

**GigaDevice Semiconductor Inc.**

**GD32G5x3 FIR / IIR 滤波器的使用指南**

**应用笔记**

**AN208**

1.0 版本

(2024 年 5 月)

## 目录

目录.....	2
图索引.....	3
表索引.....	4
1. 前言.....	5
2. 滤波器原理.....	6
3. <b>FIR</b> 滤波器.....	9
4. <b>IIR</b> 滤波器.....	12
5. 版本历史.....	15

## 图索引

图 2-1. 未叠加噪声的原始信号 .....	6
图 2-2. 叠加噪声后的信号.....	7
图 2-3. 滤波后的信号.....	7
图 2-4. 滤波后的信号与原始信号对比图.....	8
图 3-1. FIR 滤波器结构图.....	9
图 3-2. FIR 滤波后效果图.....	10
图 4-1. IIR 滤波器结构图.....	12
图 4-2. IIR 滤波后效果图.....	14

## 表索引

表 3-1. FIR 滤波器滤波参数配置 .....	9
表 3-2. FIR 滤波器输入参数配置 .....	10
表 3-3. FIR 输入数据地址和长度配置 .....	10
表 3-4. FIR 滤波器数据预装载 .....	10
表 3-5. IIR 浮点滤波使能 .....	11
表 4-1. IIR 滤波器滤波参数配置 .....	13
表 4-2. IIR 滤波器输入参数配置 .....	13
表 4-3. IIR 滤波器反馈参数配置 .....	13
表 4-4. IIR 输入数据地址和长度配置 .....	13
表 4-5. IIR 滤波器数据预装载 .....	13
表 4-6. IIR 浮点滤波使能 .....	14
表 5-1. 版本历史 .....	15

## 1. 前言

**FIR 滤波器（有限脉冲响应滤波器）：**FIR 滤波器是一种线性时不变滤波器，它的输出只依赖于当前输出和过去的输入。FIR 滤波器通过对输入信号的加权平均来实现滤波效果。常见的 FIR 滤波器设计方法包括窗函数法、频率采样法和最优化方法（如最小二乘法）。

**IIR 滤波器（无限冲击响应滤波器）：**IIR 滤波器是一种具有无限脉冲响应的滤波器，它的输出不仅依赖于当前输入和过去的输出，还依赖于过去的输入。IIR 滤波器具有更窄的转换带和更陡峭的阻带边缘，但会引入一定的时域和频域非线性失真。常见的 IIR 滤波器包括脉冲响应不变法、双线性变换和频率响应匹配法。

**GD32G533\_553 滤波器算法加速器（FAC）**包含乘法器、累加器和地址生成逻辑单元，该单元可以实现索引保存在本地存储中的矢量元素。FAC 在输入端和输出端都支持循环缓冲区，以便于实现包含有限冲激响应（FIR）滤波器和无限冲激响应（IIR）滤波器的数字滤波器。FAC 使得 CPU 免于频繁或冗长的滤波操作，相比于软件实现滤波，它能加速计算，提升关键任务的处理速度。

## 2. 滤波器原理

在音频信号处理、电机控制、图像处理、视频处理等领域，数字信号处理应用广泛。如下举例说明滤波器的实际使用效果。

图 2-1. 未叠加噪声的原始信号

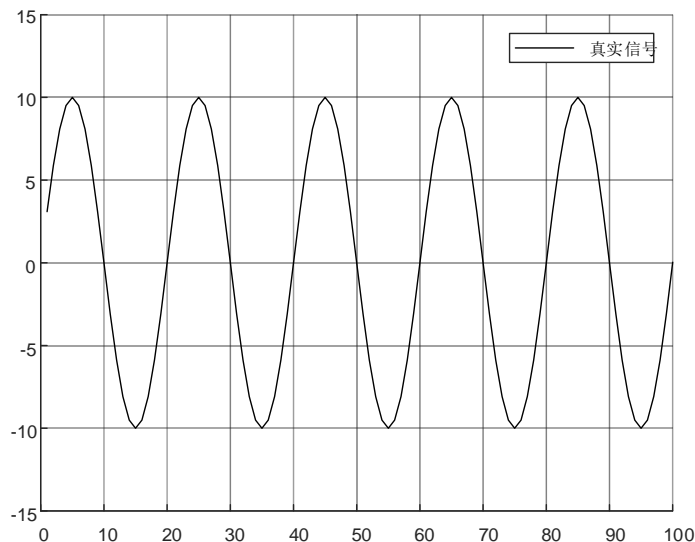


图 2-1. 未叠加噪声的原始信号中，信号为标准的正弦信号，正弦信号峰值 $A$ 为 10，信号频率 $f$ 为 500Hz，采样频率 $F_s$ 为 10KHz。该信号中不含任何噪声，信号公式可表示为：

