIC23 的寄存器配置,设置采样频率、输入输出增益及数据格式等。

3.1 数字音频采集

数字音频采集部分采用德州仪器的 TLV320AIC23 芯片,内部采用先进的 $\Sigma-\Delta$ 过采样技术,集成了模数转换器可以在 8~96 kHz 的采样率下提供 16~32 Bit 的采样数据,同时集成了数模转换器用于音频输出,其具有很低的功耗^[13]。

采样时增益大小有 $-34.5 \sim +12$ dB 步长为 1.5 dB 的 31 个增益等级,向 AIC23 发送采样输入音量设置值,可以通过如下语句设置:

```
AIC23Write(0x00,0x0018); //左声道输入音量控制
```

其中第 1 个参数为写入寄存器地址,第 2 个参数为写入该寄存器的值,包含了音量控制方式与音量增益值。

DSP 处理器通过 I²C 接口与 AIC23 通信,发送相关控制参数,在初始化完成后设置左右声道输入增益、采样深度、采样率、SPI 通信模式、使能采样芯片内部的滤波器等。数字音频通过 SPI 通信方式与 DSP 的 MCBSP 进行传输,设计中 AIC23 选用固定的 16 Bit 采样深度对线路音频输入进行采样,便于保存声音细节以及 DSP 处理。AIC23 初始化配置完成后按照设定采样率间隔逐个点向 DSP 发送采样数据,此时 DSP 使能了 McBSP 中断来响应这些数据。

3.2 DSP 数字音频处理

DSP 处理器选用 TMS320F28335 对数字音频进行滤波、反相、数字增益调节等操作。TMS320F28335 在 30 MHz 外部时钟输入下运行主时钟最高可达 150 MHz,具有丰富的外设资源,其 McBSP 具有允许全双工通信、允许连续数据流的双缓冲数据寄存器用于接收和发送的独立成帧和时钟、包括 8/12/16/20/24 或者 32 位在内的宽数据尺寸选择、以 LSB 或者 MSB 开头的 8 位数据传输的特点,兼容与 AIC23 芯片定义的高速串行通信方式^[14]。

DSP 接收到采集的音频数据后,对数据进行缓存、数字处理和传输,其处理流程如图 6 所示。

DSP 从 AIC23 接收到第 1 个音频数据采样点开始,在片内缓存至 A 地址。当缓存够 512 个 16 Bit 采样点的数据时,根据 DSP 工作参数判断是否需要频率均衡及滤波等数字处理;如果不需要,将 A 中的数据直接备份至地址 F(输出数据缓存区)中,否则,将 A 地址中缓存的 512 个数据备份至 B 地址空间内,将 B 地址内存储的数据依次传入两个 IIR 滤波器完成滤波输出在地址 C 和地址 D 中,其代码如下。

```
//IIR
for (i=0; i<IIRNUMBER; i++)
{
    fOut += (fXn[i] * fAn[i]);
    fOut += (fYn[i] * fBn[i]);
}
```

然后根据是否使能内部独立的 FIR 滤波器,将频率均衡处理后地址 C 和 D 中的数字音频进行相加,存储在地址 E 中,将地址 E 中的数据送入 FIR 滤波器进行降噪,最终输出在地址 F 中,FIR 滤波器滤波过程中采用了乒乓式分段滤波算法,可以有效地避免在当前滤波算法执行过程中造成的输入数据被抛弃的现象,其关键代码如下。

```
//FIR 滤波过程
AD_Array_A[AD_Array_Load_Location]=AD_Value;
```

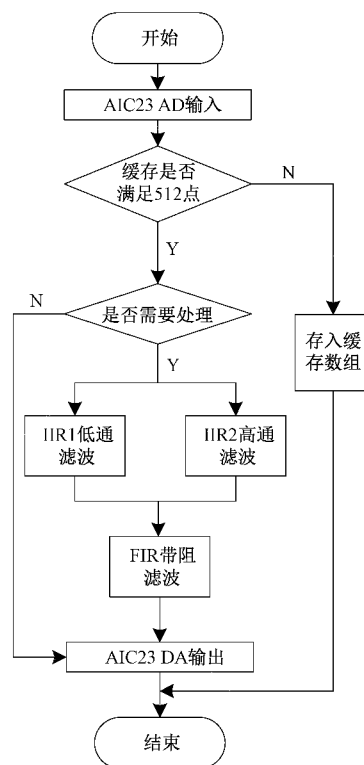


图 6 DSP 音频处理程序流程

```
DA_Valuc=DA_Array_C[AD_Array_Load_Location];
if(AD_Array_Load_Location>AD_Bankup_Array_Start_Load_Location)
{
    AD_Bankup_Array_A[AD_Bankup_Array_Load_Location++] = AD_Array_A[AD_Array_Load_Location];
}
```

