

使用集成 miniDSP Audio DAC 实现音效处理功能

董冰 Bing Dong

South China OEM Team

摘要

PCM5242 是 TI 推出的集成 miniDSP 的低功耗音频 DAC，采用 TI 先进的 Sigma-Delta DAC 架构实现高音频动态范围和极低的输出噪声，集成 charge-pump 实现 DirectPath™ 功能，输出端无需隔直电容，减小对音频信号低频部分影响，可在低功耗条件下为电池供电的便携式产品提供高性能的音频回放和处理能力，本文详细介绍了在使用 PCM5242 时遇到的问题并且提供了具体的解决方案，可以帮助客户和工程师理解芯片架构并且防止问题的发生，文中包含 Purepath Studio 中模块调节音效的原理及使用方法，如何实现用户自定义 EQ 功能及解决 44K-192K 范围内音频文件切换 pop-noise 问题和设计注意事项。

目录

1. 集成 miniDSP 的 Audio DAC 简介	1
2. PCM5242 在 playback 模式中的应用	2
2.1. PurePath Console 2(简称 PPC2)在 PCM5242 Playback 模式中的应用	2
2.2. PurePath Studio (简称 PPS) 在 PCM5242 Playback 模式中的应用	3
2.2.1. Biquad 模块.....	3
2.2.2. I2S 输出模块	4
2.2.3. Volume 音量控制模块.....	5
3. Adaptive 模式.....	6
3.1. 功能	6
3.2. miniDSP 内存地址存取规范.....	6
3.3. miniDSP adaptive mode 下参数更新流程.....	6
4. 常见问题分析及解决方案.....	7
4.1. 更改 EQ 造成的 reference scale 偏移问题	7
4.2. 采样频率和 LRCLK 不匹配造成频点偏移问题	8
4.3. 支持切换不同采样率音频文件的控制流程.....	9
5. 参考文献	10

1. 集成 miniDSP 的 Audio DAC 简介

PCM5242 具有一个 miniDSP 内核对 I2S 输入的数字信号进行处理。miniDSP 可以通过用户编程灵活实现多段均衡(Multi-Band EQ)，动态范围压缩(Dynamic Range Compress)，心理低音增强(Psychoacoustic Bass Enhancer)等算法，适用于 Hi-Fi mp3, 蓝牙音箱，Wifi 音箱等智能音频播放设备。如 Figure 1 所示，输入 I2S 数字信号经过 volume control 模块进入 miniDSP 实现音效处理，为提高 DAC SNR 性能采用插值滤波器对数字信号处理，经 Sigma-Delta DAC 转成模拟信号后作为模拟音频输出。

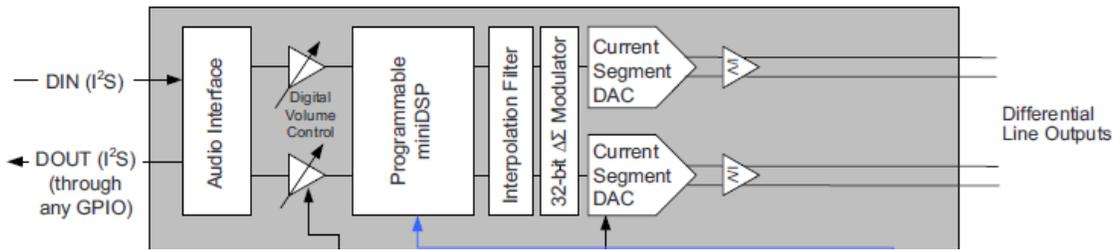


Figure 1 PCM5242 miniDSP /DAC 结构框图

TI 集成 miniDSP 可用户编程的 Audio DAC/Audio power amplifier 有以下器件：
PCM5141/ PCM5142/ PCM5242
TAS5754/TAS5756/TAS5766