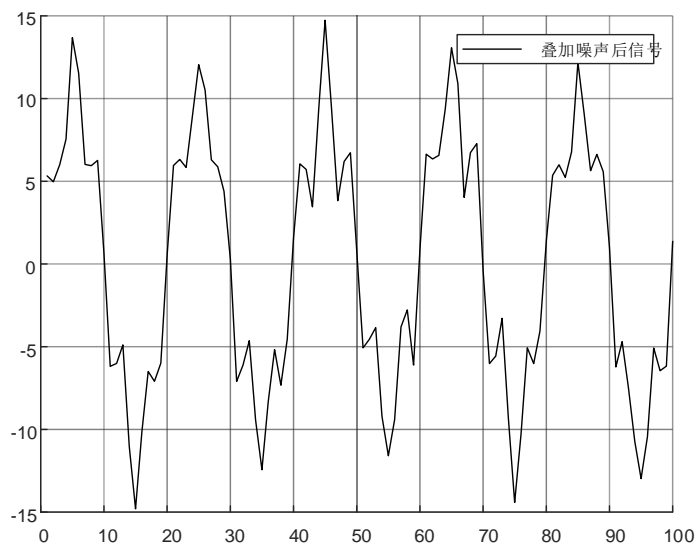
$$x(i) = A \times \sin(2\pi \times i \times f / F_s) \quad (2-1)$$

在实际控制中，信号中往往包含各种各样的噪声，为此，模拟上述分析工况，在信号中叠加高斯白噪声 $gussi$ 和幅值 $A_1$ 为 3 的 3 倍频、 $A_2$ 为 1 的 5 倍频噪声，信号公式可表示为：

$$x_{noise}(i) = A \times \sin\left(2\pi \times i \times \frac{f}{F_s}\right) + A_1 \times \sin\left(3 \times 2\pi \times i \times \frac{f}{F_s}\right) + A_2 \times \sin\left(5 \times 2\pi \times i \times \frac{f}{F_s}\right) + gussi(i) \quad (2-2)$$