处理完成后的音频数据会存储在输出缓存区的地址 F 中等待音频输出。最后逐个在音频采样的中断 MCBSP 处理程序中将地址 F 中的数据按位发送给 AIC23 进行波形重建并功率放大后输出^[15]。

4 测试与结果分析

为了验证音频处理算法的有效性性与硬件可行性,分别测试了 DSP 在不同滤波参数下对音频的处理过程。模拟音频通过 AUX 线路音频接口输入给 AIC23 芯片的 Line_IN 通道,音频经过 DSP 处理后由 AIC23 进行数模转换且功率放大后在 Line_OUT 口输出。针对输出音频,在该接口上使用 48 kHz 数字音频专用设备进行输出音频波形录制,对录制的波形进行幅频特性分析,与输入 DSP 系统的音频幅频特性进行对比,从而得出该数字音频处理系统的系统响应。

在 DSP 处理器中设计一个通带和阻带截止频率均为

1 kHz 的高通和低通 IIR 滤波器(5 阶),分别调整两个频段的增益大小,输入频带范围为 0~20 kHz 的白噪声信号,

通过对 DSP 输出的音频信号进行录制与功率谱计算分析, DSP 处理后输出音频的功率谱密度分布如图 7 所示。

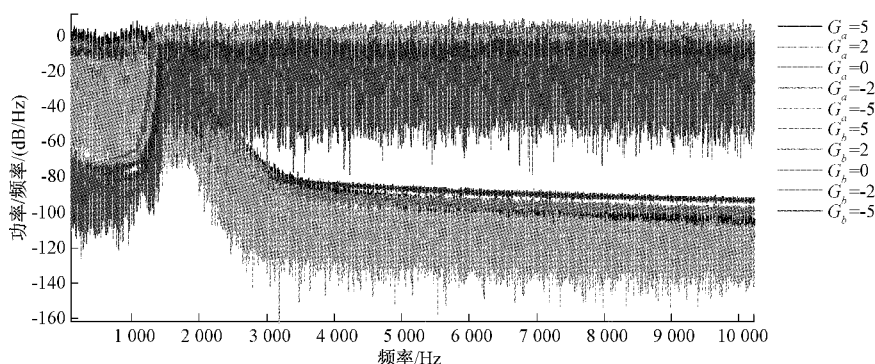


图 7 不同频段和增益的 IIR 输出信号功率谱密度

图 7 中 G_a 表示低通滤波器输出信号的增益, G_b 表示高通滤波器输出信号的增益,可以看出输出音频在各频带的不同增益下呈现出不同的能量分布。两组输出进行叠加,在全频范围内高低频能量由 G_a 与 G_b 决定。

DSP 处理程序中打开可以独立使能的 50 阶 FIR 带阻滤波器,设置滤波器的不同参数,模拟输入音频的噪声消除处理,其滤波器具体参数如表 1 所示。

表 1 50 阶 FIR 带阻滤波器参数表

参数	通带 1/ Hz	阻带 1/ Hz	阻带 2/ Hz	通带 2/ Hz	通带衰减/ dB
A	3 300	3 450	3 750	3 900	-40
B	3 300	3 450	3 750	3 900	-50
C	3 300	3 450	3 750	3 900	-70
D	3 200	3 450	3 750	4 000	-50

载入不同参数时 FIR 滤波器可以对输入音频的不同频率进行不同程度的衰减处理。同样在 DSP 模拟音频输入端加载一个人耳听觉范围的白噪声信号,对其输出音频进行录制与频谱分析如图 8 所示。

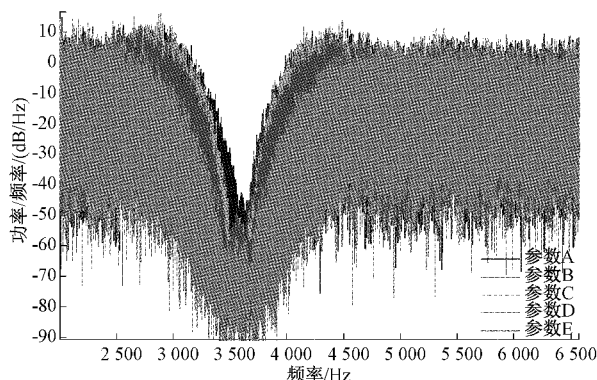


图 8 FIR 带阻滤波器输出信号的功率谱密度

图 8 为 5 个不同滤波器参数下输出信号的功率谱密度分布,可以看出利用 FIR 滤波器可以在指定噪声频段进行

不同程度的噪声移除,其中衰减带宽与衰减倍数可调。

输入音频进行频率调节再经过带阻滤波后最终的输出如图 9 所示。输入信号为白噪声,滤波参数为:1 kHz 为高低频分界点,低频进行 1 dB 增益,高频进行 10 dB 衰减,被滤除噪声的中心频率为 1 800 Hz,阻带带宽为 300 Hz。图 9 所示为 DSP 数字音频处理系统输出信号的功率谱密度分布,反映了该系统的音频频率响应特性。

