

## TI 数字音频功放中数字滤波器的灵活应用及调试

Jacky Wang

North West China OEM Team

### 摘要

本文介绍了 TAS57xx/TAS58xx 中功率 I2S 输入音频功放内部集成的数字滤波器针对信号处理的灵活应用及调试技巧，方便用户深入了解这些数字滤波器的工作原理及使用调试方法，丰富产品的使用功能及音效体验。

### 目录

<b>1</b>	<b>TAS57xx/TAS58xx 系列数字音频功放内置数字滤波器简介</b> .....	<b>2</b>
1.1	FIR 滤波器的实现形式及特点 .....	2
1.2	IIR 滤波器的实现形式及特点 .....	3
<b>2</b>	<b>TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放内置数字滤波器应用及实现</b> .....	<b>4</b>
2.1	FIR 滤波器在 TAS5805M/25M 数字音频功放中的应用 .....	4
2.2	IIR 滤波器在 TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放中的应用 .....	6
<b>3</b>	<b>TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放中 IIR 滤波器的其它应用</b> .....	<b>10</b>
3.1	使用 IIR 滤波器进行 EQ 增益补偿 .....	10
3.2	使用 IIR 滤波器进行单位时延控制 .....	10
<b>4</b>	<b>小结</b> .....	<b>11</b>
	<b>参考文献</b> .....	<b>11</b>

### 图例

<b>Figure 1.</b>	<b>直接形式的 N 阶离散时间 FIR 滤波器拓扑</b> .....	<b>2</b>
<b>Figure 2.</b>	<b>直接 I 型 P 阶 IIR 滤波器拓扑</b> .....	<b>3</b>
<b>Figure 3.</b>	<b>TAS57xx/TAS58xx 内置的直接 I 型 2 阶 IIR 滤波器拓扑</b> .....	<b>4</b>
<b>Figure 4.</b>	<b>TAS5805M 内置的 128 Taps FIR 滤波器调试界面</b> .....	<b>5</b>
<b>Figure 5.</b>	<b>16 Taps FIR 滤波器系数格式示例</b> .....	<b>5</b>
<b>Figure 6.</b>	<b>TAS5751M EQ 滤波器 PPC3 GUI 调试界面示意</b> .....	<b>9</b>
<b>Figure 7.</b>	<b>TAS5805M EQ 滤波器 PPC3 GUI 调试界面示意</b> .....	<b>9</b>
<b>Figure 8.</b>	<b>IIR 滤波器采用 BQ_A_b0 Mixer 进行 EQ 增益补偿示意</b> .....	<b>10</b>
<b>Figure 9.</b>	<b>3.23 格式浮点数增益换算示意</b> .....	<b>10</b>
<b>Figure 10.</b>	<b>利用 TAS57xx/TAS58xx IIR Filter 实现 2 个采样周期的时延</b> .....	<b>11</b>

## 1 TAS57xx/TAS58xx 系列数字音频功放内置数字滤波器简介

TAS57xx/TAS58xx 系列数字音频功放以其丰富的内置音频处理资源和优异的参数指标，目前被广泛应用于各类消费类音频产品中，像数字电视、便携式无线音箱、条形音箱以及智能音箱等等。该系列音频功放支持数字 I2S 音频接口输入，片上集成丰富的数字音频处理功能，像数字音量控制、EQ、Mixer 以及 DRC 等等，极大地方便了用户针对特定的扬声器单元进行最优化的声音调试。其中，EQ 滤波器（又称为 Biquad Filters）是使用最为频繁及常见的针对扬声器频响以及音效进行补偿的数字信号处理模块。

数字滤波器根据实现形式及不同的特性表现，主要可分为 FIR 滤波器（Finite Impulse Response）和 IIR 滤波器（Infinite Impulse Response）两种。TAS57xx/TAS58xx 系列数字音频功放根据内置的 DSP 资源不同，两种类型的滤波器都有采用，但主要以 IIR 类型为主。

### 1.1 FIR 滤波器的实现形式及特点

FIR 滤波器因对脉冲信号的响应持续有限时间而得名，对脉冲信号的响应最后会在有限的时间内趋向于 0。FIR 滤波器输入与输出的传递函数如式 1 所示：

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n-1] + \dots + b_Nx[n-N] = \sum_{i=0}^N b_i \cdot x[n-i], \quad \text{式 1}$$