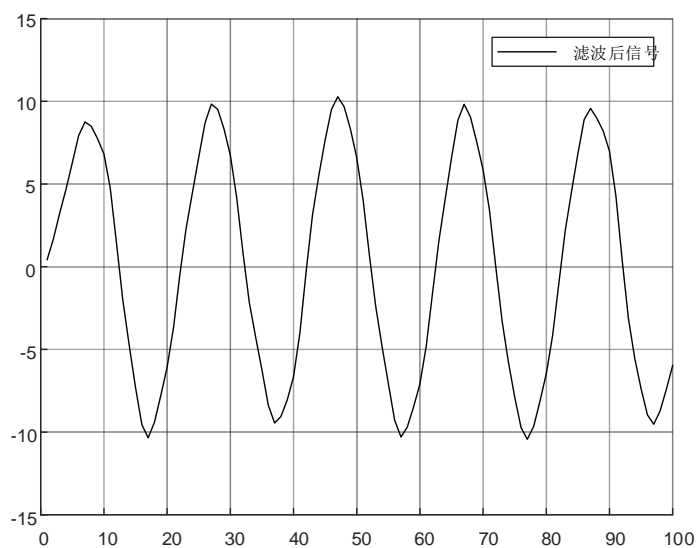
叠加噪声后的信号如图 2-2. 叠加噪声后的信号所示。

图 2-2. 叠加噪声后的信号



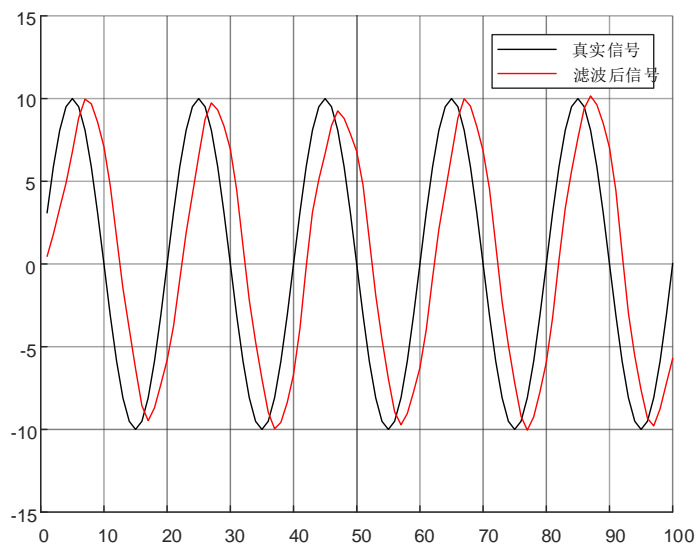
可见叠加噪声信号后，原始正弦信号特征不易区分，因此，为了较为准确的得到原始信号的轮廓，需对叠加噪声后的信号进行滤波。为此，设计二阶巴特沃斯低通滤波器（IIR）对信号进行滤波，低通滤波器的截止频率为 1000HZ。滤波后的信号如 [图 2-3. 滤波后的信号](#) 所示。

图 2-3. 滤波后的信号



将滤波后的信号与原始信号进行对比，如 [图 2-4. 滤波后的信号与原始信号对比图](#) 所示。

图 2-4. 滤波后的信号与原始信号对比图



可见，经过滤波后信号的幅值得到了衰减，信号的相位产生了滞后，即相比于原信号滤波器虽然滤除了绝大部分信号噪声，但不可避免的带来了不利影响（相位滞后、幅值衰减）。



### 3. FIR 滤波器

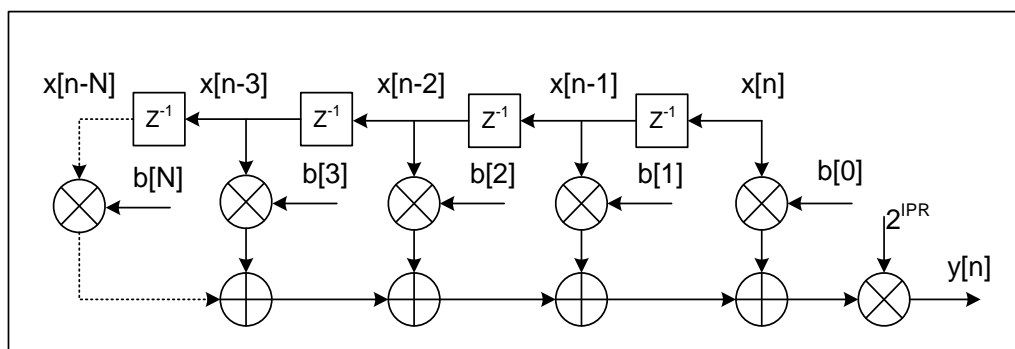
FIR 滤波器是一种线性相位滤波器，其公式为：

$$y_n = 2^{IPR} \sum_{k=0}^N (x_{n-k} b_k) \quad (3-1)$$

表示为向量形式为  $\vec{Y} = \vec{B} \times \vec{X}$ ， $b_0 \sim b_k$  为  $N+1$  个滤波系数， $\vec{X}$  包含无限长的输入采样， $\vec{Y}$  的元素按照点乘计算得到， $\vec{X}_n = [x_{n-N}, \dots, x_n]$ 。

FIR滤波器的结构如[图3-1. FIR 滤波器结构图](#)所示。

**图 3-1. FIR 滤波器结构图**



从 FIR 滤波公式中得出，FIR 滤波器没有反馈回路，在某一时刻时的输出完全依赖于前一段时刻的输入  $\vec{X}$ ，而与输出  $\vec{Y}$  无关，由于没有反馈回路，其稳定性较强，同时在信号处理过程中 FIR 滤波器不会引入相位畸变，IIR 滤波器会引入相位畸变，但由于没有反馈回路，其达到同样的滤波效果相比于 IIR 滤波器，往往需要更高的阶数，这意味着需要较大的运算量。