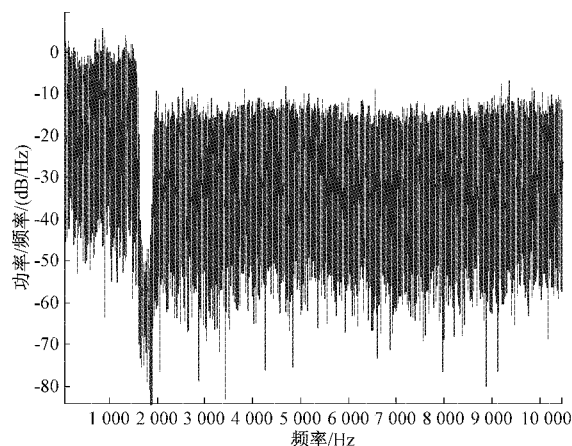


图 9 DSP 数字音频处理系统输出信号的功率谱密度

综合图 7~9 的测试结果,得出当音频经过 DSP 后可通过高通和低通两个通带的 IIR 滤波器进行频带分离,对不同频带进行不同增益,相加后进行 FIR 带阻滤波,最终可得到系统输出。频率均衡中每个频带可以进行 5 dB 的正负增益调节来完成音频在该频段的能量分布。因此, DSP 音频处理系统可以完成频带分离、均衡调节及噪声抑制功能,达到设计目标。

5 结 论

本文在论述数字信号处理在音频频率均衡方面应用的基础上,基于数字音频处理理论展开其 DSP 硬件实现的方案设计与实现过程。从 IIR 和 FIR 两种经典滤波算法

入手分析了数字音频处理过程中频率均衡算法及在 DSP 硬件平台中实现的理论依据,并在对算法可行性进行仿真验证的基础上使用 CCS 开发平台编写 DSP 硬件实现程序达到设计功能。经过测试,该算法可实现在 16 kHz 采样率下对输入音频的高低频频率进行 ± 5 dB 的增益调节,并可开启一个独立的 50 阶 FIR 带阻滤波器完成对特定频段噪声的滤除,输出音频真实反映输入音频的频率与幅度特性,满足音频处理的实时性要求,实现了基于 DSP 硬件的音频频率均衡处理。

参考文献

- [1] 龚俊怡,朱蕴璞,宋成桥. 嵌入式无线音频采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(4): 74-78.
- [2] 陈勇. 一款高性能数字音频处理器的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
- [3] 李声飞. 基于 FPGA+DSP 架构的数字音频处理技术研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2018, 18(1): 6-10.
- [4] 但晔. 基于 DSP 的数字音频处理系统设计及实现[D]. 成都:成都理工大学, 2013.
- [5] 陈茜茹,钟清华,张涵,等. 基于 DSP 的心肺音分离系统研究[J]. 现代电子技术, 2019, 42(6): 92-95.
- [6] PYPHER T. Innovative approach to noise monitoring using programmable audio DSP[J]. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2018, 258(6): 1795-1800.
- [7] 刘炜杰,梁晋华,张涛. 音频场景识别中非对称卷积和知识迁移方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 168-173.
- [8] 周加成. 虚拟低音主观听感和成分的关系[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [9] 周朝坤. 车载音响音频处理系统的研究与 DSP 实现[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
- [10] VIRGULTI M, CECCHI S, PIAZZA F. IIR filter approximation of an innovative digital audio equalizer[J]. International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis(ISPA), 2013, DOI:10.1109/ISPA.2013.6703776.
- [11] 朱占龙,刘永军,赵战民,等. 用于分割无损检测图像的改进的抑制式模糊 C 均值聚类算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 110-118.
- [12] KHODADADI A, MOLAEI S, TEIMOURI M, et al. Classification of audio codecs with variable bit-rates using deep-learning methods[J]. Digital Signal Processing, 2020, 110(5): 10-29.
- [13] 章瑾,冯平. 影视动画配音节奏特征自动提取系统设计[J]. 现代电子技术, 2020, 43(18): 59-63.
- [14] 宋耀东,于淼,杜雪,等. 采用 TMS320F28335 的多节点 CAN 总线通信设计[J]. 电子设计工程, 2021, 29(7): 171-175.
- [15] 党智乾,乔琳君,曹海红,等. 基于 AD8515 的低压低功耗音频放大电路的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19): 144-147.

作者简介

姚丽娜, 硕士, 主要研究方向为嵌入式系统与应用、信号与信息处理。

E-mail: dxyln0223@163.com

马天阳, 本科, 主要研究方向为电子信息系统。

E-mail: yang5928@foxmail.com