其中：

- $x[n]$ 为输入信号
- $y[n]$ 为输出信号
- $N$ 代表滤波器的阶数
- $b_i$ 是滤波器的冲激响应，通常称为滤波器的系数

常见的直接形式的  $N$  阶离散时间 FIR 滤波器的拓扑如图 1 所示，其它类型的拓扑形式可参考其它文献<sup>[5]</sup>的相关介绍：

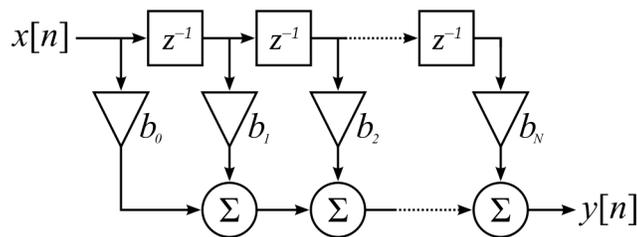


Figure 1. 直接形式的  $N$  阶离散时间 FIR 滤波器拓扑

图 1 中， $Z^{-1}$  为单位延迟（Unit Delay）， $b_0 \sim b_N$  为滤波器系数。FIR 滤波器从传递函数上看无需反馈回路，具有精确的线性相位特点以及固有的稳定性，可以设计成任意幅度、相位响应的滤波器并最优化。主要缺点在于实现特定功能的滤波器时消耗的 DSP 资源比较多，需要较多滤波器系数以及高阶数带来的信号时延问题。

## 1.2 IIR 滤波器的实现形式及特点

与 FIR 滤波器相对应，由于反馈回路的引入，IIR 滤波器对脉冲信号的响应是无限延续的而得名。IIR 滤波器输入与输出的传递函数如式 2 所示：

$$y[n] = \frac{1}{a_0} (b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_P x[n-P] - a_1 y[n-1] - a_2 y[n-2] - \dots - a_Q y[n-Q])$$

$$= \frac{1}{a_0} \left( \sum_{i=0}^P b_i x[n-i] - \sum_{j=1}^Q a_j y[n-j] \right), \quad \text{式 2}$$

其中：

- P 为前馈滤波器阶数
- $b_i$  为前馈滤波器系数
- Q 为反馈滤波器阶数
- $a_i$  为反馈滤波器系数
- $x[n]$  为输入信号
- $y[n]$  为输出信号

常见的直接 I 型的 P 阶 IIR 滤波器的拓扑如图 2 所示，其它类型的拓扑形式可参考其它文献<sup>[6]</sup>的相关介绍：

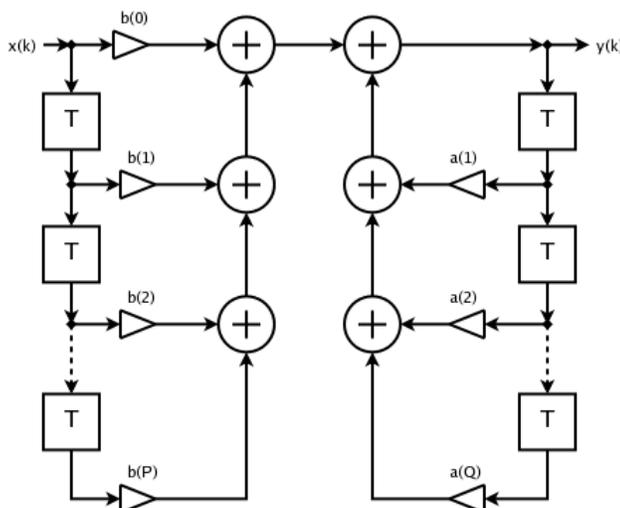


Figure 2. 直接 I 型 P 阶 IIR 滤波器拓扑

图 2 中，T 为单位延迟（Unit Delay）， $b_0 \sim b_p, a_1 \sim a_q$  为滤波器系数。与 FIR 滤波器相比，由于反馈回路的引入，设计的滤波器比较难以实现最优化，同时，由于 Z 变换后引入的极点不一定全部位于单位圆内，会存在稳定性的问题，只能实现有限类型的幅频响应滤波器设计。IIR 滤波器的好处在于对于实现给定功能的滤波器，所消耗的 DSP 资源最少，例如 TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放中常用的二阶直接 I 型 IIR 滤波器只有 5 个系数（ $b_0 \sim b_2, a_1 \sim a_2$ ），如图 3 所示。