下面介绍 FIR 滤波器的设计过程，以[图 2-2. 叠加噪声后的信号](#)中信号为例，希望提取的信号频率为 500Hz，噪声信号频率为 3 次谐波（1500Hz）、5 次谐波（2500Hz）、高斯白噪声。为了尽可能的滤除噪声信号，设计 20 阶 FIR 低通滤波器，滤波器参数可结合对应的设计软件进行设计，最终设计的滤波器参数为  $\vec{B} = [0, -69, -207, -380, -404, 0, 1041, 2668, 4505, 5967, 6526, 5967, 4505, 2668, 1041, 0, -404, -0380, -207, -69, 0]$ ;

下面需要将上述参数在 GD32G533\_553 中使用。GD32G533\_553 中数据长度为 256\*32，对于定点使用来说，最大为 256\*16。也就是在定点模式下，输入电机的数据最大长度为 256 个数据（包括滤波系数  $\vec{B}$  和需要滤波的数据）。使用时，首先配置数据加载地址，首先加载滤波器参数  $\vec{B}$ 。

此时配置初始地址为 0，滤波参数长度为 fir\_coeffb\_size = 20;

**表 3-1. FIR 滤波器滤波参数配置**

/* Configure Coefficient buffer */	
facconfig.coeff_addr	= 0;
facconfig.coeff_size	= fir_coeffb_size;

配置输入数据地址长度以及阈值，在配置输入数据时已经对滤波参数进行了配置，因此起始地址为 fir\_coeffb\_size，长度为输入数据长度配置滤波器参数长度加实际输入数据长度。

表 3-2. FIR 滤波器输入参数配置

```
/* configure input buffer */
facconfig.input_addr      = fir_coeffb_size;
facconfig.input_size      = fir_coeffb_size + fir_d0;
facconfig.input_threshold = FAC_THRESHOLD_1;
```

在完成滤波器参数数据和输入待滤波数据的长度和地址分配后，将该配置信息写入对应的 X0 缓冲区配置寄存器 FAC\_X0BCFG、X1 缓冲区配置寄存器 FAC\_X1BCFG、Y 缓冲区配置寄存器 FAC\_YBCFG。

表 3-3. FIR 输入数据地址和长度配置

```
fac_init(&facconfig);
```

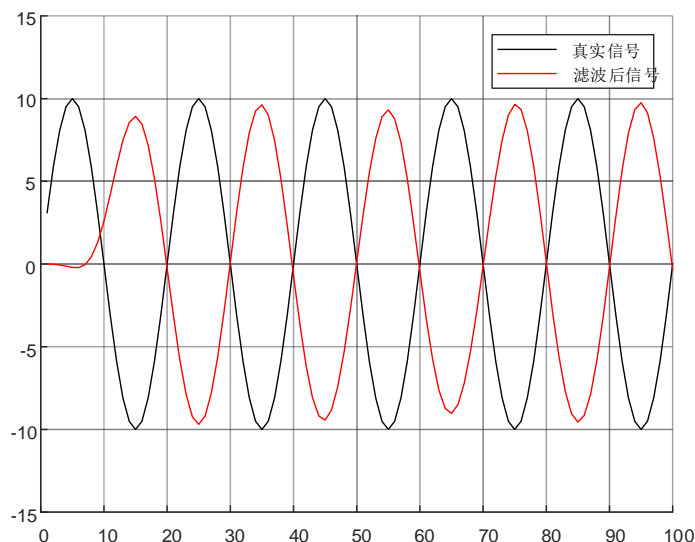
接着对寄存器数据进行预装载，预装载函数如下：

表 3-4. FIR 滤波器数据预装载

```
faccoeff.coeffa_ctx      = NULL;
faccoeff.coeffa_size     = 0;
faccoeff.coeffb_ctx     = fir_coeffb;
faccoeff.coeffb_size    = fir_coeffb_size;
faccoeff.input_ctx      = input_data;
faccoeff.input_size     = input_array_size;
faccoeff.output_ctx     = NULL;
faccoeff.output_size    = 0;
/* preload X0 X1 Y buffer with coefficient */
fac_fixed_buffer_preload(&faccoeff);
```

通过以上配置完成滤波器参数配置。采用上述滤波器滤波之后的效果如下：

图 3-2. FIR 滤波后效果图



需要注意的是，由于采用的定点滤波器，因此，输入滤波器的滤波参数要放大 32768 倍。当使能浮点滤波时。

表 3-5. IIR 浮点滤波使能

```
fac_float_enable();
```

此时输入滤波器的滤波参数为：

```
 $\vec{B}$  =[-0.0000000000000000, -0.002122271148825, -0.006325353991514, -0.011611810  
377621, -0.012354656748982, 0.0000000000000000, 0.031774497558567, 0.081435  
907564218, 0.137493781701943, 0.182125490388735, 0.199168830106960, 0.1821  
25490388735, 0.137493781701943, 0.081435907564218, 0.031774497558567, 0.00  
000000000000, -0.012354656748982, -0.011611810377621, -0.006325353991514,  
-0.002122271148825, -0.0000000000000000];
```