2. PCM5242 在 playback 模式中的应用

2.1. PurePath Console 2(简称 PPC2)在 PCM5242 Playback 模式中的应用

PPC2 集成了功能控制模块和 miniDSP 配置模块两个部分。功能控制模块包括对时钟，数据格式，输入输出的配置。MiniDSP 模块可以让用户对 miniDSP 中实现的算法(EQ,DRC,DDE.....)进行系数的修改。PPC 中提供了七种 Hybrid Flow 预设模式，分别适用于不同的场合。每当用户选择其中某个 Hybrid Flow 的时候，这个 Hybrid Flow ROM 镜像可以在 DSP 内的 RAM 中运行，用户直接调用预设模式，只需要更改算法中参数，无需更改 miniDSP 算法配置流程架构，使用方便。缺点在于灵活性差，用户无法手动修改所需要的功能模块，无法满足定制化的需求，并且在高采样率可以支持的 EQ 数目有限。

如 Figure 2 所示支持 96K sampling rate 的 Hybrid Flow 7 中只可以实现 5 个 EQ，在支持 192K sampling rate 的 Hybrid Flow 5 中只可以实现 1 个 EQ，这对于在高采样率依然需要多 EQ 调节的用户是没有办法满足需求的。关于 Hybrid Flow 使用方法参考 Using the TAS5754/6M and PCM5242 Hybrid Flow Processor <http://www.ti.com/lit/ug/slau577a/slau577a.pdf>

当用户在 PPC2 中完成器件的配置之后选择界面中的 Direct I2C Read/Write ->Register Dump->Output file->.h 即可生成初始化文件，通过 MCU 直接写入器件即可实现功能。

Feature	HybridFlow 1	HybridFlow 2	HybridFlow 3	HybridFlow 4	HybridFlow 5	HybridFlow 6	HybridFlow 7
Supported Output Configurations							
Typical Target Application	Mid-Level DTVs & General Audio	Mid-Level DTVs & General Audio	Bi-Amped Bluetooth® and Active Speakers	Bluetooth Speakers and Wireless Subs	Hi-End Digital TVs	Docking Stations, All-in-One PC, & General Audio	Mid-Level DTVs, Soundbars, & General Audio
Supported Sample Rate	8–48 kHz	8–48 kHz	8–48 kHz	8–48 kHz	192 kHz	8–48 kHz	96 kHz
Psychoacoustic Bass Enhancer (PBE)	✓	x	✓	✓	x	x	x
Output Configurations (Stereo/Mono)	Stereo	Stereo	1.1	Mono	Stereo	Stereo	Stereo
DRC Type	3-Band Componder	3-Band Componder	3-Band Componder	3-Band Componder	DRC-Lite	3-Band Componder	3-Band Componder
Biquad Equalizers (In Full-Range Path)	2 × 12	2 × 12	1 × 10 + 1 × 5	1 × 12	2 × 12	2 × 12	2 × 5
PurePath SmoothClip	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sound Field Spatializer (SFS)	x	x	x	x	x	✓	x
Dynamic Dialog Enhancer (DDE)	x	✓	x	x	x	x	x
Dynamic Bass Enhancer (DDE)	✓	✓	✓	✓	x	✓	x
Serial Audio Data Out (Subwoofer, Full-Range)	FR	SW or FR	SW or FR	FR	SW or FR	FR	FR

Figure 2 Hybrid Flow 功能参考

注：在高采样率的下EQ 调节会占用更多的miniDSP 资源，并且在 HybridFlow 5 和 Hybrid Flow 7 中都实现了DRC 功能，经过测试DRC 消耗 miniDSP 指令内存资源非常严重，所以如果用户不需要使用DRC 的功能，使用 Hybrid Flow 5 和 Hybrid Flow 7 对于 miniDSP 的资源来说是一种浪费。

2.2. PurePath Studio (简称 PPS) 在 PCM5242 Playback 模式中的应用

如果用户想自己更加灵活的添加删减 miniDSP 内音效处理功能，可以不采用 PPC 中给出的 Hybrid Flow 的几种配置流程，TI 提供了 PPS 软件供客户进行自定义功能配置。PPS 中将用户常用的 EQ,DRC,DDE 等功能封装成了模块形式，提供图形化界面方便用户进行编程。Figure 3 是典型的 playback 音乐回放模式下的 PPS 的流程配置，以下分别对每个模块功能进行详细阐述。