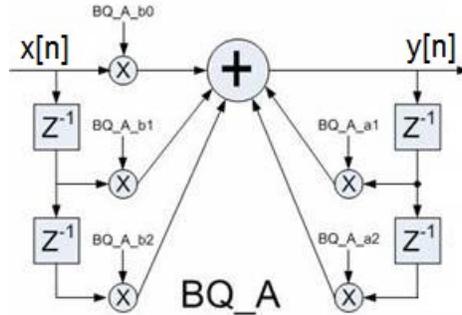


Figure 3. TAS57xx/TAS58xx 内置的直接 I 型 2 阶 IIR 滤波器拓扑

## 2 TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放内置数字滤波器应用及实现

### 2.1 FIR 滤波器在 TAS5805M/25M 数字音频功放中的应用

由于 FIR 滤波器所占用的 DSP 资源较多，目前发布的 TAS57xx/TAS58xx 系列音频功放产品中只有基于  $\mu$ CDSIP 新一代 TAS5805M/25M 数字音频功放开放了一段最多支持 128 抽头（Taps）的 FIR 数字滤波器模块，其系数  $b_0 \sim b_{127}$  可直接由 Matlab 生成，按照格式由 TAS5805M/25M 对应的 PPC3（Pure Path Console 3）数字功放调试软件导入使用。PPC3 FIR 滤波器调试界面如图 4 所示：



Figure 4. TAS5805M 内置的 128 Taps FIR 滤波器调试界面

由于 FIR 滤波器设计的灵活性，在实际使用时往往会借助第三方工具，最常用的为 Matlab 进行设计，选择适合的阶数，计算出对应的系数，然后将系数按照下图的格式存成.txt 格式的文件导入到 PPC3 软件中使用。

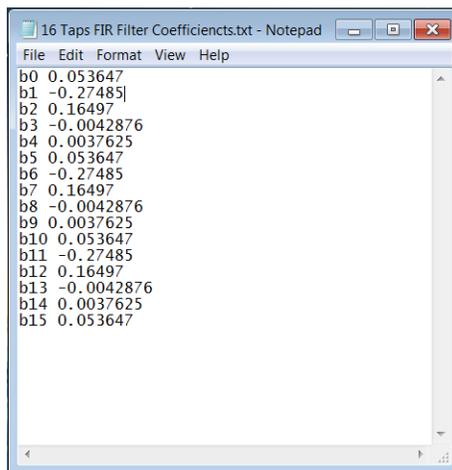


Figure 5. 16 Taps FIR 滤波器系数格式示例

图 5 中示意了一个 16-Tap FIR 滤波器系数格式文件，未用到的系数默认为 0 即可。

## 2.2 IIR 滤波器在 TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放中的应用

如前所述，由于 FIR 滤波器实现起来所占用的 DSP 资源较多，效率不高，目前 TAS57xx/TAS58xx 常规的 EQ 滤波器均由 IIR 滤波器来实现。目前 TAS57xx/TAS58xx 功放中基于 5 个系数的二阶直接 I 型 IIR 滤波器输入传递函数如式 3 所示：

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot Z^{-1} + b_2 \cdot Z^{-2}}{a_0 + a_1 \cdot Z^{-1} + a_2 \cdot Z^{-2}}, \quad \text{式 3}$$

在实际使用中，会将  $a_0$  做归一化处理，即变成只采用 5 个滤波器系数。归一化后的传递函数如式 4 所示：

$$H(z) = \frac{\frac{b_0}{a_0} + \frac{b_1}{a_0} \cdot Z^{-1} + \frac{b_2}{a_0} \cdot Z^{-2}}{1 + \frac{a_1}{a_0} \cdot Z^{-1} + \frac{a_2}{a_0} \cdot Z^{-2}}, \quad \text{式 4}$$

归一化后新的 5 个滤波器系数的对应关系如式 5 所示：

$$B_0 = \frac{b_0}{a_0}, B_1 = \frac{b_1}{a_0}, B_2 = \frac{b_2}{a_0}, A_1 = \frac{a_1}{a_0}, A_2 = \frac{a_2}{a_0}, \quad \text{式 5}$$

目前基于 IIR 滤波器架构在 TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放中可实现的基本 EQ 类型如表 1 所示。