## 4. IIR 滤波器

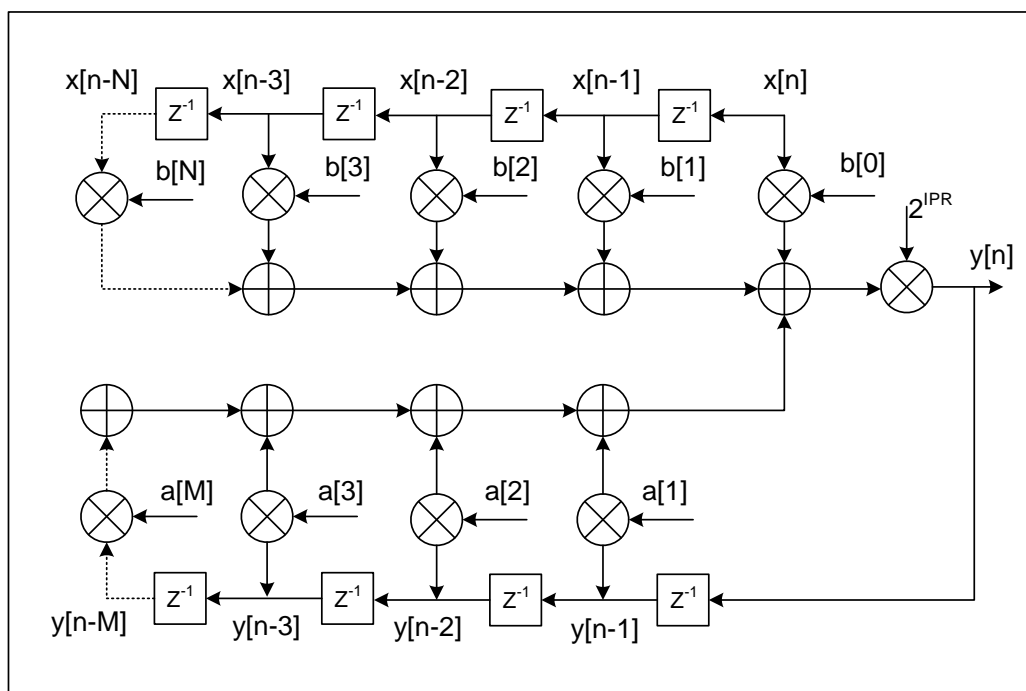
IIR 滤波器是一种非线性相位滤波器，其公式为：

$$y_n = 2^{IPR} (\sum_{k=0}^N (x_{n-k} \times b_k) + \sum_{k=1}^M (y_{n-k} \times a_k)) \quad (4-1)$$

表示为向量形式为  $\vec{Y} = \vec{B} \times \vec{X} + \vec{A} \times \vec{Y}$ ， $b_0 \sim b_N$  为  $N+1$  个滤波系数， $a_0 \sim a_M$  为  $M$  个反馈滤波系数， $\vec{X}$  包含无限长的输入采样， $\vec{Y}$  的元素按照点乘计算得到， $\vec{X}_n = [x_{n-N}, \dots, x_n]$ 。

IIR 滤波器的结构如 [图4-1. IIR 滤波器结构图](#) 所示。

图 4-1. IIR 滤波器结构图



从 IIR 滤波公式中得出，IIR 滤波器包含反馈回路，在某一时刻时的输出不仅依赖于前一段时刻的输入  $\vec{X}$ ，也与输出  $\vec{Y}$  有关，由于添加反馈回路，其稳定性较 FIR 较弱，同时在信号处理过程中 IIR 滤波器会引入相位畸变，IIR 滤波器会引入相位畸变，但 IIR 由于使用了反馈回路，其达到同样滤波效果的阶数往往较低，运算量较小。