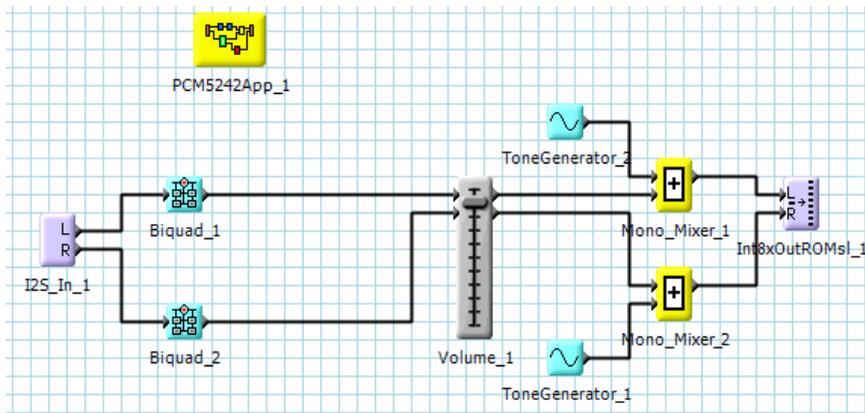


Figure 3 PPS 中控制流程在 playback 模式 中的应用

2.2.1. Biquad 模块

用户自定义调节 EQ 的频点,增益,Q 值，每个 Biquad 最多可以实现 10 个 EQ 频点的配置。Biquad 基本结构是采用 miniDSP 构建的 IIR 滤波器，传递函数如 Equation 1。每次在 Biquad 中加入一个频点的 EQ 信息，就会增加一级 IIR 滤波器，所以在一个 Biquad 模块内部是实现了 10 个 IIR 滤波器级联的构架，如 Figure 4 所示

$$H(z) = \frac{B_0 + 2B_1Z^{-1} + B_2Z^{-2}}{2^2z^3 - 2A_1Z^{-1} - A_2Z^{-2}} \tag{Equation 1}$$

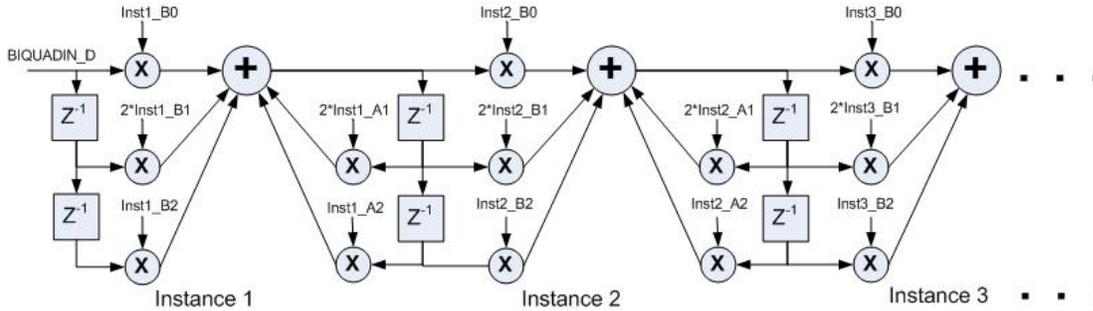


Figure 4 Biquad 模块架构

通过修改每一级 IIR 滤波器的系数 A0,A1,A2,B1,B2 实现需要的频点,增益和 Q 值。每次更改 EQ 参数 apply 后,在 PPS 的 properties->Runtime Properties 中会看到更新后的 IIR 滤波器的参数。这些参数的更改都是在 miniDSP 的系数内存中实现的,指令内存中的数据没有任何更改,所以每次更新 EQ 只需要更改系数寄存器参数即可,如 Figure 5。为了防止切换时产生的 pop 声,可采用 adaptive mode 进行切换,详见 3. Adaptive 模式。

Inst1_B0	0.9999988079071044921875
Inst1_B1	-0.902244091033935546875
Inst1_B2	0.8219683170318603515625
Inst1_A1	0.91279947757720947265625
Inst1_A2	-0.839632511138916015625
Inst2_B0	0.98699474334716796875
Inst2_B1	-0.95964467525482177734375
Inst2_B2	0.9999988079071044921875
Inst2_A1	0.95964467525482177734375
Inst2_A2	-0.98699474334716796875
Inst3_B0	0.996688365936279296875
Inst3_B1	-0.98255097866058349609375
Inst3_B2	0.97111034393310546875
Inst3_A1	0.98255097866058349609375
Inst3_A2	-0.9677989482879638671875