**表 1 TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放中可实现的基本 EQ 类型**

EQ 类型	传递函数及系数	说明
低通 (Low Pass Filter)	$H(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{s}{Q} + 1}$ $b_0 = \frac{1 - \cos(\omega_0)}{2}$ $b_1 = 1 - \cos(\omega_0)$ $b_2 = \frac{1 - \cos(\omega_0)}{2}$ $a_0 = 1 + \alpha$ $a_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $a_2 = 1 - \alpha$	<p>中间变量定义:</p> $A = \sqrt{10^{\frac{dB_{gain}}{20}}}$ $= 10^{\frac{dB_{gain}}{40}}$ <ol style="list-style-type: none"> <li>针对 Peaking 和 Shelving EQ 滤波器</li> <li><math>\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_0}{F_s}</math>, <math>F_s</math> 为采样频率</li> <li><math>\cos(\omega_0)</math> 与 <math>\sin(\omega_0)</math></li> <li> <math display="block">\alpha = \frac{\sin(\omega_0)}{2Q} \quad (\text{case: } Q)</math> <math display="block">= \sin(\omega_0) \cdot \sinh\left(\frac{\ln(2)}{2} \cdot BW \cdot \frac{\omega_0}{\sin(\omega_0)}\right) \quad (\text{case: } BW)</math> <math display="block">= \frac{\sin(\omega_0)}{2} \cdot \sqrt{\left(A + \frac{1}{A}\right) \cdot \left(\frac{1}{S} - 1\right) + 2} \quad (\text{case: } S)</math> </li> </ol>
高通 (High Pass Filter)	$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{s}{Q} + 1}$ $b_0 = \frac{1 + \cos(\omega_0)}{2}$ $b_1 = -(1 + \cos(\omega_0))$ $b_2 = \frac{1 + \cos(\omega_0)}{2}$ $a_0 = 1 + \alpha$ $a_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $a_2 = 1 - \alpha$	
带通 (Band Pass Filter, constant skirt gain, peak gain = Q)	$H(s) = \frac{s}{s^2 + \frac{s}{Q} + 1}$ $b_0 = \frac{\sin(\omega_0)}{2} = Q \cdot \alpha$ $b_1 = 0$ $b_2 = -\frac{\sin(\omega_0)}{2} = -Q \cdot \alpha$ $a_0 = 1 + \alpha$ $a_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $a_2 = 1 - \alpha$	
带通 (Band Pass Filter, constant 0 dB peak gain)	$H(s) = \frac{\frac{s}{Q}}{s^2 + \frac{s}{Q} + 1}$ $b_0 = \alpha$ $b_1 = 0$ $b_2 = -\alpha$ $a_0 = 1 + \alpha$ $a_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $a_2 = 1 - \alpha$	
陷波 (Notch Filter)	$H(s) = \frac{s^2 + 1}{s^2 + \frac{s}{Q} + 1}$ $b_0 = 1$ $b_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $b_2 = 1$ $a_0 = 1 + \alpha$ $a_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $a_2 = 1 - \alpha$	

全通 (All Pass Filter)	$H(s) = \frac{s^2 - \frac{s}{Q} + 1}{s^2 + \frac{s}{Q} + 1}$ $b_0 = 1 - \alpha$ $b_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $b_2 = 1 + \alpha$ $a_0 = 1 + \alpha$ $a_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $a_2 = 1 - \alpha$	
Peaking EQ	$H(s) = \frac{s^2 + s \cdot \left(\frac{A}{Q}\right) + 1}{s^2 + \frac{s}{AQ} + 1}$ $b_0 = 1 + \alpha \cdot A$ $b_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $b_2 = 1 - \alpha \cdot A$ $a_0 = 1 + \frac{\alpha}{A}$ $a_1 = -2 \cdot \cos(\omega_0)$ $a_2 = 1 - \frac{\alpha}{A}$	
Low Shelf	$H(s) = A \cdot \frac{s^2 + \left(\frac{\sqrt{A}}{Q}\right) \cdot s + A}{A \cdot s^2 + \left(\frac{\sqrt{A}}{Q}\right) \cdot s + 1}$ $b_0 = A \cdot ((A + 1) - (A - 1) \cdot \cos(\omega_0) + 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \alpha)$ $b_1 = 2 \cdot A \cdot ((A - 1) - (A + 1) \cdot \cos(\omega_0))$ $b_2 = A \cdot ((A + 1) - (A - 1) \cdot \cos(\omega_0) - 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \alpha)$ $a_0 = (A + 1) + (A - 1) \cdot \cos(\omega_0) + 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \alpha$ $a_1 = -2 \cdot ((A - 1) + (A + 1) \cdot \cos(\omega_0))$ $a_2 = (A + 1) + (A - 1) \cdot \cos(\omega_0) - 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \alpha$	
High Shelf	$H(s) = A \cdot \frac{A \cdot s^2 + \left(\frac{\sqrt{A}}{Q}\right) \cdot s + 1}{s^2 + \left(\frac{\sqrt{A}}{Q}\right) \cdot s + A}$ $b_0 = A \cdot ((A + 1) + (A - 1) \cdot \cos(\omega_0) + 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \alpha)$ $b_1 = -2 \cdot A \cdot ((A - 1) + (A + 1) \cdot \cos(\omega_0))$ $b_2 = A \cdot ((A + 1) + (A - 1) \cdot \cos(\omega_0) - 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \alpha)$ $a_0 = (A + 1) - (A - 1) \cdot \cos(\omega_0) + 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \alpha$ $a_1 = 2 \cdot ((A - 1) - (A + 1) \cdot \cos(\omega_0))$ $a_2 = (A + 1) - (A - 1) \cdot \cos(\omega_0) - 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \alpha$	