下面介绍 IIR 滤波器的设计过程，以 [图 2-2. 叠加噪声后的信号](#) 中信号为例，希望提取的信号频率为 500Hz，噪声信号频率为 3 次谐波（1500Hz）、5 次谐波（2500Hz）、高斯白噪声。为了尽可能的滤除噪声信号，设计 2 阶 IIR 低通滤波器，滤波器参数可结合对应的设计软件进行设计，通过软件设计的滤波器参数为浮点滤波器参数，其  $\vec{B} = [0.020083365564211, 0.040166731128423, 0.020083365564211]$ ； $\vec{A} = [1.000000000000000, -1.561018075800718, 0.641351538057563]$ ；此时设计的滤波器参数全为浮点参数，而采用定点 IIR 滤波器时，需将将对应的滤波参数进行处理，16 位有符号定点数据范围为 -32768~32767，为了最大限度使用上述数据，将上面数据放大 16384 倍（对于 IIR 滤波器，同时放大前馈系数  $\vec{B}$  和反馈系数  $\vec{A}$ ，其滤波效果保持不变），此时滤波器参数分别为  $\vec{B} = [329, 658, 329]$ ； $\vec{A} = [16384, -25575, 10507]$ 。需要注意的是，结合设计的滤波器参数，输入 MCU 中的实际滤波参数分别为  $\vec{B} = [329, 658, 329]$ ； $\vec{A} = [25575, -10507]$ ； $\vec{A}$  需要去除第一个数（第一个数固定，无需用户输入），同时后面两

个数据进行反向处理，这也是使用的生成滤波器参数的传递函数与实际 MCU 中使用的滤波器传递函数形式有区别导致的。

下面需要将上述参数在 GD32G533\_553 中使用。GD32G533\_553 中数据长度为  $256 \times 32$ ，对于定点使用来说，最大为  $256 \times 16$ 。也就是在定点模式下，输入电机的数据最大长度为 256 个数据（包括前馈滤波系数  $\vec{B}$ 、反馈滤波系数  $\vec{A}$  以及需要滤波的数据）。使用时，首先配置数据加载地址，首先加载滤波器参数  $\vec{B}$ 。

此时配置初始地址为 0，滤波参数长度为  $\text{iir\_coeffa\_size} + \text{iir\_coeffb\_size}$ ；IIR 滤波器同时用到了前馈滤波系数  $\vec{B}$ 、反馈滤波系数  $\vec{A}$ ，因此滤波系数长度为两者之和。

**表 4-1. IIR 滤波器滤波参数配置**

```
/* Configure Coefficient buffer */
facconfig.coeff_addr      = 0;
facconfig.coeff_size     = iir_coeffa_size + iir_coeffb_size;
```

配置输入数据地址长度以及阈值，在配置输入数据时已经对滤波参数进行了配置，因此起始地址为  $\text{iir\_coeffa\_size} + \text{iir\_coeffb\_size}$ ，长度为输入数据长度配置滤波器参数长度加实际输入数据长度。

**表 4-2. IIR 滤波器输入参数配置**

```
/* Configure input buffer */
facconfig.input_addr      = iir_coeffa_size + iir_coeffb_size;
facconfig.input_size     = iir_coeffb_size + iir_d0;
facconfig.input_threshold = FAC_THRESHOLD_1;
```

与 FIR 不同的是，IIR 还需配置输出数组，因为用到了反馈滤波。

**表 4-3. IIR 滤波器反馈参数配置**

```
/* Configure input buffer */
facconfig.output_addr    = iir_coeffa_size + iir_coeffb_size + iir_coeffb_size + iir_d0;
facconfig.output_size    = iir_coeffa_size + iir_d1;
facconfig.output_threshold = FAC_THRESHOLD_1;
```

在完成滤波器参数数据和输入待滤波数据，反馈参数的长度和地址分配后，将该配置信息写入对应的 X0 缓冲区配置寄存器 FAC\_X0BCFG、X1 缓冲区配置寄存器 FAC\_X1BCFG、Y 缓冲区配置寄存器 FAC\_YBCFG。