Figure 5 PPS 中更新的 miniDSP 中参数

2.2.2. I2S 输出模块

音频 DAC 中采用的是 Sigma-Delta modulator +Interpolation filter 的架构。Sigma-Delta modulator 用来实现对信号的调制和噪声整形, Interpolation filter 实现对输入数字信号的插值和滤波。插值滤波器的时钟是由 I2S 中的 Master clock 提供。这就决定了对应不同采样率可以采用的最大插值倍数。如 Figure 6 所示,对于 48K/96K sampling rate 可以采用 In8XOutROMsl,即 8 倍插值模块,但是对于 192K sampling rate 只能采用 In2XOutROMsl,即 2 倍插值模块,对于 384K sampling rate 不能调用插值模块。

Sampling Mode	Sampling Frequency (f _s) kHz	Oversampling Rate (OSR)
Single Rate	8	8 or 16
	16	
	32	
	44.1	
	48	
Dual Rate	88.2	4 or 8
	96	
Quad Rate	176.4	2
	192	
Octal Rate	384	1 (Bypass)

Figure 6 采样率和过采样倍数

若对 48K 的 sampling rate，采用 In2XOutROMsl(2X interpolation filter) 或者 In4XOutROMsl (4X interpolation filter)也是有音频信号输出的，但是这会导致 Sigma-Delta Modulator 的频率改变，造成很大的谐波失真，测试得到的 THD+N 的指标异常。采用 In8XOutROMsl (8X interpolation filter)失真只有 0.008%，测试指标正常。AP 测试如 Figure 7。

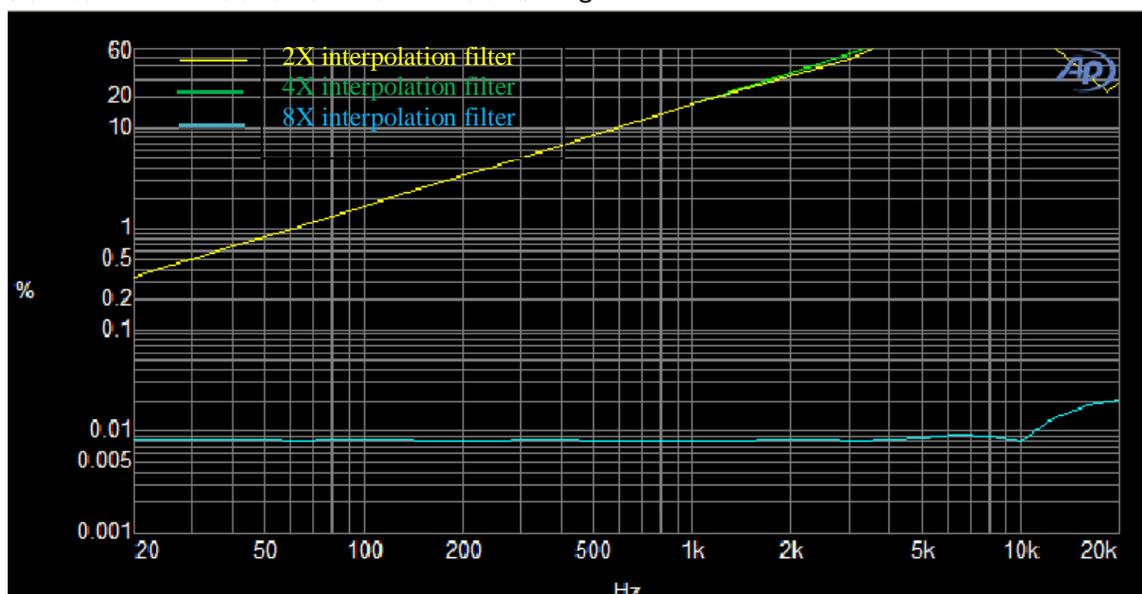


Figure 7 不同插值倍数下 THD+N vs frequency 曲线

2.2.3. Volume 音量控制模块

PCM5242 的 page0/Register 61 和 page0/Register 62(非 miniDSP 映射寄存器)可以分别控制左右声道的音量。用户可以通过调用上层函数控制这两个寄存器达到对音量调节的功能，但是用户也需要在 miniDSP 的配置流程里面加上一个音量控制模块，目的可以用来补偿由于添加 EQ 造成的 reference scale 偏移问题，参见 4.1.2.