在 TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放的实际使用中，对应的 GUI 软件已经集成上述各种数字滤波器的算法及其衍生的其它类型，可在相应的 EQ 调试界面中直接选择需要的滤波器类型并输入相应的参数直接进行使用。图 6 和图 7 分别示意了 TAS5751M 和 TAS5805M PPC3 调试软件中 EQ 数字滤波器的调试界面。



Figure 6. TAS5751M EQ 滤波器 PPC3 GUI 调试界面示意



Figure 7. TAS5805M EQ 滤波器 PPC3 GUI 调试界面示意

### 3 TAS57xx/TAS58xx 数字音频功放中 IIR 滤波器的其它应用

TAS57xx/TAS58xx 系列数字音频功放中的 IIR 滤波器除了上述介绍常规的 EQ 类型的用法之外，根据其拓扑的实现形式，还可以衍生出其它功能的使用方式，方便在实际的使用中作为额外的补偿手段，解决一些常规调试方法不能解决的问题。

#### 3.1 使用 IIR 滤波器进行 EQ 增益补偿

从 TAS57xx/TAS58xx 内置的直接 I 型二阶 IIR 滤波器的拓扑上看，可以通过调整各个滤波器系数使得， $b_0 = x, b_1 \sim b_2 = 0, a_1 \sim a_2 = 0$ ，要处理的音频信号只走 BQ\_A\_b0 Mixer，如图 8 所示。

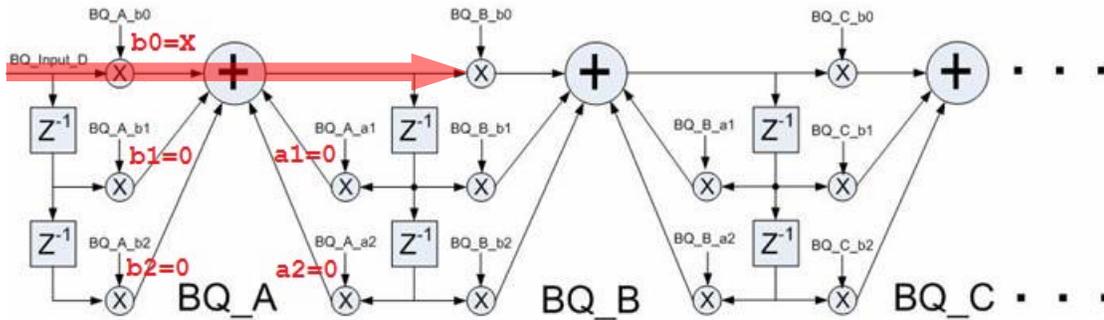


Figure 8. IIR 滤波器采用 BQ\_A\_b0 Mixer 进行 EQ 增益补偿示意

这样，通过调整 BQ\_A\_b0 Mixer 的系数值 x，我们就可以对该路信号的增益进行相应的提升和衰减控制。通过这种方式，可以实现采用一段 EQ 进行额外的信号增益补偿以满足前端处理增益控制受限的场景。

根据 TAS57xx/TAS58xx 内置 DSP 浮点数据处理位数的差异，可以获得的增益补偿范围也不同。目前 TAS57xx/TAS58xx 可通过 BQ\_A\_b0 Mixer 进行系数调整的增益补偿范围如表 2 所示。