**表 4-4. IIR 输入数据地址和长度配置**

```
fac_init(&facconfig);
```

接着对寄存器数据进行预装载，预装载函数如下：

**表 4-5. IIR 滤波器数据预装载**

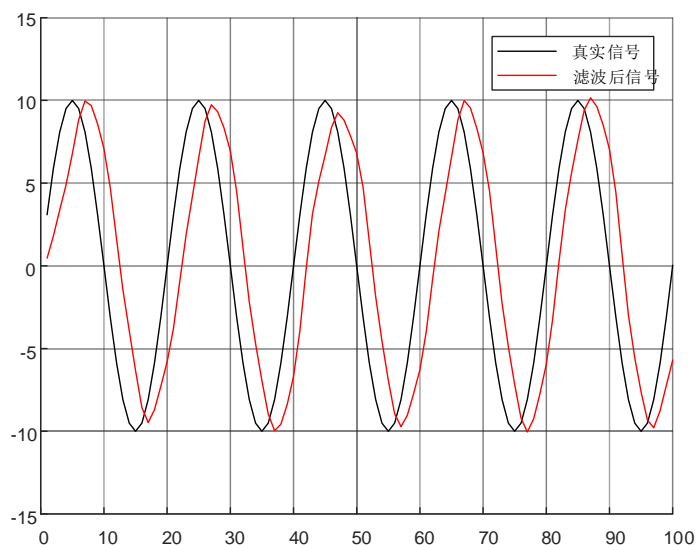
```
faccoeff.coeffa_ctx      = iir_coeffa;
faccoeff.coeffa_size    = iir_coeffa_size;
faccoeff.coeffb_ctx     = iir_coeffb;
faccoeff.coeffb_size    = iir_coeffb_size;
faccoeff.input_ctx      = input_data;
```

```

faccoeff.input_size      = input_array_size;
faccoeff.output_ctx     = output_data;
faccoeff.output_size    = iir_coeffa_size;
/* preload X0 X1 Y buffer with coefficient */
fac_fixed_buffer_preload(&faccoeff);
    
```

通过以上配置完成滤波器参数配置。采用上述滤波器滤波之后的效果如下：

**图 4-2. IIR 滤波后效果图**



需要注意的是，由于采用的定点滤波器，因此，输入滤波器的滤波参数要放大 32768 倍。

当使能浮点滤波时，即采用浮点滤波。

**表 4-6. IIR 浮点滤波使能**

```
fac_float_enable();
```

此时输入滤波器的滤波参数为：

$\vec{B} = [0.020083365564211, 0.040166731128423, 0.020083365564211];$   $\vec{A} = [1.561018075800718, -0.641351538057563];$

## 5. 版本历史

表 5-1. 版本历史

版本号.	说明	日期
1.0	首次发布	2024 年 05 月 01 日

## Important Notice

This document is the property of GigaDevice Semiconductor Inc. and its subsidiaries (the "Company"). This document, including any product of the Company described in this document (the "Product"), is owned by the Company under the intellectual property laws and treaties of the People's Republic of China and other jurisdictions worldwide. The Company reserves all rights under such laws and treaties and does not grant any license under its patents, copyrights, trademarks, or other intellectual property rights. The names and brands of third party referred thereto (if any) are the property of their respective owner and referred to for identification purposes only.

The Company makes no warranty of any kind, express or implied, with regard to this document or any Product, including, but not limited to, the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose. The Company does not assume any liability arising out of the application or use of any Product described in this document. Any information provided in this document is provided only for reference purposes. It is the responsibility of the user of this document to properly design, program, and test the functionality and safety of any application made of this information and any resulting product. Except for customized products which has been expressly identified in the applicable agreement, the Products are designed, developed, and/or manufactured for ordinary business, industrial, personal, and/or household applications only. The Products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems designed or intended for the operation of weapons, weapons systems, nuclear installations, atomic energy control instruments, combustion control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, life-support devices or systems, other medical devices or systems (including resuscitation equipment and surgical implants), pollution control or hazardous substances management, or other uses where the failure of the device or Product could cause personal injury, death, property or environmental damage ("Unintended Uses"). Customers shall take any and all actions to ensure using and selling the Products in accordance with the applicable laws and regulations. The Company is not liable, in whole or in part, and customers shall and hereby do release the Company as well as its suppliers and/or distributors from any claim, damage, or other liability arising from or related to all Unintended Uses of the Products. Customers shall indemnify and hold the Company as well as its suppliers and/or distributors harmless from and against all claims, costs, damages, and other liabilities, including claims for personal injury or death, arising from or related to any Unintended Uses of the Products.

Information in this document is provided solely in connection with the Products. The Company reserves the right to make changes, corrections, modifications or improvements to this document and Products and services described herein at any time, without notice.