3. Adaptive 模式

PCM5242 的 miniDSP 的内存分为指令内存（Instruction RAM）、数据内存（Data RAM）和系数内存（Coefficient RAM）三类。指令内存和系数内存是可以通过映射的 I2C 地址来进行读写。如 Figure 8，关于 miniDSP 的寄存器是在 page44-186。其中 page44/register1 是系数内存 控制寄存器,page44/register2-page70 是系数内存映射地址。系数内存分成了两块，我们称为 buffer-A 和 buffer-B。page 152-page 186 是指令寄存器，指令寄存器一般只有在 PPS 内的控制流程结构改变的时候才会发生变化。在配置 EQ/音量参数的时候，指令寄存器参数不变，只有系数寄存器改变。

Page 44	
1	Coefficient memory (CRAM) control
Pages 44 - 52	Coefficient buffer - A (256 coeffs x 24 bits) : See Table 47
Pages 62 - 70	Coefficient buffer - B (256 coeffs x 24 bits) : See Table 48
Pages 152 - 186	Instruction buffer (1024 instruction x 25 bits), I512 - I1023 are reserved.: See Table 49
Pages 187 - 252	Reserved

Figure 8 miniDSP 寄存器列表

3.1. 功能

允许用户在 miniDSP 工作，DAC 输出时实时修改内存参数的值，满足实时调节音效，修改 EQ 的功能，并且无中断无 pop-noise。

3.2. miniDSP 内存地址存取规范

在 Non-Adaptive mode 模式下，在同一时刻系数的内存地址只能被 IIC 接口或者 miniDSP 中的一种占用。如果需要用 IIC 读取系数内存地址数据，必须先让 miniDSP 释放锁定的系数内存地址，但是会导致声音中断。

在开启 Adaptive mode 模式下，miniDSP 中 Buffer A 或者 Buffer-B 只有一个被 DSP 锁定。IIC 就可以读写未被锁定的 buffer 中寄存器值，更新系数内存参数，然后切换 buffer，完成切换动作。这样可以有效防止 pop 声。

3.3. miniDSP adaptive mode 下参数更新流程

miniDSP 运行时，系数内存的其中一个 Buffer 被 miniDSP 锁定，控制端口无法直接修改该 Buffer 内的参数。客户需要先更新未锁定 Buffer 内的参数，然后通知 miniDSP 切换 Buffer 来使用新的参数。切换后原先被锁定的 Buffer 将被释放，用户需要对它更新相同的参数以确保两块 Buffer 的参数同步，至此 adaptive mode 完成，实现切换 EQ 动作。

以 PCM5242 为例，若要实现切换 EQ 操作，配制流程如下：

- 在 PPS 中 Dump 未更改 EQ 的初始化文件，更改所需 EQ 系数，导出更新后配制文件。
- 在初始化文件中开启 adaptive mode, page 44/register 1 写入 0x04.
- 比较得到的初始化文件和更新 EQ 后文件差异，命名为 update EQ file,并写入未被 miniDSP 锁定的 Buffer.
- 切换 Buffer 输出，page 44/register 1 写 0x05.
- 读取 Page 44/register1 bit 0 判断是否切换完成.
- 延时 30ms, 更新系数至被 miniDSP 释放掉的 buffer.

4. 常见问题分析及解决方案

4.1. 更改 EQ 造成的 reference scale 偏移问题

当用户需要在高频点加一个 Q 值较小的 EQ 时，可能会造成 Reference Scale 下降的问题。对比 Figure 9 和 Figure 10 发现当 EQ 参数为 FC=16k, Gain=6dB, Q factor=1.6 的时候会造成 Reference Scale 从 0dB 明显减小至 -2.6dB(Linear 0.74),使得在 16K 频点地方实际推高的增益只有 3.4dB 左右。并且由于整体的 reference Scale 减小，造成其他频点的增益同时下降。这是因为推高在高频点的 EQ 增益时候造成 miniDSP 的增益控制寄存器溢出，miniDSP 的响应保护机制降低 reference scale 的值以达到防止溢出的效果。