表 2 TAS57xx/TAS58xx Mixer 增益补偿范围

功放器件	内置 DSP 类型	Mixer 浮点系数格式	EQ 增益补偿范围*
TAS5707/11/31/31M/51M/53M	DAP	26-Bit 3.23	+24dB~-103dB
TAS5754M/56M/66M/68M	miniDSP	24-Bit 1.23	0dB~-110dB
TAS5805M/25M	μCDSP	32-Bit 5.27	+20dB~-110dB

\*注：理论计算的 Mixer 增益有可能会超出该范围，在跟前端数字音量控制及其它 EQ 级联起来使用时会导致 DSP 溢出，建议在实际使用时不要超出该推荐的补偿范围。

不同的浮点系数格式增益换算如图 9 所示，以 3.23 格式为例：

dB	Linear	Decimal	Hex (3.23 Format)
0	1	8,388,608	0080 0000
5	1.7782794	14,917,288	00E3 9EA8
-5	0.5623413	4,717,260	0047 FACC
X	$L = 10^{(X/20)}$	$D = 8,388,608 \times L$	$H = \text{dec2hex}(D, 8)$

Figure 9. 3.23 格式浮点数增益换算示意

### 3.2 使用 IIR 滤波器进行单位时延控制

在一些音效算法的处理中，像虚拟的 3D 音效，往往需要在信号流程中增加一定的单位时延来实现特定的音效算法，通过对 IIR 滤波器的系数进行适当的设置，使得  $b_2 = 1, b_0 \sim b_1 = 0, a_1 \sim a_2 = 0$  可以得到最多 2 个单位延迟的时延控制，如图 9 所示。

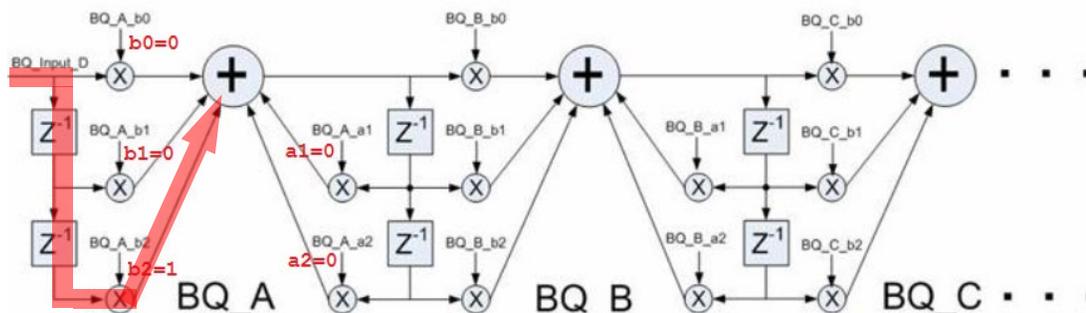


Figure 10. 利用 TAS57xx/TAS58xx IIR Filter 实现 2 个采样周期的时延

上述两种形式的 IIR EQ 滤波器的设置，可以通过对应的 TAS57xx/TAS58xx 音频功放调试软件，直接写入到对应的 EQ 系数寄存器中生效。具体的 EQ 系数 I2C 地址可查询对应器件的规格书寄存器描述相关的内容。

## 4 小结

本文详细介绍了 TAS57xx/TAS58xx 系列数字音频功放中的数字滤波器的类型及工作原理，并简要介绍了各自的使用及调试方法。同时，根据广泛使用的 IIR 滤波器的拓扑结构，给出了两种衍生的使用方法，可以灵活应用在一些特定的使用场景中，方便用户对功放进行调试及使用。

## 参考文献

1. TAS5751M, TAS5754M, TAS5805M datasheet
2. EQ 数字滤波器计算手册 <http://www.musicdsp.org/files/Audio-EQ-Cookbook.txt>
3. Bi-quad Filters Realization on AIC Codecs – TI Application Report, April 2010, HPA Software
4. Configure the Coefficients for Digital Biquad Filters in TLV320AIC3xxx Family – TI Application Report, SLAA447
5. Digital Filter Structures [http://web.cecs.pdx.edu/~mperkows/CAPSTONES/DSP1/ELG6163\\_FIR.pdf](http://web.cecs.pdx.edu/~mperkows/CAPSTONES/DSP1/ELG6163_FIR.pdf)
6. Basic IIR Digital Filter Structures [http://web.cecs.pdx.edu/~mperkows/CAPSTONES/DSP1/ELG6163\\_IIR.pdf](http://web.cecs.pdx.edu/~mperkows/CAPSTONES/DSP1/ELG6163_IIR.pdf)

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品；(2) 设计、验证并测试您的应用；(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司