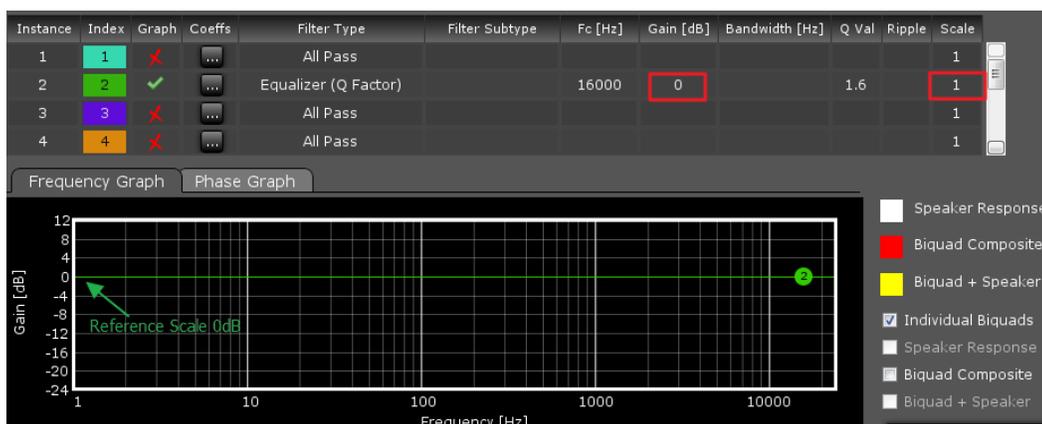


Figure 2 FC=16k, Gain=0dB, Q factor=1.6 EQ 曲线

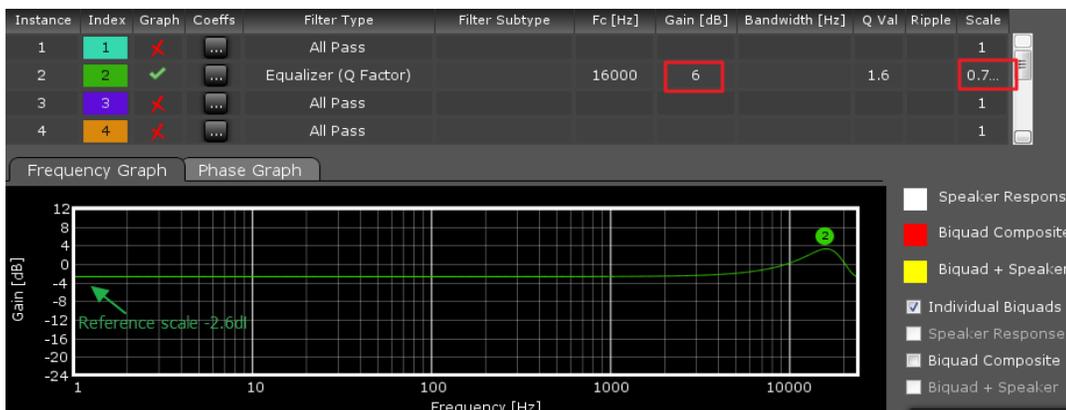


Figure 3 FC=16k, Gain=6dB, Q factor=1.6 EQ 曲线

• 解决办法 1

在满足用户听感需求的情况下提高 Q 值。当 Q 值提高到 20 的时候，reference Scale 只减少了 0.3dB(Linear 0.965)，基本可以保持整个频带内的增益不会发生明显减小，如 Figure 11。



Figure 11 FC=16k, Gain=6dB, Q factor=20 EQ 曲线

• 解决办法 2

采用在 miniDSP 流程里面加 volume control module 的方法进行增益补偿。由于 16K 频点处的 EQ 使得 Reference Scale 减小了 2.6dB，所以在 volume 模块中补偿上 2.5dB 的增益，如 Figure 12

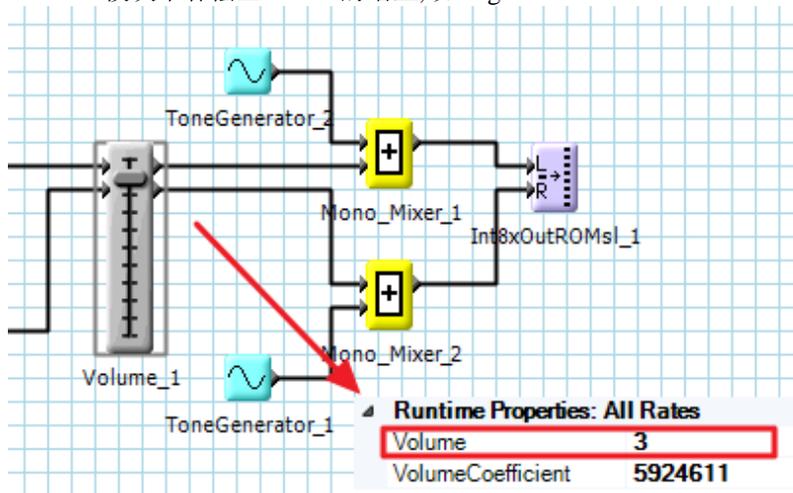


Figure 12 FC=16k, Gain=6dB, Q factor=1.6 增加 volume 补偿功能

4.2. 采样频率和 LRCLK 不匹配造成频点偏移问题

若 I2S LRCLK 时钟不同于 PPS 中配制 EQ 时选择的 sampling rate 时钟，会造成扫描出来的频响曲线和目标频点成比例的发生偏移。如 Figure13，可以看到当 LRCLK 频率是 PPS 中配制 EQ 时所用采样率一半的时候，所有频点值变为目标值的 1/2,当 LRCLK 频率是 PPS 中配制 EQ 时所用采样率二倍时，所有频点值变为原来目标值的二倍。我们可以凭此经验判断预设 EQ 频率发生偏移时的问题原因。

目标频点:

frequency	62Hz	160Hz	400Hz	1KHz	2KHz	8KHz	16KHz
-----------	------	-------	-------	------	------	------	-------

Gain	+3dB	+2dB	-2dB	-2dB	0dB	+4dB	+4dB
------	------	------	------	------	-----	------	------

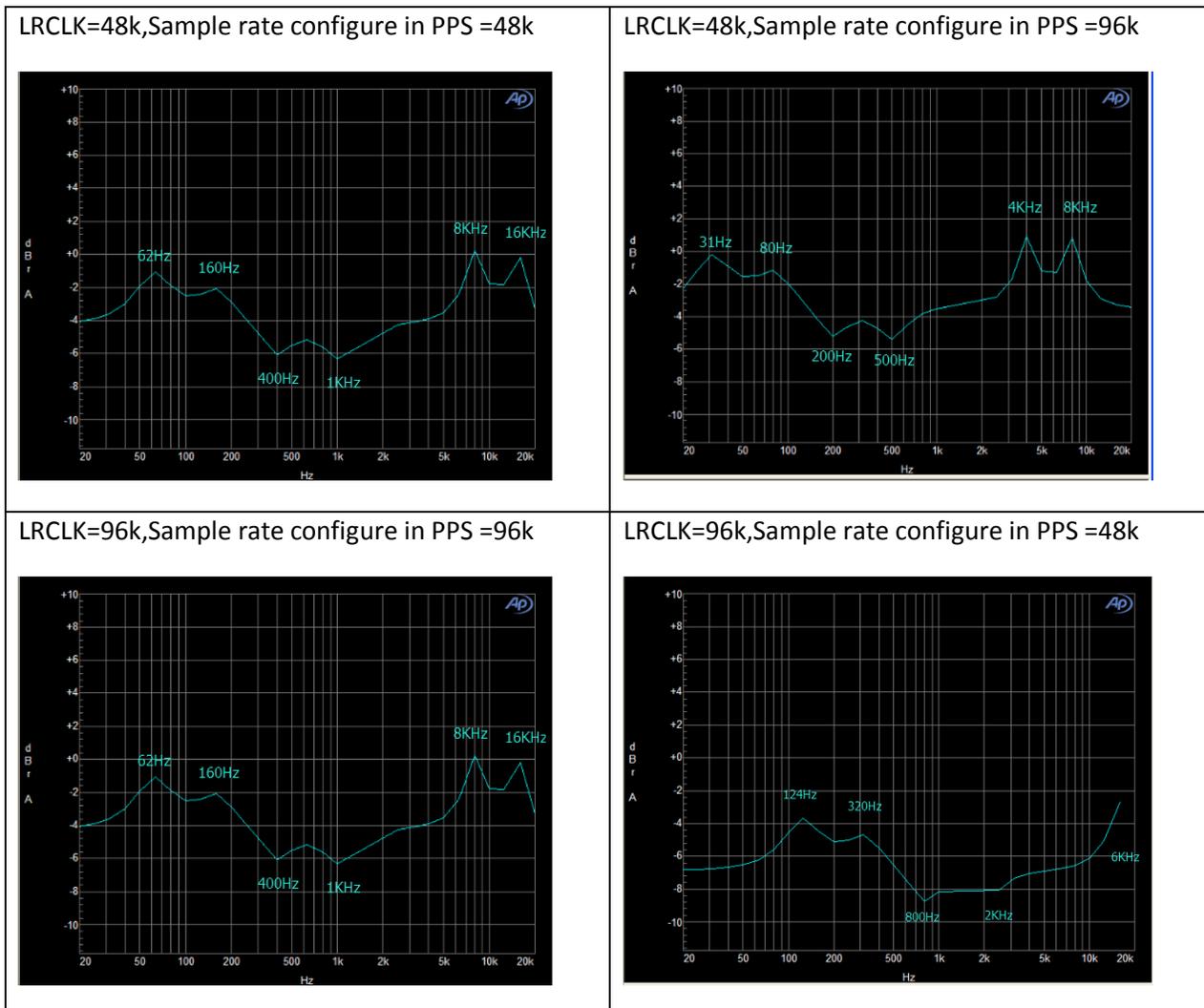


Figure 13 时钟不匹配造成频点偏移曲线

4.3. 支持切换不同采样率音频文件的控制流程

- 从 48K 采样率音频文件切换到 96K 采样率文件

在 2.2. 的配置流程里面 48K/96K 采样率采用的是 In8XOutROMsl I2S 输出，miniDSP 配置流程架构完全相同，内部的指令寄存器内存参数完全一致，只有系数寄存器改变，所以可以采用 Adaptive mode 切换歌曲，保证无 pop-noise 问题。

- 从 48K/96K 采样率音频文件切换到 192K 采样率文件:

在 2.2. 的配置流程里面 48K/96K 采样率采用的是 In8XOutROMsl I2S 输出，而在 192K 采样率下采用的是 In2XOutROMsl I2S 输出。这会使得当切换到 192K 采样率的时候 miniDSP 的指令内存参数发生

改变，没有办法用 adaptive mode(adaptive mode 适用于只有 miniDSP 系数内存发生改变的情况)模式切换歌曲，只有重新写入支持 192K 的 miniDSP 指令和系数内存才可以实现切换。为了保证重新写入切换过程中不会出现 pop-noise 问题，提供切换流程如下：

- 使能 soft mute 功能，page0/register 0x03 写 0x11
- 控制 miniDSP 进入 standby 模式，page0/register 0x02
- 执行 miniDSP 192K 采样率初始化文件
- 控制 miniDSP 关闭 standby 模式，进入正常工作模式
- 关闭 soft mute 功能

PCM5242 提供两种 mute 功能，分别是 analog mute 和 soft mute 功能。analog mute 由于会直接将模拟输出下拉至地造成在 disable/enable mute 的时候产生微小 pop 声，所以建议使用 soft mute 功能。Soft mute 提供了 soft attenuation ramp 功能，实现每个周期只衰减 1dB 的 mute 方式，有效防止 pop noise.

注：PCM5242 有 zero data detect 功能，当连续监测 0x00 信号超过阈值时间后会自动进入 analog mute，可以通过控制 page0/register 65 关闭 zero data detect 功能，防止在全 0 数据的时候自动进入 analog mute 功能，引起微小 pop 声。

5. 参考文献

1. 使用 TI miniDSP Codec 提升智能手机的音频效能 (ZHCA113)
2. Using the TAS5754/6M and PCM5242 HybridFlow Processor(SLAU577A)
3. PCM5242 4.2-VRMS DirectPath™ , 114-dB Audio Stereo Differential-Output DAC with 32-bit, 384-kHz PCM Interface datasheet.

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接侵权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated