

第5章 基于 LabVIEW 的滤波器设计

数字滤波器是数字信号处理最重要的内容之一，滤波器设计是信号的频域分析中的另一个非常重要的应用。滤波器分为模拟滤波器和数字滤波器，分别处理模拟信号和数字信号。与模拟滤波器相比，数字滤波器具有下列优点：

- 可以用软件编程。
- 稳定性高，可预测。
- 不会因温度、湿度的影响产生误差，不需要精度组件。
- 很高的性能价格比。

下面几种滤波操作都基于滤波器设计技术：

- 平滑窗口。
- 无限冲激响应（IIR）或者递归数字滤波器。
- 有限冲激响应（FIR）或者非递归数字滤波器。
- 非线性滤波器。

在测试 VI 中是使用数字滤波器。由于滤波器的分类方法很多，其参数类型也比较多，所以，用户在 LabVIEW 中使用数字滤波器 VI 时特别注意参数的设置。

另外，在 LabVIEW 中，对信号的滤波操作有两种方法：一种是用用户自己通过编程实现对信号的滤波和变换，这样能够作出特别适合自己的滤波程序，能很好地达到自己的要求，但是编程相对来说比较复杂，程序可读性较差；另一种是调用 LabVIEW 中滤波器设计的函数节点，这样编程方便而且速度快，程序执行效率高，本章重点介绍第二种方法。

本章首先介绍数字滤波器的相关知识，与模拟滤波器相比有何优点，以及在实际的应用中如何选择适当的滤波器，然后重点讲述基于 LabVIEW 的数字滤波器的设计实现，包括有限冲激响应（FIR）滤波器和无限冲激响应（IIR）滤波器的设计实现，重点讲述 LabVIEW Butterworth（中巴特沃斯）滤波器、Chebyshev（切比雪夫）滤波器、椭圆（Elliptic）滤波器和贝塞尔（Bessel）滤波器函数 VI 的使用，本章最后讲述基于 LabVIEW 的中值滤波器及自适应滤波器的设计实现。

5.1 数字滤波器概述

5.1.1 数字滤波器的基本概念

在对信号进行采集处理时，常因为受到外在因素的干扰，会产生噪声信号，从而导致信号的失真，这就需要用到滤波技术消除这些噪声。滤波技术在信号的获取、传输和处理中具有重要作用。滤波器是一种选频装置，具有频率选择的功能，它能使信号中特定的频率成分通过而衰减其他不需要的频率成分。在测试装置中，利用滤波器的这种选频作用，可以滤除干扰噪声或进行频谱分析。

数字滤波器是具有一定传输选择特性的数字信号处理装置, 它的输入、输出信号均为数字信号, 数字滤波器本身是一个线性时不变离散系统。数字滤波器的基本工作原理是利用离散系统特性去改变输入数字信号的波形或频谱, 使有用信号频率分量通过, 抑制无用信号分量输出。

滤波器分为模拟滤波器和数字滤波器两类。模拟滤波器的性能, 在结构确定之后, 取决于器件的宽容度。但模拟滤波器在低频和甚低频时实现比较困难, 而数字滤波器则在各种情况下实现都比较方便。数字滤波器实际是采用数字系统实现的一种运算过程, 它具有一般数字系统的固有特点。依靠软件实现的数字滤波器与模拟滤波器或与硬件实现的滤波器相比, 有着灵活性强, 精度高, 可靠性高, 稳定性好, 处理功能强, 不会因温度、湿度的影响产生误差, 具有极低的成本等优点, 在电子设备中不能实现的一些特殊的理想滤波器, 而利用计算机进行数字滤波, 就会变得比较容易, 所以在许多数字信号处理领域有着广泛的应用, 并且在逐步取代模拟滤波器。

5.1.2 数字滤波器的分类

根据不同的分类方法, 滤波器可分为多种类型。

- 如果按照滤波器电路中是否带有有源器件来分, 可以分为有源滤波器和无源滤波器;
- 如果按照通过的频率范围来分, 可以分为低通、高通、带通和带阻滤波器及其他类型通带的滤波器;
- 如果按照处理信号的性质来分, 可以分为模拟滤波器和数字滤波器。

随着计算机的飞速发展, 数字滤波器也有了很大的发展和应用, 其中, 数字滤波器又可分为有限冲激响应 (FIR) 滤波器和无限冲激响应 (IIR) 滤波器两大类, 其他还有按照阶次、按照何种方法逼近理想滤波器等进行的分类方法, 根据不同场合有其特定含义。

理想滤波器是一个理想化的模型, 在实际应用中很难实现, 但是研究理想滤波器又具有特殊的意义。一个理想滤波器应在所需的通带内幅频特性为常值, 相频特性为通过原点的直线; 在通带外幅频特性值应为零, 这样才能使通带内输入信号的频率成分得以不失真地传输, 而在通带外的频率成分全部衰减掉。几种常用滤波器的理想频率响应如图 5-1 所示。

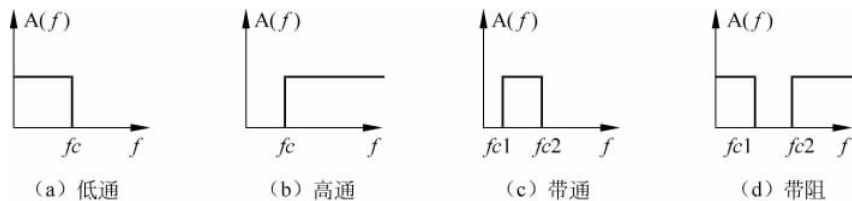


图 5-1 几种常用滤波器的理想频率响应

由图 5-1 可知, 对于几种常用滤波器的理想频率响应描述如下。

- 低通滤波器对信号中低于某一频率 f_c 的成分均能以常值增益通过, f_c 称为低通滤波器的上截止频率。
- 高通滤波器对信号高于某一频率 f_c 的成分均能以常值增益通过, f_c 称为高通滤

波器的下截止频率。

- 带通滤波器对信号中高于某一频率 $fc1$ 和低于频率 $fc2$ 的成分以常值增益通过， $fc1$ 、 $fc2$ 分别称为带通滤波器的下、上截止频率。
- 带阻滤波器对信号中仅让两截止频率 $fc1$ 和 $fc2$ 之间的频率成分不能通过。

几种典型常用实际（非理想）滤波器的通带、阻带如图 5-2 所示。

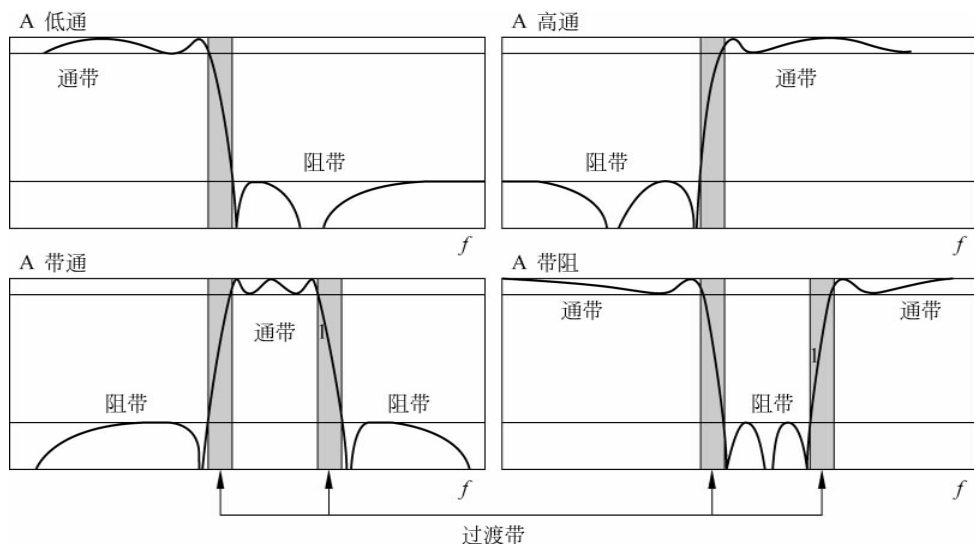


图 5-2 几种典型常用实际（非理想）滤波器的通带与阻带

5.1.3 实际（非理想）数字滤波器的类型

数字滤波，就是将输入的信号序列，按规定的算法处理之后，得到希望的输出序列的过程。数字滤波器按照离散系统的时域特性，可分为有限冲激响应（FIR）滤波器和无限冲激响应（IIR）滤波器两种类型，这两种滤波器中都包含低通、高通、带通、带阻等子类型。两者划分的主要标准是系统函数对单位样值响应是否无限长。一般离散系统可以用 N 阶差分方程来表示：

$$y(n) + \sum_{k=1}^N b_k y(n-k) = \sum_{r=0}^M a_r x(n-r) \quad (5-1)$$

其系统函数为：

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{r=0}^M a_r z^{-r}}{1 + \sum_{k=1}^N b_k z^{-k}} \quad (5-2)$$

- 当 b_k 全为 0 时， $H(z)$ 为多项式形式，此时 $h(n)$ 为有限长，称为 FIR 系统。
 - 当 b_k 不全为 0 时， $H(z)$ 为有理分式形式，此时 $h(n)$ 为无限长，称为 IIR 系统。
- 值得注意的是，FIR 滤波器和 IIR 滤波器在性能和设计方法上有很大的不同。

1. FIR 数字滤波器

对于 FIR 数字滤波器的系统只有零点，冲激响应在有限时间内衰减为 0，输出只取决于当前和以前的输入值，因此，这一类系统不像 IIR 系统那样容易取得比较好的通带与阻

带衰减特性。要想取得好的衰减特性,一般要求系统的单位抽样响应截取的长度要长。其主要的优点是:首先,FIR 滤波器的系统是稳定的;其次,FIR 滤波器可以做到严格的线性相移;最后,FIR 系统允许设计多通带(或多阻带)的滤波器。

FIR 数字滤波器的幅频响应中带有纹波,其设计就是要在满足频率响应的同时合理地分配纹波。FIR 数字滤波器的设计方法主要是建立在对理想滤波器频率特性作某种近似的基础上,这些近似方法有窗函数法、频率抽样法及最佳一致逼近法等。

一种方法:定义好需要的幅度响应,然后求其 FFT 逆变换,再将所得的时域信号加窗。这种方法的优点是简单,但是效率不高,定义困难。

另一种方法:使用 Parks-McClellan 算法将加权后的纹波均匀分配到通带和阻带中,并且频率响应拥有陡峭的过渡带。这种方法的缺点是方法复杂,设计周期长。

与归一化频率相比较,一种 FIR 数字滤波器的典型幅度和相位响应如图 5-3 所示。

2. IIR 数字滤波器

对于 IIR 数字滤波器,冲激响应会无限持续(理论上),输出不仅取决于当前和以前的输入值,还取决于以前的输出值。IIR 滤波器的优点在于:它的递归性,可以减少存储需求,具有幅频特性较平坦的特点。但其相位响应非线性。

IIR 数字滤波器的设计源于传统的模拟滤波器的设计,可以通过对低通模拟滤波器进行模拟频率和数字频率的变换而得到对应滤波特性的数字低通滤波器,但是两者之间有一定的误差。模拟滤波器设计的经典方法是用“最佳逼近特性”法,相应的

有 Butterworth 滤波器、Chebyshev 滤波器、椭圆滤波器、贝塞尔滤波器等类型。各个滤波器具有不同的频率特性,用户在逼近所需的同一个滤波器特性时,要注意根据具体要求选择适当的逼近类型。

下面简单介绍在测试测控、数字信号处理领域常用的几种 IIR 数字滤波器。

1) Butterworth 滤波器

Butterworth 滤波器的幅频响应表达式为:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad (5-3)$$

式中, ω_c 为通带截止频率, n 为滤波器的阶数。Butterworth 滤波器有以下幅频特性:

- 通带内具有最大平坦的幅频特性。
- 随频率的增大,平滑单调下降。

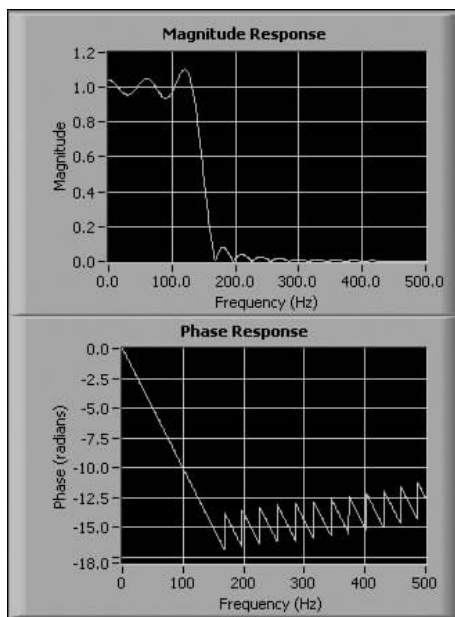


图 5-3 FIR 数字滤波器的典型幅相频特性曲线

- 在通带中，是理想的单位响应，在阻带中响应为零。
- 在截止频率处即当 $\omega = \omega_c$ 时， $|H(\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ，有半功率频率，即有 3dB 衰减。

Butterworth 低通滤波器的幅频特性曲线如图 5-4 所示。由图中可以看出，LabVIEW 模拟仿真出了不同阶数 n 的 Butterworth 低通滤波器过渡带的陡峭程度，也即过渡带的陡峭程度正比于滤波器的阶数。随着阶数 n 越高，响应越接近矩形，过渡带越窄，所以高阶 Butterworth 低通滤波器的幅频响应特性就越近于理想低通滤波器。但是与理想低通滤波器的处理结果相比，巴特沃斯处理的信号的模糊程度大大减少，它的尾部会含有大量高频成分。通过 Butterworth 滤波器处理的信号将不会出现抖动现象，这是由于在滤波器的通带和阻带之间有一平滑过渡的缘故。

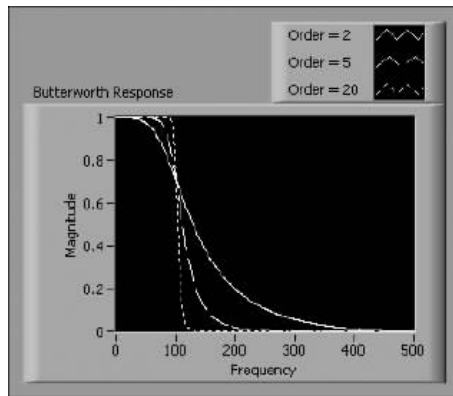


图 5-4 Butterworth 低通滤波器的幅频特性曲线

2) Chebyshev 滤波器

Chebyshev 滤波器的幅频响应表达式为：

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}} \quad (5-4)$$

式中， ω_c 为通带截止频率； n 为滤波器的阶数； ϵ 为小于 1 的正数，决定通带纹波大小的系数，表示通带内幅度波动的程度， ϵ 越大波动幅度越大； T_n 为 n 阶 Chebyshev 多项式，其定义为：

$$T_n\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \begin{cases} \cos\left(n \cdot \arccos \frac{\omega}{\omega_c}\right), & \left|\frac{\omega}{\omega_c}\right| \leq 1 \\ \cosh\left(n \cdot \operatorname{arccos} h \frac{\omega}{\omega_c}\right), & \left|\frac{\omega}{\omega_c}\right| \geq 1 \end{cases} \quad (5-5)$$

Chebyshev 滤波器有以下幅频特性：

- 通带内峰值误差最小。
- 通带内具有等幅的纹波起伏特性。
- 阻带内幅频响应单调下降且具有更大的衰减。
- 与 Butterworth 滤波器相比，过渡迅速。

Butterworth 滤波器在通带与阻带之间过渡缓慢，相比于 Butterworth 滤波器，Chebyshev 低通滤波器在通带与阻带之间能够达到快速的过渡，并且这种快速的过渡能够产生较小的绝对误差和较快的滤波执行速度。Chebyshev 低通滤波器的幅频特性曲线如图 5-5 所示。注意 Chebyshev 低通滤波器通带的最大纹波误差和陡峭的过渡带，陡峭的过渡带可以减小绝对误差，提高滤波速度。

3) 反 Chebyshev 滤波器

反 Chebyshev 滤波器又称为 Chebyshev II 型滤波器，其幅频响应表达式为：

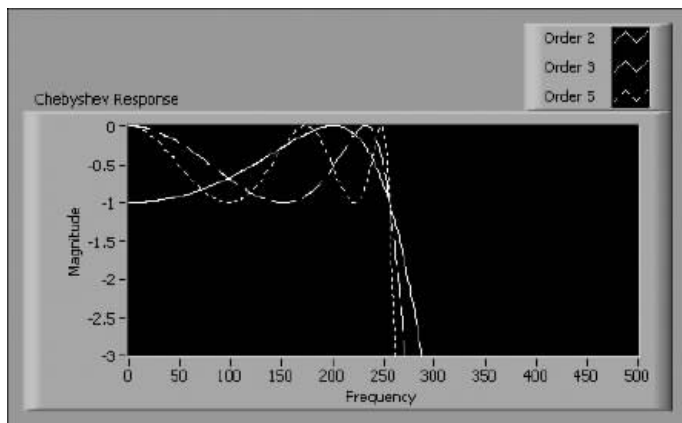


图 5-5 Chebyshev 低通滤波器的幅频特性曲线

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \right]^{-1}}} \quad (5-6)$$

式 (5-6) 中各参数的意义同切比雪夫滤波器的幅频响应表达式 (5-4) 中参数的意义。反 Chebyshev 滤波器有以下幅频特性：

- 阻带内峰值误差最小。
- 阻带内具有等幅的纹波起伏特性。
- 通带内幅频响应单调下降且具有更大的衰减。
- 与 Butterworth 滤波器相比，过渡迅速。

反 Chebyshev 滤波器与切比雪夫滤波器类似，但是通过比较两者的幅频特性可以发现不同之处，另外反 Chebyshev 滤波器将误差分散到阻带中。反 Chebyshev 低通滤波器的幅频特性曲线如图 5-6 所示。注意反 Chebyshev 低通滤波器阻带的最大纹波误差和陡峭的过渡带，陡峭的过渡带可以减小绝对误差，提高滤波速度。

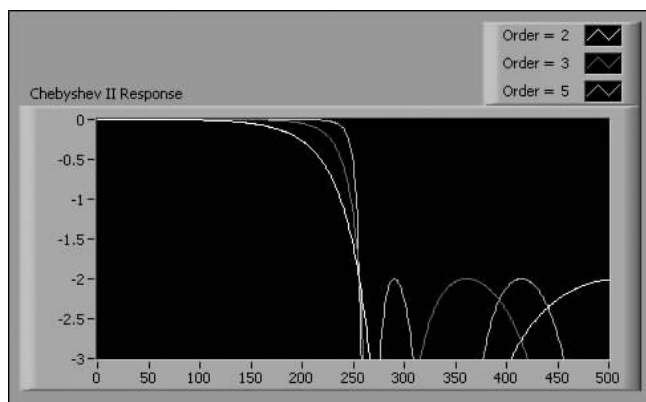


图 5-6 反 Chebyshev 低通滤波器的幅频特性曲线

相比于 Butterworth 滤波器，反 Chebyshev 低通滤波器和 Chebyshev 低通滤波器有着相同的优点，即在通带与阻带之间能够达到快速的过渡，并且这种快速的过渡能够产生较

小的绝对误差和较快的滤波执行速度。

Chebyshev 滤波器在过渡带比 Butterworth 滤波器的衰减快，但频率响应的幅频特性不如后者平坦。Chebyshev 滤波器和理想滤波器的频率响应曲线之间的误差最小，但是在通带内存在幅度波动。如果需要快速衰减而允许通带存在少许幅度波动，可用 Chebyshev 滤波器；如果需要快速衰减而不允许通带存在幅度波动，用反 Chebyshev 滤波器。

4) 椭圆滤波器

椭圆滤波器的幅频响应表达式为：

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 R_n\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}} \quad (5-7)$$

式中， ω_c 为通带截止频率； n 为滤波器的阶数； ϵ 为纹波系数，表示纹波情况； R_n 为 n 阶雅可比椭圆函数。

椭圆滤波器有以下幅频特性：

- 在通带和阻带内峰值误差最小。
- 在通带和阻带内均为等纹波起伏特性。

与相同阶数的 Butterworth 和 Chebyshev 滤波器相比，椭圆滤波器在通带和阻带之间的过渡带最为陡峭，因此，椭圆滤波器有很广泛的应用。椭圆低通滤波器的幅频特性曲线如图 5-7 所示。注意椭圆滤波器的通带和阻带中的最大纹波误差和陡峭的过渡带，甚至椭圆滤波器能够以较低的阶数获得较窄的过渡带宽，但是它在通带和阻带上都有波动。

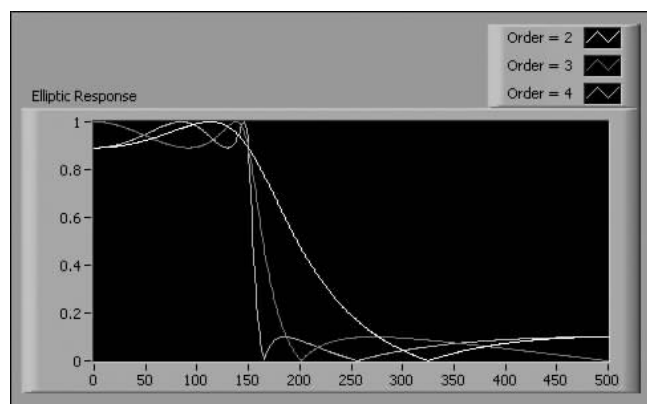


图 5-7 椭圆低通滤波器的幅频特性曲线

椭圆低通滤波器在通带和阻带内均为等纹波，比 Butterworth 和 Chebyshev 滤波器有更陡的下降斜坡，但损失了通带和阻带内的纹波指标。椭圆滤波器相比其他类型的滤波器，在阶数相同的条件下有着最小的通带和阻带波动。它在通带和阻带的波动相同，这一点区别于在通带和阻带都平坦的 Butterworth 滤波器，以及通带平坦、阻带等纹波或是阻带平坦、通带等纹波的切比雪夫滤波器。

5) 贝塞尔滤波器

在电子学和信号处理领域，贝塞尔滤波器是具有最大平坦的群延迟（线性相位响应）的线性滤波器。贝塞尔滤波器常用在音频天桥系统中。模拟贝塞尔滤波器在几乎整个通带

都具有恒定的群延迟,因而在通带上保持了被过滤的信号波形。滤波器得名于德国数学家弗雷德里希·贝塞尔,他发展了滤波器的数学理论基础。

贝塞尔滤波器又称为最平时延或恒时延滤波器。其相移和频率成正比,即时移 τ 值对所有频率为一常数,其关系表达式为:

$$\tau = -\frac{d}{d\omega}\varphi(\omega) \quad (5-8)$$

即信号经过贝塞尔滤波器后相移近似于线性,在 $0 \sim \omega_0$ 的频率范围内,时延 $\tau \approx \frac{1}{\omega_0}$ 。

随着滤波器阶数 n 的增加,近似程度也随之增强。

贝塞尔滤波器有以下幅频特性:

- 最平稳的幅度和相位响应。
- 在通带内相位响应接近于线性。

贝塞尔低通滤波器的幅频和相频特性曲线如图 5-8 和图 5-9 所示。

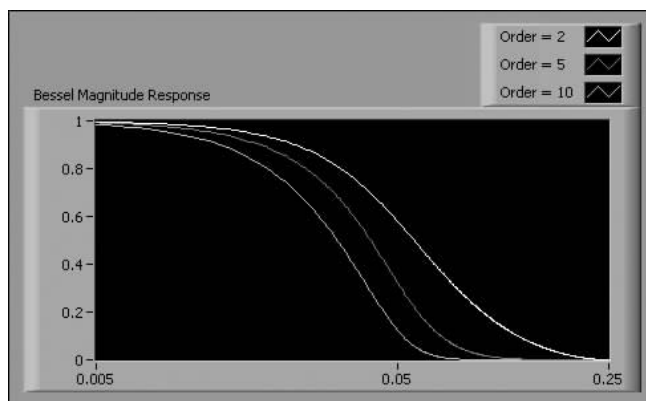


图 5-8 贝塞尔低通滤波器的幅频特性曲线

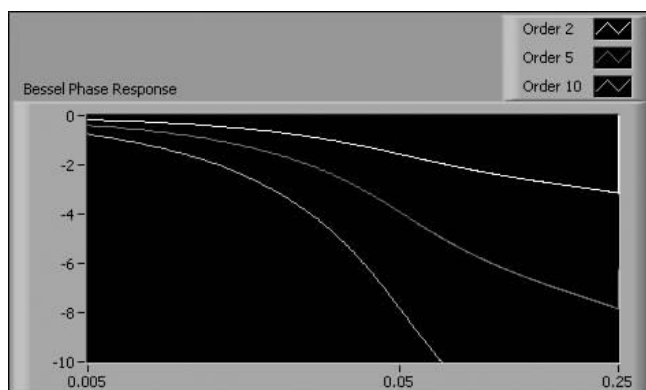


图 5-9 贝塞尔低通滤波器的相频特性曲线

用户可以使用贝塞尔滤波器来减小 IIR 滤波器固有的非线性相位畸变。IIR 滤波器的阶数越高,过渡带越陡峭,非线性相位畸变就越明显。贝塞尔滤波器必须通过提高阶数来减小峰值误差,因此,它的应用范围是有限的。在实际应用中,可以通过设计 FIR 滤波器

来实现线性的相位响应。

除了以上介绍的滤波器类型，还有中值滤波器，反幂律滤波器、 $\frac{1}{f}$ 滤波器等，用户可以参考其他滤波器相关书籍学习掌握，这里不再一一介绍。

5.1.4 实际（非理想）数字滤波器的基本参数设置

在实际工程应用中，常用的有 Butterworth、Chebyshev、反 Chebyshev、椭圆、贝塞尔等数字滤波器，它们都是借助于已相当成熟的同名模拟滤波器而设计的，因此有雷同的特性参数。

1. 滤波器类型选择

首先要选择滤波器的通过频带类型，即在低通、高通、带通或带阻滤波器中选择一个类型。带通指的是滤波器的某一设定的频率范围，在这个频率范围内的波形可以以最小的失真通过滤波器。通常，这个带通范围内的波形幅度既不增大也不缩小，称它为单位增益 (0dB)。带阻指的是滤波器使某一频率范围的波形不能通过。理想情况下，数字滤波器有单位增益的带通，完全不能通过的带阻，并且从带通到带阻的过渡带宽为零。在实际情况下，则不能满足上述条件。特别是从带通到带阻总有一个过渡过程，在一些情况下，使用者应精确说明过渡带宽。在有些应用场合，在带通范围内放大系数不等于单位增益是允许的。这种带通范围内的增益变化叫作带通纹波。另外，带阻衰减也不可能是无穷大，必须定义一个满意值。带通纹波和带阻衰减都是以分贝 (dB) 为单位，定义如下：

$$\text{dB} = 20 \times \log (A_o(f)/A_i(f))$$

其中， $A_o(f)$ 和 $A_i(f)$ 是某个频率等于 f 的信号进出滤波器的幅度值。

其次要确定选择 FIR 滤波器还是 IIR 滤波器，因为这两者在设计时是完全不同的，如果选择 IIR 滤波器，最后还要选择用哪种最佳特性逼近方式实现滤波器特性，即在 Butterworth 滤波器、Chebyshev 滤波器、椭圆滤波器、贝塞尔滤波器等类型中选择一个。

2. 截止频率

对低通滤波只需确定上截止频率，高通滤波只需确定下截止频率，对带通和带阻滤波应确定上、下截止频率。

3. 采样频率

一般软件中数字滤波器模板中的频率都是归一化的频率，归一化的频率通过采样频率这一参数和实际频率对应起来。对各种类型滤波，采样频率均应设置成滤波器输入信号的采样频率。

4. 滤波器的阶数

滤波器的阶数越高，其幅频特性曲线过渡带衰减越快。

5. 纹波幅度

Chebyshev 滤波器通带段幅频特性呈波纹状，需此参数控制纹波幅度，一般取 0.1dB。Butterworth 和贝塞尔滤波器通带段幅频特性曲线比较平坦，不需要此参数。

5.1.5 数字滤波器的选择

在选择滤波器时，用户要考虑实际应用的需求，如是否需要线性的相频响应，是否允许纹波存在，是否需要窄的过渡带等因素。图 5-10 所示给出了一个选择滤波器的大致步

骤。当然在实际应用中,需要多次实验才能选择确定出最合适类型的滤波器。

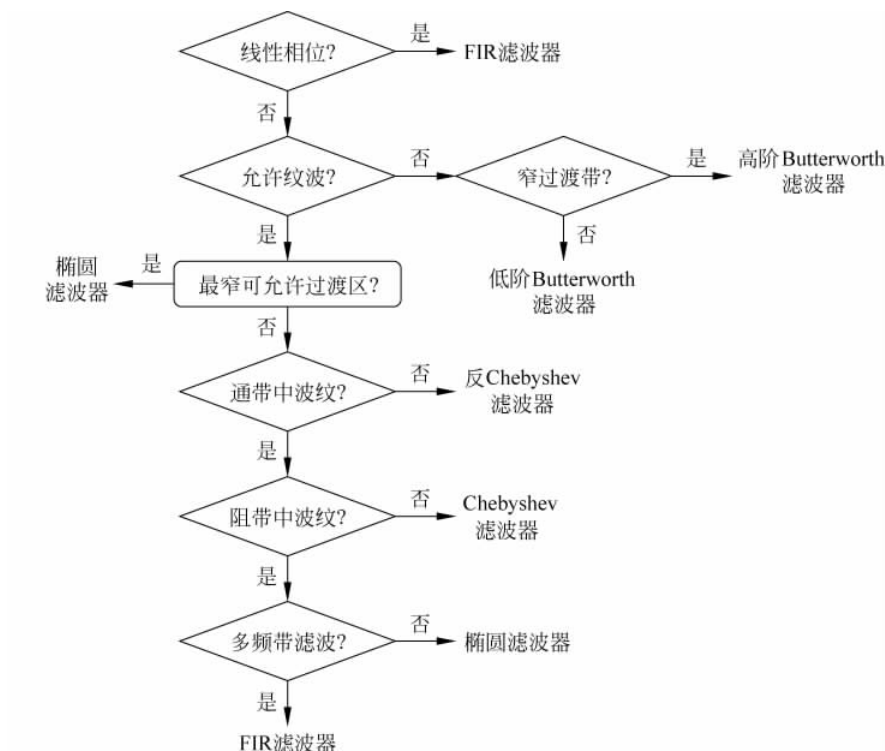


图 5-10 滤波器选择向导流程图

5.2 LabVIEW 中的数字滤波器

在测试 VI 中,也可以利用 LabVIEW 提供的滤波器 VI 对信号进行去噪或提取特定频率信号。灵活应用各种数字信号滤波器,是对数字信号进行正确分析的重要步骤和手段。本节所涉及的数字滤波器都符合虚拟仪器的使用方法。它们可以处理所有的设计问题、计算、内存管理,并在内部执行实际的数字滤波功能。这样用户无须成为一个数字滤波器或者数字滤波的专家就可以对数据进行处理。

LabVIEW 中提供了大量的滤波器函数,包括 Express VI 的滤波器 VI、波形调理 VI 的滤波器 VI 和“函数”选板中的滤波器 VI 三部分。无论是 IIR 滤波器还是 FIR 滤波器都可实现,可传递的信号数据类型也包括波形信号和数组信号两种,可供用户灵活调用。它使得用户无须较高深的数学知识和对于系统与滤波器之间关系的深入了解也可以对数据进行滤波处理。用户可以在 LabVIEW 中用数字滤波器控制滤波器的类型、阶次、截止频率、脉动量和阻带衰减等参数。

5.2.1 Express VI 的滤波器 VI

Express VI 中的滤波器 VI 设置了针对所有类型的滤波器选项,位于程序框图窗口中的“函数”选板→Express→“信号分析”→“滤波器”,如图 5-11 所示。



图 5-11 Express VI 中的滤波器 VI

用户单击图 5-11 中的滤波器 VI 图标，弹出如图 5-12 所示的配置滤波器对话框。在这个配置滤波器的对话框中，配置了一个低截止频率为 100Hz、高截止频率为 400Hz 的四阶

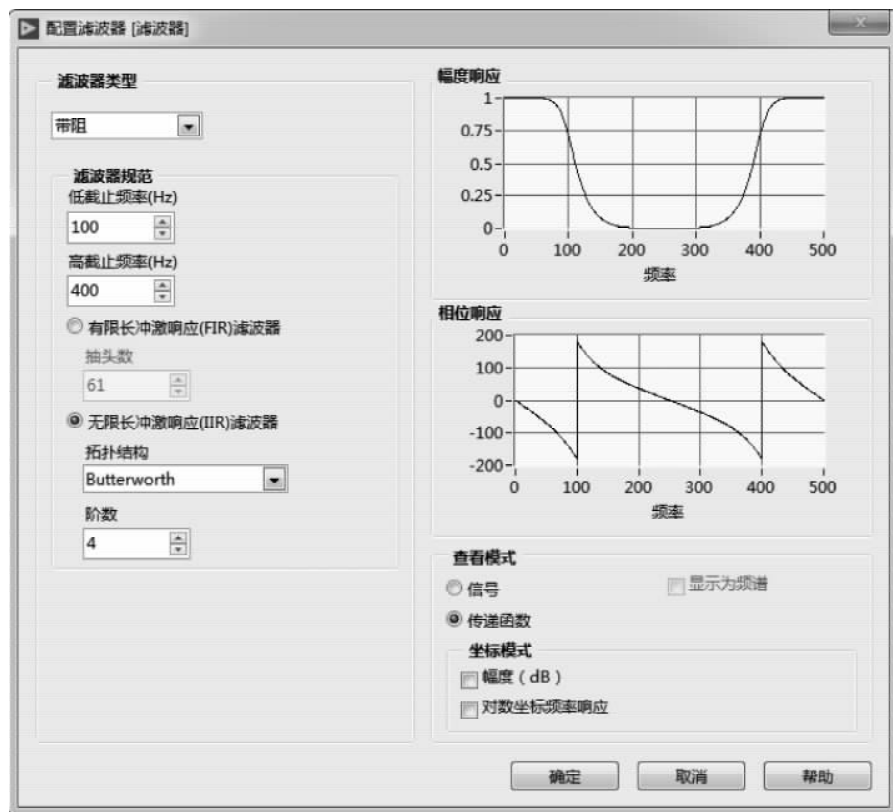


图 5-12 Butterworth 带阻 IIR 配置滤波器对话框

Butterworth 带阻滤波器 (IIR 型滤波器), 在图 5-12 所示的右边两个窗口中分别显示了幅度响应曲线和相位响应曲线。

另外, 图 5-13 也给出了带阻 FIR 滤波器配置对话框, 在这个配置滤波器的对话框中, 配置了一个低截止频率为 100Hz、高截止频率为 400Hz、抽头数为 57 的带阻滤波器 (FIR 型滤波器), 在图 5-13 的右边两个窗口中分别显示了幅度响应曲线和相位响应曲线。

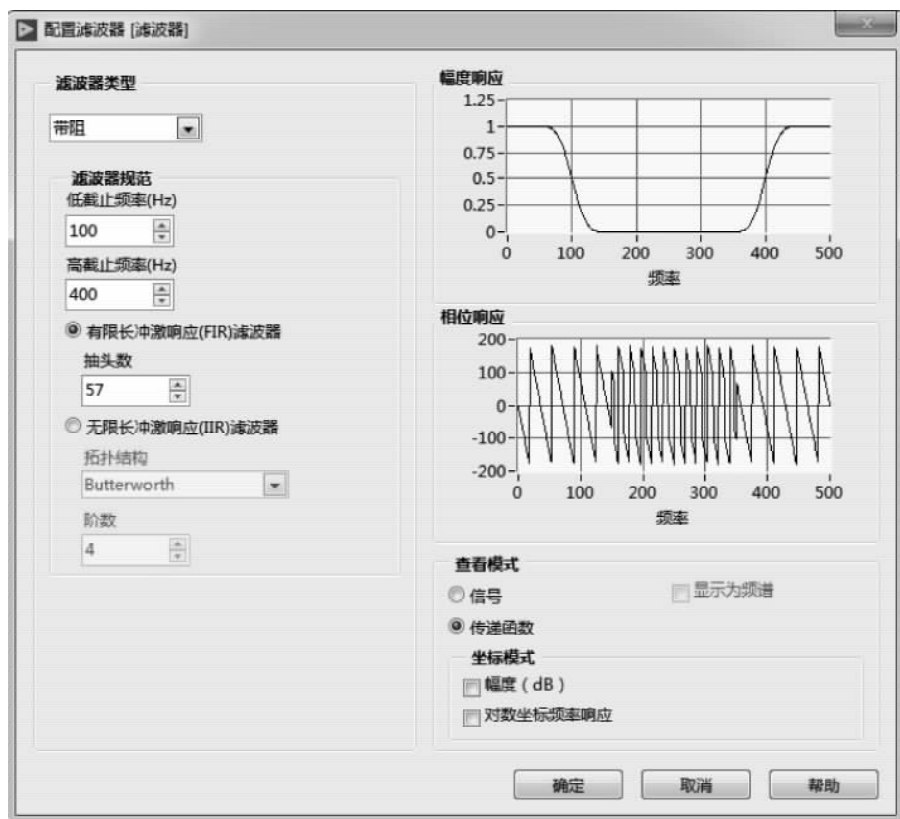


图 5-13 带阻 FIR 配置滤波器对话框

在图 5-12 和图 5-13 的配置滤波器对话框中, 有“滤波器类型”“滤波器规范”“查看模式”及“坐标模式”四个设置区域, 用户根据实际需要对其进行配置, 配置完成后可通过“幅度响应”以及“相位响应”查看结果。

【例 5.2.1】 波形转换至动态数据类型。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-14 所示, 图中用“信号操作”选板上的“转换至动态数据”函数将生成的基本混合单频波形数据转换至动态数据, 再利用“信号分析”选板上的“滤波器 Express VI”对信号进行滤波并显示。

【例 5.2.2】 Express 滤波器。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-15 所示。该例程中有一正弦信号与均匀白噪声叠加的仿真信号, 通过设置 Express VI 中的滤波器 VI 的参数, 对该仿真信号进行滤波处理并显示, 同时对各个参数进行单频测量并显示, 可以清楚地看到仿真信号参数与实际的单频测量参数的数值的差别。

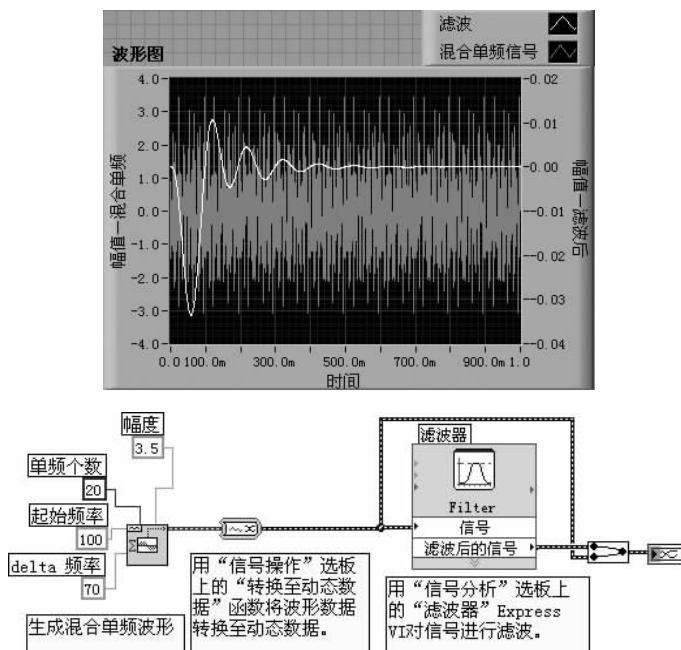


图 5-14 波形转换至动态数据类型

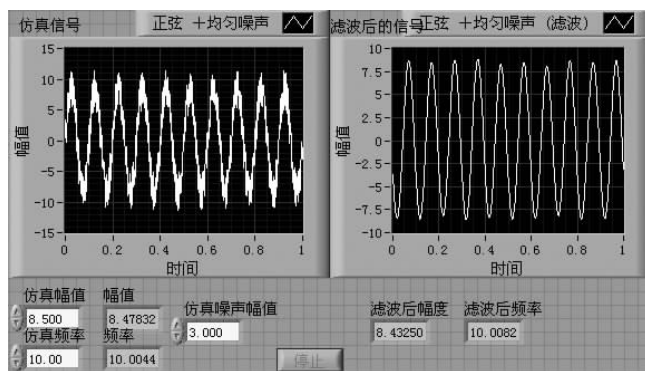


图 5-15 Express 滤波器

【例 5.2.3】 使用 Express VI 滤波器实现带通滤波, 同时对原始信号和滤波后信号进行频谱分析并显示。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-16 所示。该例程中有一正弦信号与均匀白噪声叠加的仿真信号, 通过设置 Express VI 中的滤波器 VI 的参数, 对该仿真信号进行滤波处理并显示, 同时对原始信号和滤波后信号进行频谱分析并显示。

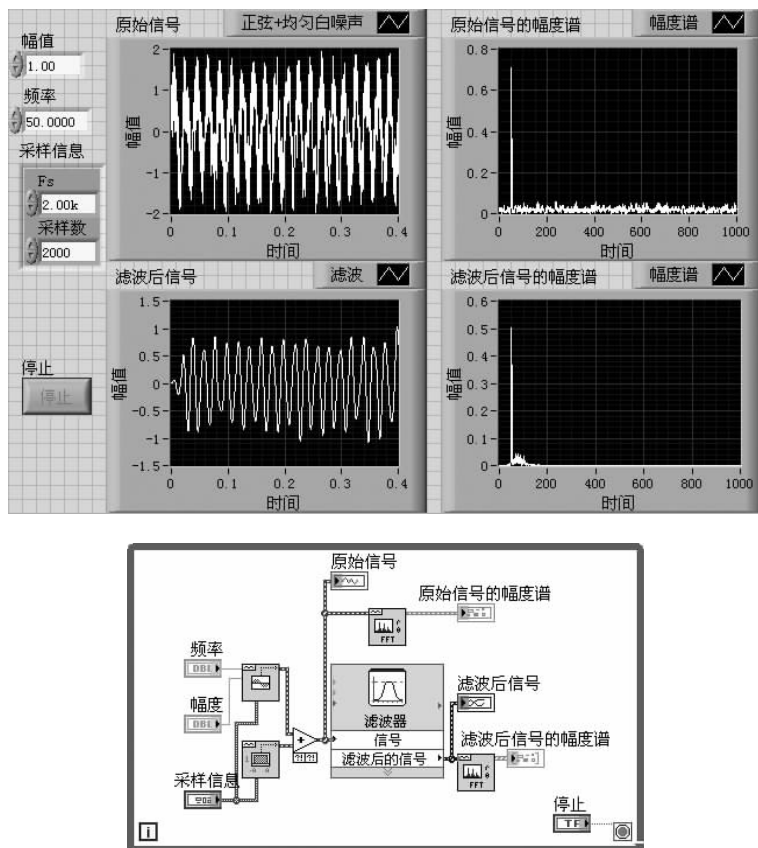


图 5-16 使用 Express VI 滤波器实现带通滤波及频谱分析

5.2.2 波形调理 VI 的滤波器 VI

波形调理 VI 中的滤波器 VI 处于“函数”选板→“信号处理”→“波形调理”子函数选板中, 如图 5-17 所示, 包括数字 FIR 滤波器和数字 IIR 滤波器。对于这两类滤波器 VI 的详细用法用户可以参考 LabVIEW 即时帮助信息进行学习掌握。但用户值得注意的是, 波形滤波器 VI 和 Express 滤波器 VI 的一个重要区别是两者的参数设置方式不同, 波形滤波器 VI 使用接线端口方式进行参数设置, 而 Express 滤波器 VI 使用配置对话框进行参数设置; 另一个区别是 Express 滤波器 VI 只能是一个滤波器对一个输入信号进行滤波处理, 而波形滤波器 VI 可以扩展至多个不同特性的滤波器对多个不同的信号进行处理, 因此增加了 VI 的灵活性, 在进行信号滤波处理时可以减少程序的大小, 增加程序的可读性。

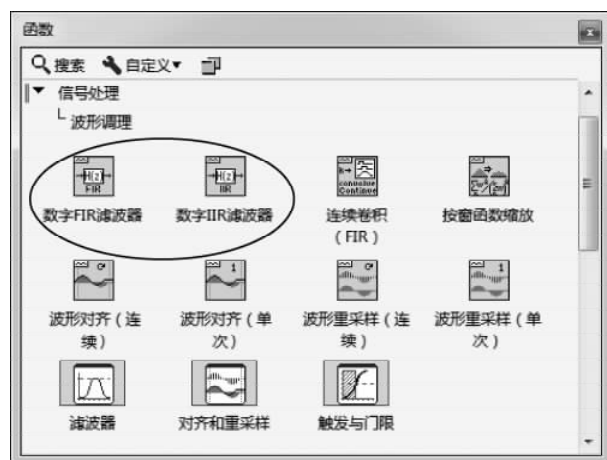


图 5-17 波形调理 VI 中的滤波器 VI

用户可以对波形调理 VI 中的这两类滤波器 VI 的各个端口进行设置，其中，数字 FIR 滤波器和数字 IIR 滤波器的最佳逼近函数类型与功能基本类型分别如图 5-18 和图 5-19 所示。

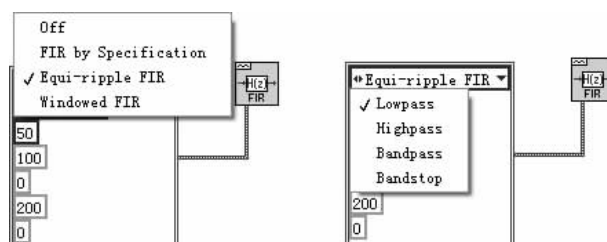


图 5-18 数字 FIR 滤波器最佳逼近函数类型与功能基本类型

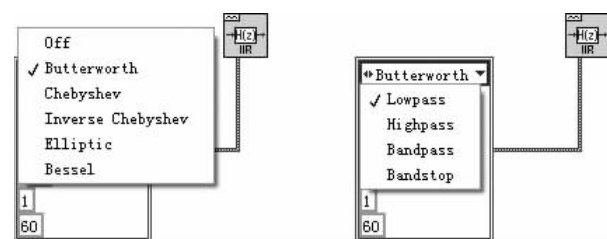


图 5-19 数字 IIR 滤波器最佳逼近函数类型与功能基本类型

另外，用户对多个波形进行滤波，VI 在每个输入波形上使用不同的滤波器，并为每个波形保持独立的滤波器状态。用户可对数字 FIR 滤波器和数字 IIR 滤波器这两种类型的滤波器选择类型，如右击数字 FIR 滤波器图标，在弹出的快捷菜单中选择“选择类型”，其中，有供用户选择的多种方式，如图 5-20 所示。数字 IIR 滤波器的操作也与此相同。

【例 5.2.4】 波形滤波器 VI 进行多通道信号多种参数滤波。该例程中有两路输入信号，分别是幅度为 2V、频率为 10Hz 的正弦波和幅度为 1V、频率为 20Hz 的三角波，初



图 5-20 数字 FIR 滤波器选择类型

相位都为 0，显示两路输入信号，并对其滤波处理，编程实现三角波信号经六阶切比雪夫低通滤波器滤波后的幅频特性及相频特性曲线。在程序框图中，分别设置了两个通道波形的不同的滤波器参数，数字 IIR 滤波器的选择类型为“用于 N 通道的 N 规范 IIR 滤波器”。“用于 N 通道的 N 规范 IIR 滤波器 VI”的图标和端口如图 5-21 所示。



图 5-21 用于 N 通道的 N 规范 IIR 滤波器 VI 的图标和端口

各主要接线端口解释如下。

- “重置滤波器”的值为 TRUE 时，可重新设计滤波器系数，强制重置内部滤波器状态为 0。
- “信号输入”该波形数组包含要进行滤波的信号。
- “滤波器结构选项”指定 IIR 级联滤波器的阶数。0：IIR 二阶——返回 IIR 二阶滤波器阶段；1：IIR 四阶——返回 IIR 四阶滤波器阶段；2：“自动选择（默认）”——依据“类型”返回 IIR 二阶或 IIR 四阶滤波器阶段。如“类型”为低通或高通，该 VI 可返回 IIR 二阶滤波器阶段；如“类型”为带通或带阻，该 VI 可返回 IIR 四阶滤波器阶段。
- “IIR 滤波器规范”是该数组包含滤波器参数。数组的大小必须与信号输入数组中的波形数量一致。默认值为空数组。“IIR 滤波器规范”是包含 IIR 滤波器设

计参数的簇。

(1) “拓扑结构”确定滤波器的设计类型。0: Off; 1: Butterworth; 2: Chebyshev; 3: Inverse Chebyshev; 4: Elliptic; 5: Bessel。

(2) “类型”依据以下值指定滤波器的通带。0: Lowpass; 1: Highpass; 2: Bandpass; 3: Bandstop。

(3) “阶数”是滤波器的阶数。如“阶数”为0, 滤波器可通过“可选 IIR 滤波器规范”计算阶数。

(4) “低截止频率”是低截止频率, 必须符合 Nyquist 准则。Nyquist 准则为: $0 < f_l < 0.5f_s$, f_l 是截止频率, f_s 是采样频率。如“低截止频率”小于0或大于采样频率的1/2, VI可设置“信号输出”波形为空, 并返回错误。默认值为100。

(5) “高截止频率”是高截止频率。如“类型”为0 (Lowpass) 或1 (Highpass), LabVIEW 可忽略该参数。

(6) “通带波纹”必须大于0, 以分贝为单位。如“通带波纹”小于等于0, VI可设置“信号输出”波形为空, 并返回错误。默认值为1.0。

(7) “阻带衰减”指定阻带衰减。“阻带衰减”必须大于0, 以分贝为单位。如“阻带衰减”小于等于0, VI可设置信号输出波形为0或空数组, 并返回错误。默认值为60.0。

- “可选 IIR 滤波器规范”是该数组包含附加滤波器参数。数组必须为空, 或与“IIR 滤波器规范”数组大小一致。“可选 IIR 滤波器规范”簇包含计算 IIR 滤波器阶数所需的信息。

(1) “最低通带”是两个通带频率中的较低值, 默认值为100 Hz。

(2) “最高通带”是两个通带频率中的较高值, 默认值为0。

(3) “最低阻带”是两个阻带频率中的较低值, 默认值为200 Hz。

(4) “最高阻带”是两个阻带频率中的较高值, 默认值为0。

(5) “通带增益”是通带频率的增益。增益按线性或 dB 设定, 默认值为-3dB。

(6) “阻带增益”是阻带频率的增益。增益按线性或 dB 设定, 默认值为-60dB。

(7) “标尺”确定解析通带和阻带增益参数的方式。

- “信号输出”该信号数组中的信号已依据滤波器规范控件进行滤波。

- “滤波器信息”簇包含滤波器的幅度和相位响应, 可绘制成图形。“滤波器信息”中还包含滤波器的阶数。

(1) “幅度 $H(\omega)$ ”是滤波器的幅度响应。可连线该簇至图形。“ f_0 ”是幅度响应的起始频率; “ df ”是幅度响应中元素之间的间距, 以赫兹为单位; “幅度 $H(\omega)$ ”是该数组中包含滤波器的幅度响应。

(2) “相位 $H(\omega)$ ”是滤波器的相位响应。“ f_0 ”是相位响应的起始频率; “ df ”是幅度响应中元素之间的间距, 以赫兹为单位。“相位 $H(\omega)$ ”是该数组包含滤波器的相位响应, 以度为单位。

(3) “阶数”是滤波器的阶数。

实现该例程的前面板和程序框图如图 5-22 所示。

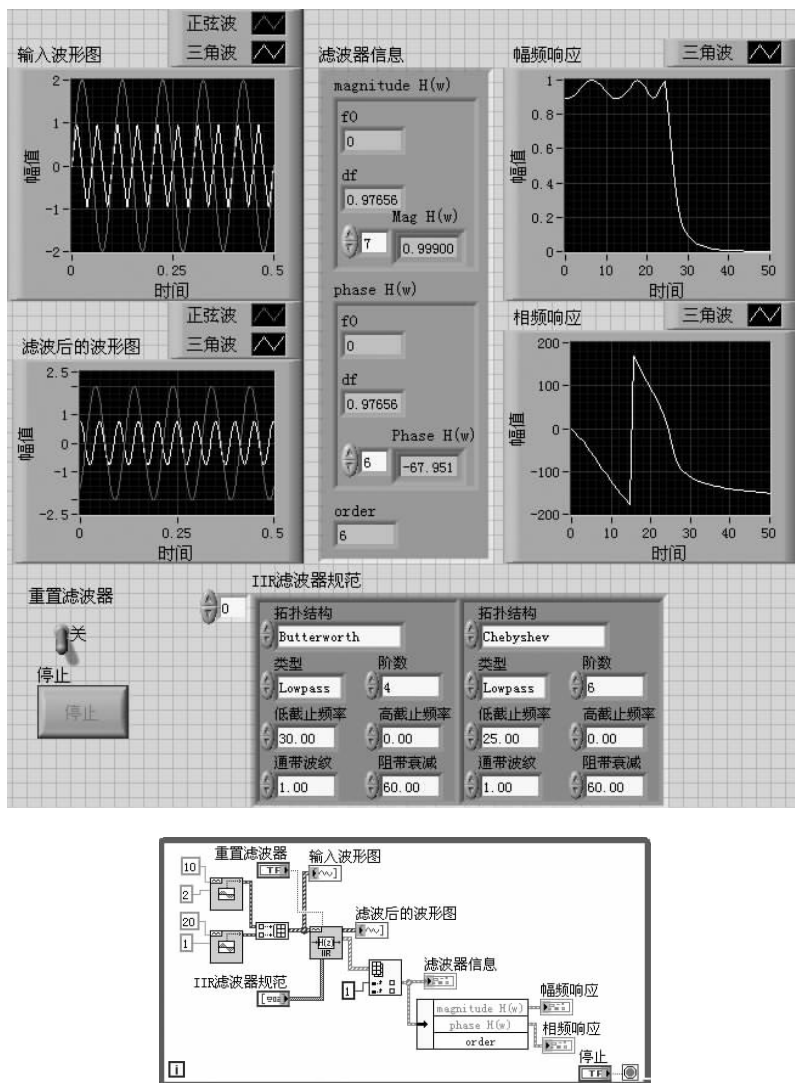


图 5-22 波形滤波器 VI 进行多通道信号多种参数滤波

5.2.3 “函数”选板的滤波器 VI

“函数”选板中的“滤波器”子函数选板提供了多种常用的滤波器，并且提供了设计 FIR 和 IIR 滤波器的 VI，使用起来非常方便，只需输入相应的指标参数即可。滤波器子函数选板位于“函数”选板→“信号处理”→“滤波器”子函数选板中，如图 5-23 所示。

由图 5-23 可以看出，LabVIEW 2017 提供了丰富的滤波器 VI 函数，其中，IIR 滤波器类型有 Butterworth、Chebyshev、反 Chebyshev、椭圆和贝塞尔滤波器。根据前面已经讲述的各个类型滤波器的原理，所以它们的用途也不尽相同。

- Butterworth 滤波器在所有频率上提供最大平坦的幅频特性响应，但是过渡带下降较为缓慢，过渡带的陡峭程度正比于滤波器的阶数。

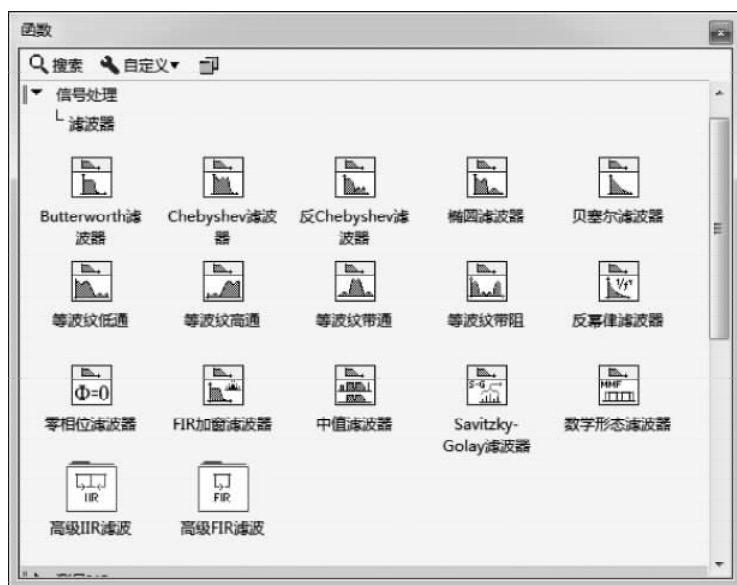


图 5-23 “滤波器”子函数选板

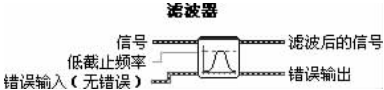
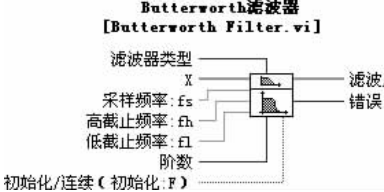
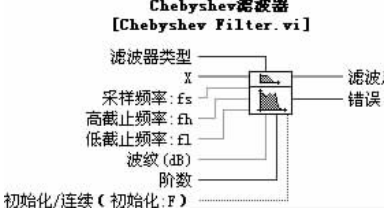
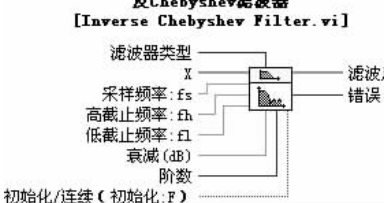
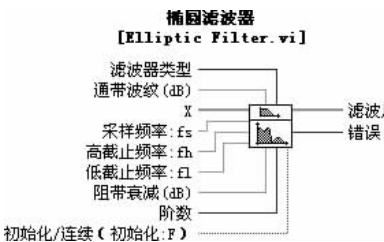
- Chebyshev 滤波器在通带中具有等幅的纹波起伏特性，阻带中单调衰减，过渡迅速。
- 反 Chebyshev 滤波器与 Chebyshev 滤波器类似，不同的是反 Chebyshev 滤波器在阻带内具有等幅的纹波起伏特性，将误差分散到阻带中。
- 椭圆滤波器在通带和阻带内峰值误差最小，且均为等纹波起伏特性。与相同阶数的 Butterworth 和 Chebyshev 滤波器相比，椭圆滤波器在通带和阻带之间的过渡带最为陡峭，因此它有很广泛的应用。
- 贝塞尔滤波器具有最平稳的幅度和相位响应，在通带内相位响应接近于线性。必须通过提高阶数来减小峰值误差，因此，它的应用范围是有限的。

LabVIEW 2017 提供的 FIR 滤波器函数 VI 有 FIR 加窗滤波器和基于 Parks-McClellan 算法的等波纹低通、等波纹高通、等波纹带通、等波纹带阻等优化滤波器。

另外，在“函数”选板→“信号处理”→“滤波器”子函数选板下，还有与数字滤波器相关的两个高级 VI 库，分别是“高级 IIR 滤波”和“高级 FIR 滤波”，在这两个高级滤波器子选板中，滤波器的设计和执行 VI 含有一些更高级的功能选项，而且滤波器的设计部分和滤波器的执行部分是分开的。这样可以预先进行滤波器的设计，因为滤波器的设计花费时间较长，但滤波过程则很快。因此，在含有循环结构的程序中，可以将滤波器的设计部分放在循环体之外，将设计好的滤波器系数传递到循环中，在循环内只进行滤波处理，就可以免去设计部分的循环调用，从而可以提高程序的执行效率。

LabVIEW 2017 提供的数字滤波器 VI 的信息总结表如表 5-1 所示。用户值得注意的是，对于一般不太复杂的应用，可以使用表 5-1 中所列举的普通滤波器 VI 即可实现滤波器的设计。

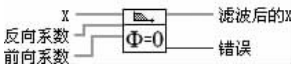
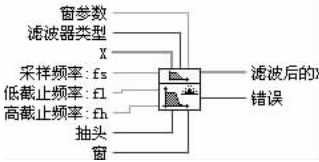
表 5-1 数字滤波器 VI 信息总结表

在函数选板中的位置	图标及端口	节点名称 功能描述
“Express” → “信号分析”	 该图标显示了“数字滤波器 Express VI”的界面。它包含一个信号输入端口，一个低截止频率设置，一个错误输入（无错误）端口，以及滤波后的信号输出和错误输出。	数字滤波器 Express VI，可提供简单友好界面供用户设置滤波器参数
“信号处理” → “波形调理”	 该图标显示了“数字 FIR 滤波器 [Digital FIR Filter.vi]”的界面。它包含重置滤波器、信号输入、错误输入（无错误）、FIR 滤波器规范、可选 FIR 滤波器规范、信号输出、滤波器信息和错误输出。	使用所设定的 FIR 滤波器对输入波形信号进行滤波
	 该图标显示了“数字 IIR 滤波器 [Digital IIR Filter.vi]”的界面。它包含重置滤波器、信号输入、滤波器结构选项、错误输入（无错误）、IIR 滤波器规范、可选 IIR 滤波器规范、信号输出、滤波器信息和错误输出。	使用所设定的 IIR 滤波器对输入波形信号进行滤波
	 该图标显示了“数字滤波器 Express VI”的界面。它包含一个信号输入端口，一个低截止频率设置，一个错误输入（无错误）端口，以及滤波后的信号输出和错误输出。	数字滤波器 Express VI，可提供简单友好界面供用户设置滤波器参数
“信号处理” → “滤波器”	 该图标显示了“Butterworth 滤波器 [Butterworth Filter.vi]”的界面。它包含滤波器类型、X、采样频率: f_s、高截止频率: f_h、低截止频率: f_l、阶数、初始化/连续（初始化: F）、滤波后的 X 和错误。	Butterworth 滤波器，通过调用 Butterworth 系数 VI，生成数字 Butterworth 滤波器
	 该图标显示了“Chebyshev 滤波器 [Chebyshev Filter.vi]”的界面。它包含滤波器类型、X、采样频率: f_s、高截止频率: f_h、低截止频率: f_l、波纹 (dB)、阶数、初始化/连续（初始化: F）、滤波后的 X 和错误。	Chebyshev 滤波器，通过调用 Chebyshev 系数 VI，生成数字 Chebyshev 滤波器
	 该图标显示了“反 Chebyshev 滤波器 [Inverse Chebyshev Filter.vi]”的界面。它包含滤波器类型、X、采样频率: f_s、高截止频率: f_h、低截止频率: f_l、衰减 (dB)、阶数、初始化/连续（初始化: F）、滤波后的 X 和错误。	反 Chebyshev 滤波器，通过调用反 Chebyshev 系数 VI，生成数字 Chebyshev II 滤波器
	 该图标显示了“椭圆滤波器 [Elliptic Filter.vi]”的界面。它包含滤波器类型、通带波纹 (dB)、X、采样频率: f_s、高截止频率: f_h、低截止频率: f_l、阻带衰减 (dB)、阶数、初始化/连续（初始化: F）、滤波后的 X 和错误。	椭圆滤波器，通过调用椭圆滤波器系数 VI 生成数字椭圆滤波器

续表

在函数选板中的位置	图标及端口	节点名称 功能描述
“信号处理”→ “波形调理”	贝塞尔滤波器 [Bessel Filter.vi]	贝塞尔滤波器，通过调用贝塞尔系数 VI，生成数字贝塞尔滤波器
	等波纹低通 [Equi-Ripple LowPass.vi]	等波纹低通滤波器，通过 Parks-McClellan 算法和抽头数、通带截止频率、阻带截止频率、采样频率 f_s ，生成具有等波纹特性的低通 FIR 滤波器。然后，该 VI 在输入序列 X 上应用线性相位低通滤波器，使用卷积 VI 获得滤波后的 X
	等波纹高通 [Equi-Ripple HighPass.vi]	等波纹高通滤波器，通过 Parks-McClellan 算法和抽头数、阻带截止频率、通带截止频率、采样频率 f_s ，生成高通 FIR 滤波器。然后，该 VI 在输入序列 X 上应用线性相位高通滤波器，使用卷积 VI 获得滤波后的 X
	等波纹带通 [Equi-Ripple BandPass.vi]	等波纹带通滤波器，通过 Parks-McClellan 算法和高通带截止频率、低通带截止频率、抽头数、低阻带截止频率、高阻带截止频率、采样频率 f_s ，生成具有等波纹特性的带通 FIR 滤波器。然后，该 VI 在输入序列 X 上应用线性相位带通滤波器，使用卷积 VI 获得滤波后的 X
	等波纹带阻 [Equi-Ripple BandStop.vi]	等波纹带阻滤波器，使用 Parks-McClellan 算法和高通带截止频率、低通带截止频率、抽头数、低阻带截止频率、高阻带截止频率、采样频率 f_s ，生成具有等波纹特性的带阻 FIR 滤波器。然后，该 VI 在输入序列 X 上应用线性相位带阻滤波器，使用卷积 VI 获得滤波后的 X
	反幂律滤波器 [Inverse f Filter.vi]	反幂律滤波器，设计并执行 IIR 滤波器，在指定的频域范围内，滤波器的幅度平方响应与频率成反比关系。反幂律滤波器通常用于对功率谱密度白噪声上色

续表

在函数选板中的位置	图标及端口	节点名称 功能描述
“信号处理” → “滤波器”	零相位滤波器 [Zero Phase Filter.vi] 	零相位滤波器，指定零相位滤波器的反向系数和前向系数，输出序列滤波后的 X 无相位失真。尽管零相位滤波器不是直接型，但也适用于离线的应用，例如对磁盘上的声音文件进行滤波
	FIR 加窗滤波器 [FIR Windowed Filter.vi] 	FIR 加窗滤波器，通过采样频率 f_s 、低截止频率 f_l 、高截止频率 f_h 和抽头指定的一组 FIR 加窗滤波器系数，对输入数据序列 X 进行滤波
	中值滤波器 [Median Filter.vi] 	中值滤波器，依据阶数对输入序列 X 进行中值滤波。如右秩大于零，则阶数为右秩；反之，如右秩小于零，则阶数取左秩
	Savitzky-Golay 滤波器 [Savitzky-Golay Filter.vi] 	Savitzky-Golay 滤波器，使用 Savitzky-Golay FIR 平滑滤波器对输入数据序列 X 进行滤波
	数学形态滤波器 [Mathematical Morphological Filter.vi] 	数学形态滤波器，使用数学形态滤波器，通过结构元素对输入数据序列 X 进行滤波
	高级 IIR 滤波 	高级 IIR 滤波器，用于实现高级 IIR 滤波器的相关操作
	高级 FIR 滤波 	高级 FIR 滤波器，用于实现高级 FIR 滤波器的相关操作

5.3 FIR 滤波器设计

众所周知，有限冲激响应（FIR）数字滤波器是一种非递归数字滤波器，其输出只取决于当前和以前的输入值，其设计也比较简单。FIR 数字滤波器有以下特点：

- 在设计实现时由于滤波器系数的对称性，所以 FIR 滤波器能够实现线性相位。
- FIR 滤波器的系统通常是稳定的。
- FIR 滤波器容许使用卷积滤除信号，因此，通常能与输出序列结合产生延迟，用以下等式表示：

$$delay = \frac{n-1}{2} \quad (5-9)$$

式中, n 是 FIR 滤波器抽头数。

如果用户计划使用 LabVIEW 中提供的数字滤波器设计工具包来设计数字滤波器, 需要查阅更多有关滤波器设计基础知识的书籍, 这里就不再详细讲述。

FIR 数字滤波器的设计方法主要是建立在对理想滤波器频率特性作某种近似的基础上, 这些近似方法有窗函数法、频率抽样法及最佳一致逼近法等。5.1 节的相关内容已经讲述过设计 FIR 滤波器的方法主要有两种: 一种是定义好需要的幅度响应, 然后求其 FFT 逆变换, 再将所得的时域信号加窗, 这种方法的优点是简单, 但是效率不高, 定义困难; 另一种方法是使用 Parks-McClellan 算法, 将加权后的纹波均匀分配到通带和阻带中, 并且频率响应拥有陡峭的过渡带, 这种方法的缺点是复杂, 设计周期长。

下面分别通过不同实例介绍如何使用这两种方法来设计实现 FIR 数字滤波器。

【例 5.3.1】 使用“FIR 加窗滤波器 VI”实现 FIR 加窗滤波器设计。

对于 FIR 滤波器设计, 加窗技术是一种最简单的技术, 因为概念简单、易于实现。通过加窗设计 FIR 滤波器, 实际上就是对于定义好的幅度响应进行 FFT 逆变换, 然后对其结果运用一个平滑窗处理, 该平滑窗是一个时域窗。通过加窗设计 FIR 滤波器需要完成以下步骤。

- (1) 建立一个理想滤波器的频率特性响应。
- (2) 计算该理想滤波器频率特性响应的脉冲响应。
- (3) 截断脉冲响应以产生抽头数的有限数量, 以满足线性相移约束, 保持抽头数中心点的对称性。
- (4) 应用一个相对称性的平滑窗。

值得用户注意的是, 截断理想的脉冲响应会导致 Gibbs 现象。Gibbs 现象会在 FIR 滤波器频率响应的截止频率附近出现振荡性反应。用户可以使用一个平滑窗去消除理想脉冲响应的截断, 来减少 Gibbs 现象的影响。

选择一个平滑窗时, 需要在过渡带的宽度和截止频率附近的旁瓣高度之间作一个权衡。减少截止频率附近的旁瓣高度就会增加过渡带的宽度, 同样减少过渡带的宽度就会增加截止频率附近的旁瓣高度。

为了改善 FIR 滤波器性能, 要求窗函数的主瓣宽度尽可能窄, 以获得较窄的过渡带; 旁瓣相对值尽可能小, 数量尽可能少, 以获得通带波纹小, 阻带衰减大, 在通带和阻带内均平稳的特点, 这样可使滤波器实际频率响应更好地逼近理想频率响应。最小阻带衰减只由窗形决定, 不受窗宽的影响; 而过渡带的宽度则既和窗形状有关, 也随窗宽的增加而减小。

但是通过加窗技术设计 FIR 滤波器时也有以下缺点: 效率不高, 且定义困难; 加窗会导致不均匀的纹波分配, 比其他技术更能导致较宽的过渡带; 滤波器设计时必须确定理想的截止频率、采样率、抽头数、窗类型。

但是, 通过加窗设计 FIR 滤波器不需要大量的计算, 因此, 对于设计 FIR 滤波器加窗技术是一种最快的技术。然而, 加窗技术并不是设计 FIR 滤波器最好的技术。

FIR 加窗滤波器 VI 的图标和端口如图 5-24 所示。

各主要接线端口解释如下。



图 5-24 FIR 加窗滤波器 VI 的图标和端口

- “窗参数”是 Kaiser 窗的 beta 参数、高斯窗的标准差，或 Dolph-Chebyshev 窗的主瓣与旁瓣的比率 s 。如“窗”是其他类型的窗，VI 将忽略该输入。“窗参数”的默认值是 NaN，可将 Kaiser 窗的 beta 参数设置为 0、高斯窗的标准差设置为 0.2，或者将 Dolph-Chebyshev 窗的 s 设置为 60。
- “滤波器类型”指定滤波器的通带。0：低通；1：高通；2：带通；3：带阻。
- “X”是滤波器的输入信号。
- “采样频率：fs”是 X 的采样频率并且必须大于 0，以 Hz 为单位。默认值为 1.0 Hz。如“采样频率：fs”小于等于 0，VI 将把“滤波后的 X”设置为空数组并返回错误。
- “低截止频率：fl”是低截止频率，以 Hz 为单位，并且必须满足 Nyquist 准则。默认值为 0.125 Hz。如“低截止频率：fl”小于 0 或不满足 Nyquist 准则，VI 将把“滤波后的 X”设置为空数组并返回错误。
- “高截止频率：fh”是高截止频率，以 Hz 为单位。默认值为 0.45 Hz。如“滤波器类型”为 0 (lowpass) 或 1 (highpass)，VI 会忽略该参数。“滤波器类型”为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时，“高截止频率：fh”必须大于“低截止频率：fl”并且满足 Nyquist 准则。
- “抽头”指定 FIR 系数的总数并且必须大于 0。默认值为 25。如“抽头”小于等于 0，VI 可设置“滤波后的 X”为空数组并返回错误。对于高通或带阻滤波器，“抽头”必须为奇数。
- “窗”指定平滑窗的类型。平滑窗可减少滤波器通带中的波纹，并改进滤波器对滤波器阻带中频率分量的衰减。0：矩形（默认）；1：Hanning；2：Hamming；3：Blackman-Harris；4：Exact Blackman；5：Blackman；6：Flat Top；7：4 阶 Blackman-Harris；8：7 阶 Blackman-Harris；9：Low Sidelobe；11：Blackman Nuttall；30：三角；31：Bartlett-Hanning；32：Bohman；33：Parzen；34：Welch；60：Kaiser；61：Dolph-Chebyshev；62：高斯。
- “滤波后的 X”为数组形式，该数组包含滤波后的采样。“滤波后的 X”含有卷积操作产生的相关索引延迟。计算延迟的公式为式 (5-9)。

实现该例程的前面板和程序框图如图 5-25 所示。

【例 5.3.2】 使用数字 FIR 滤波器 VI 实现 FIR 加窗滤波器设计。数字 FIR 滤波器 VI 的图标和端口如图 5-26 所示。在第 5.2.2 节已经介绍过相关知识，其主要接线端口解释如下。

- “重置滤波器”的值为 TRUE 时，滤波器系数可强制重新设定，内部滤波器状态可强制重置为 0。
- “信号输入”是要进行滤波的波形。

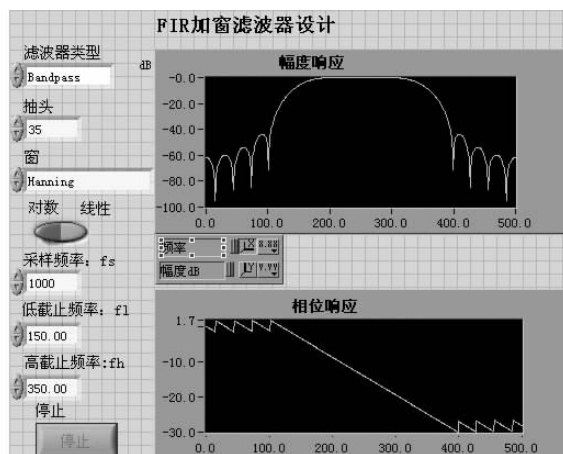


图 5-25 FIR 加窗滤波器设计

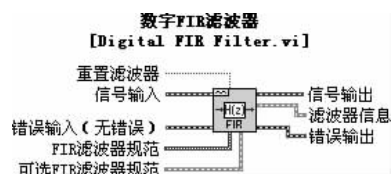
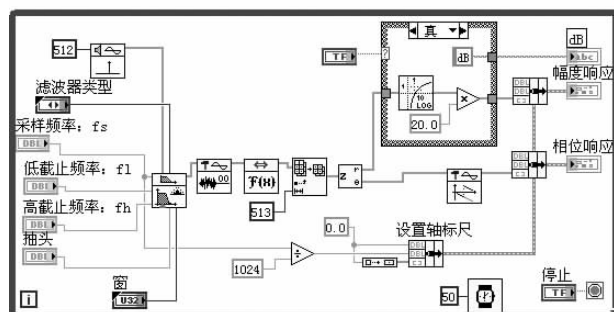


图 5-26 数字 FIR 滤波器 VI 的图标和端口

- “FIR 滤波器规范”是用于指定 FIR 滤波器的最小值。

(1) “拓扑结构”确定滤波器的设计类型。0: Off (默认); 1: FIR by Specification; 2: Equi-ripple FIR; 3: Windowed FIR。

(2) “类型”依据以下值指定滤波器的通带。0: Lowpass; 1: Highpass; 2: Bandpass; 3: Bandstop。

(3) “抽头数”是 FIR 滤波器的抽头数，默认值为 50。

(4) “最低通带”是两个通带频率中的较低值，默认值为 100Hz。

(5) “最高通带”是两个通带频率中的较高值，默认值为 0。

(6) “最低阻带”是两个阻带频率中的较低值，默认值为 200Hz。

(7) “最高阻带”是两个阻带频率中的较高值，默认值为 0。

- “可选 FIR 滤波器规范”是用于指定 FIR 滤波器的附加参数簇。

(1) “通带增益”是通带频率的增益。增益按线性或 dB 设定，默认值为 -3dB。

(2) “阻带增益”是阻带频率的增益。增益按线性或 dB 设定，默认值为 -60dB。

(3) “标尺”确定如何解析参数“通带增益”和“阻带增益”。

(4) “窗”指定用于删节系数的平滑窗。平滑窗可减少滤波器通带中的波纹，并改进滤波器对滤波器阻带中频率分量的衰减。0: None; 1: Hanning; 2: Hamming; 3: Triangular; 4:

Blackman;5:Exact Blackman;6:Blackman-Harris;7:Kaiser-Bessel;8:Flat Top。

- “信号输出”是已滤波的波形。
- “滤波器信息”包含滤波器的幅度和相位响应，可绘制成图形。“滤波器信息”中还包含滤波器的阶数。

(1) “幅度 $H(\omega)$ ”是滤波器的幅度响应。可连线至图形。“ f_0 ”是幅度响应的起始频率；“ df ”是幅度响应中元素之间的间距，以 Hz 为单位；“幅度 $H(\omega)$ ”数组中包含滤波器的幅度响应。

(2) “相位 $H(\omega)$ ”是滤波器的相位响应。“ f_0 ”是相位响应的起始频率；“ df ”是幅度响应中元素之间的间距，以 Hz 为单位；“相位 $H(\omega)$ ”数组中包含滤波器的相位响应，以度为单位。

(3) “阶数”是滤波器的阶数。

实现该例程的前面板如图 5-27 所示。程序框图在本章习题 5-4 中，请读者自行设计完成。

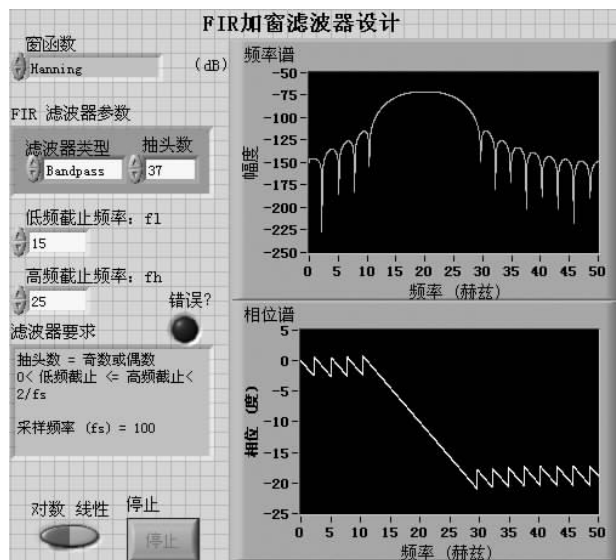


图 5-27 FIR 加窗滤波器设计

【例 5.3.3】使用基于 Parks-McClellan 算法的等波纹优化滤波器设计实现 FIR 滤波器。这里等波纹优化滤波器包括等波纹低通、等波纹高通、等波纹带通、等波纹带阻。

用户可以使用 Parks-McClellan 算法来设计等波纹 FIR 滤波器，在设计时必须确定以下参数：截止频率、抽头数、滤波器类型（如低通、高通、带通或者带阻）、通过频率、停止频率等。

实现该例程的前面板和程序框图如图 5-28 所示。

从以上实例的设计可以看出用不同方法设计实现 FIR 滤波器的优点和不足之处，更加清晰地证明了前面所讲述的 FIR 滤波器设计的理论知识，用户可以通过比较其不同之处，掌握使用 LabVIEW 设计实现 FIR 滤波器的基本步骤。

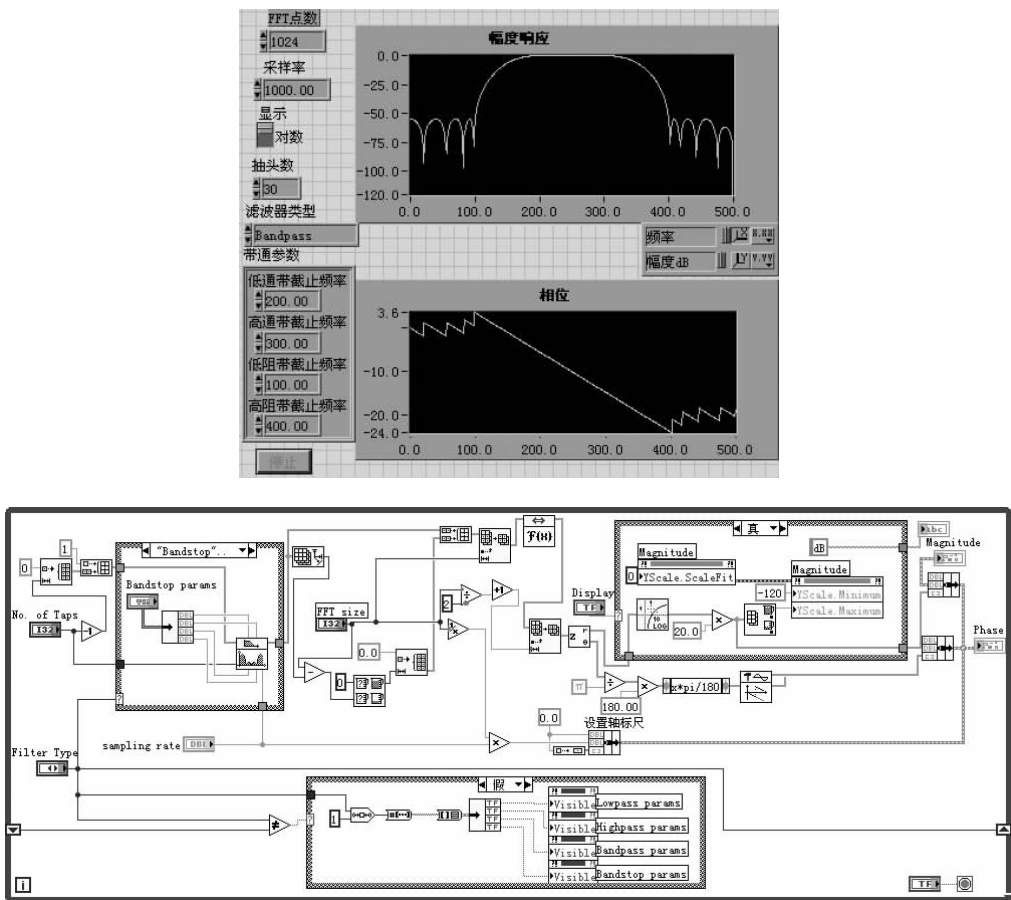


图 5-28 使用基于 Parks-McClellan 算法的等波纹优化滤波器设计实现 FIR 滤波器

5.4 Butterworth（巴特沃斯）滤波器

Butterworth 滤波器是一种著名的滤波器，可以设置为高通、低通、带通和带阻四种类型，并且可以为每一种类型设置其截止频率。Butterworth 滤波器 VI 的图标和端口如图 5-29 所示。

各主要接线端口解释如下。

- “滤波器类型”指定滤波器的通带。0：Lowpass；1：Highpass；2：Bandpass；3：Bandstop。
- “X”是滤波器的输入信号。
- “采样频率：fs”是“X”的采样频率，必须大于 0，默认值为 1.0Hz。如“采样频率：fs”小于等于 0，VI 可设置“滤波后的 X”为空数组并返回错误。

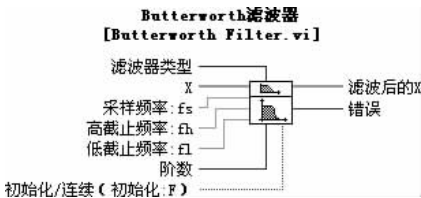


图 5-29 Butterworth 滤波器 VI 的图标和端口

- “高截止频率: fh” 是高截止频率, 以 Hz 为单位, 默认值为 0.45Hz。如“滤波器类型”为 0 (Lowpass) 或 1 (Highpass), VI 忽略该参数。“滤波器类型”为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “高截止频率: fh” 必须大于“低截止频率: fl”并且满足 Nyquist 准则。
- “低截止频率: fl” 是低截止频率, 以 Hz 为单位, 并且必须满足 Nyquist 准则, 默认值为 0.125 Hz。如“低截止频率: fl” 小于 0 或大于“采样频率”的一半, VI 可设置“滤波后的 X” 为空数组并返回错误。“滤波器类型”为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “低截止频率: fl” 必须小于“高截止频率: fh”。
- “阶数” 指定滤波器的阶数并且必须大于 0, 默认值为 2。如“阶数” 小于等于 0, VI 可设置“滤波后的 X” 为空数组并返回错误。
- “初始化/连续 (初始化: F)” 控制内部状态的初始化, 默认值为 FALSE。
- “滤波后的 X” 数组中包含滤波后的采样。

【例 5.4.1】 使用 Butterworth 低通滤波器对采集的方波信号滤波。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-30 所示。还需要指出的是原方波不以 X 轴对称, 有直流分量, 经这个低通滤波器后, 直流分量还应当存在, 曲线显示的确如此。

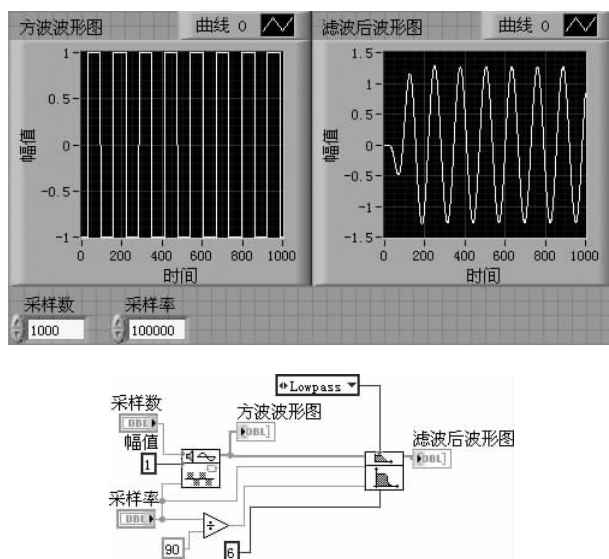


图 5-30 Butterworth 低通滤波器对采集的方波信号滤波

【例 5.4.2】 使用 Butterworth 滤波器提取正弦波形并对其进行频谱分析显示。

在信号传输过程中, 经常会混入高频噪声, 噪声的能量甚至会超过信号能量。接收端收到信号后通常首先要进行低通滤波, 然后对信号作进一步的处理。通过滤波能够有效提高信号的信噪比。

该例中原始信号是一个叠加了高频噪声的正弦波, 该正弦波信号频率为 10, 幅度为 1, 产生高频噪声的方法是将高频均匀白噪声叠加正弦信号通过一个 Butterworth 高通滤波器滤去低频分量, 再使用 Butterworth 低通滤波器对原始信号滤波, 滤掉高频噪声。截止频率为 20Hz, 即滤掉频率大于 20Hz 的噪声分量, 提取出正弦波形, 并对其进行频谱分

析显示。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-31 所示。图 5-31 中分别给出了滤波前后的波形图及各自的频谱分析图。

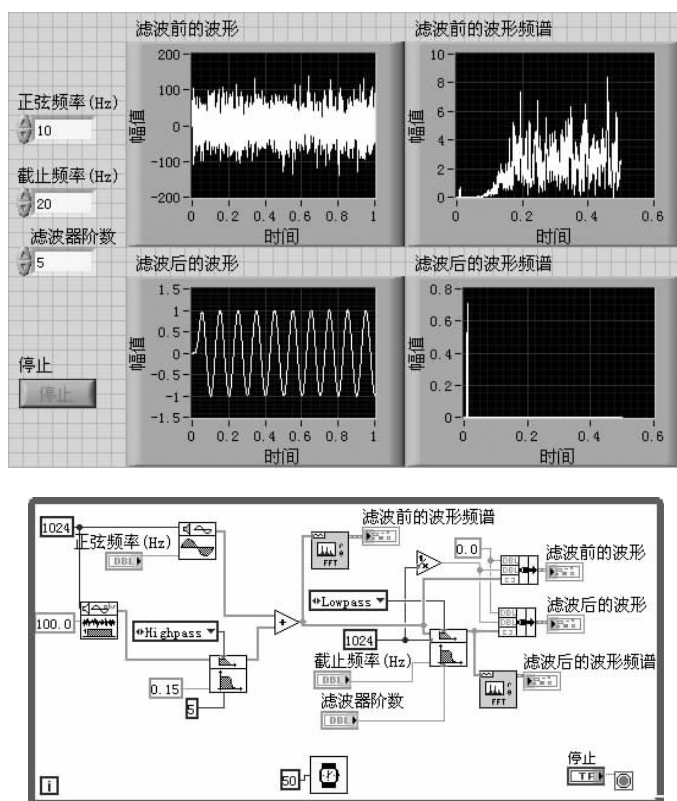


图 5-31 使用 Butterworth 滤波器提取正弦波形并对其进行频谱分析显示

运行该程序后，可以增大 Butterworth 低通滤波器的截止频率，当接近 50Hz 时，滤波后的正弦信号产生抖动，表示混入了均匀白噪声信号，这是因为 Butterworth 数字滤波器并不能达到理想滤波器的要求，它存在一个过渡带，在阻带内的幅度特性也不是零。

5.5 Chebyshev (切比雪夫) 滤波器

Chebyshev 滤波器也是一种常见的滤波器，与 Butterworth 滤波器类似，也可以设置为高通、低通、带通和带阻四种类型，并且可以为每一种类型设置其截止频率。Chebyshev 滤波器 VI 的图标和端口如图 5-32 所示。

比较图 5-32 与图 5-29 可以发现，Chebyshev 滤波器 VI 比 Butterworth 滤波器 VI 多了一个输入端口——波纹 (dB)，其余的端口功能及用法与 Butterworth 滤波器完全相同。

各主要接线端口解释如下。

- “滤波器类型”指定滤波器的通带。0:



图 5-32 Chebyshev 滤波器 VI 的图标和端口

Lowpass; 1: Highpass; 2: Bandpass; 3: Bandstop。

- “X” 是滤波器的输入信号。
- “采样频率: fs” 是 “X” 的采样频率并且必须大于 0。默认值为 1.0Hz。如 “采样频率: fs” 小于等于 0, VI 可设置 “滤波后的 X” 为空数组并返回错误。
- “高截止频率: fh” 是高截止频率, 以 Hz 为单位, 默认值为 0.45Hz。如 “滤波器类型” 为 0 (Lowpass) 或 1 (Highpass), VI 忽略该参数。“滤波器类型” 为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “高截止频率: fh” 必须大于 “低截止频率: fl” 并且满足 Nyquist 准则。
- “低截止频率: fl” 是低截止频率 (Hz) 并且必须满足 Nyquist 准则, 默认值为 0.125Hz。如 “低截止频率: fl” 小于 0 或大于 “采样频率” 的一半, VI 可设置 “滤波后的 X” 为空数组并返回错误。“滤波器类型” 为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “低截止频率: fl” 必须小于 “高截止频率: fh”。
- “波纹 (dB)” 是通带的波纹。“波纹” 必须大于 0, 以 dB 为单位, 默认值为 0.1。如 “波纹” 小于等于 0, VI 可设置 “滤波后的 X” 为空数组并返回错误。
- “阶数” 指定滤波器的阶数并且必须大于 0, 默认值为 2。如 “阶数” 小于等于 0, VI 可设置 “滤波后的 X” 为空数组并返回错误。
- “初始化/连续 (初始化: F)” 控制内部状态的初始化。默认值为 FALSE。
- “滤波后的 X” 该数组包含滤波后的采样。

【例 5.5.1】 使用 Chebyshev 滤波器 VI 对混有均匀白噪声的三角波信号进行低通滤波处理, 同时对滤波前后信号进行频谱分析并显示。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-33 所示。由图可以看出混有均匀白噪声的三角波信号经 Chebyshev 滤波器滤波后, 噪声得到了很大程度的抑制。

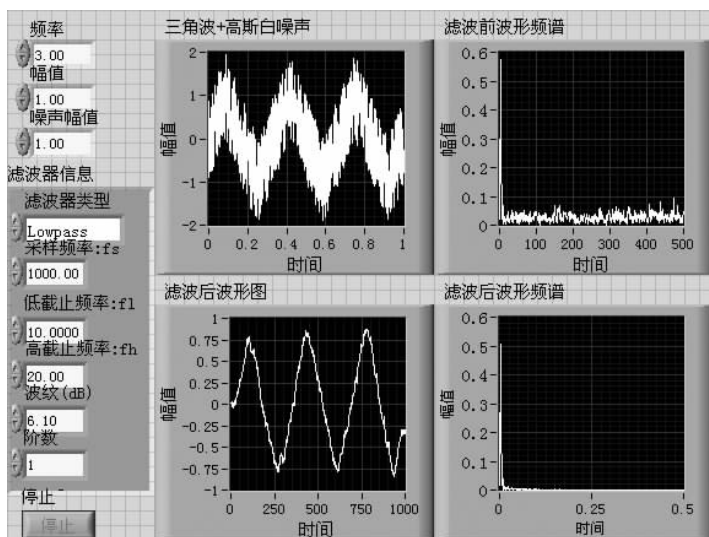


图 5-33 Chebyshev 滤波器 VI 对混有均匀白噪声的三角波信号进行滤波

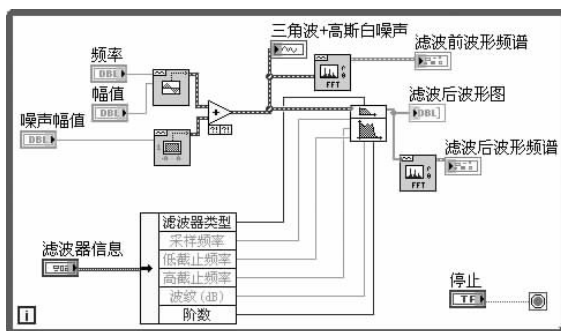


图 5-33 Chebyshev 滤波器 VI 对混有均匀白噪声的三角波信号进行滤波 (续)

5.6 反 Chebyshev (切比雪夫) 滤波器

反 Chebyshev 滤波器也是一种常见的滤波器, 也称为 Chebyshev II 型滤波器, 可以设置为高通、低通、带通和带阻四种类型, 并且可以为每一种类型设置截止频率。反 Chebyshev 滤波器 VI 的图标和端口如图 5-34 所示。

比较图 5-34 与图 5-32 可以发现, Chebyshev 滤波器 VI 的一个输入端口——波纹 (dB) 被替换为了衰减 (dB), 其余的端口功能及用法与 Chebyshev 滤波器完全相同。



图 5-34 反 Chebyshev 滤波器 VI 的图标和端口

各主要接线端口解释如下。

- “滤波器类型”指定滤波器的通带。0: Lowpass; 1: Highpass; 2: Bandpass; 3: Bandstop。
- “X”是滤波器的输入信号。
- “采样频率: f_s ”是“X”的采样频率并且必须大于 0, 默认值为 1.0 Hz。如“采样频率: f_s ”小于等于 0, VI 可设置“滤波后的 X”为空数组并返回错误。
- “高截止频率: f_h ”是高截止频率, 以 Hz 为单位, 默认值为 0.45 Hz。如“滤波器类型”为 0 (Lowpass) 或 1 (Highpass), VI 忽略该参数。“滤波器类型”为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “高截止频率: f_h ”必须大于“低截止频率: f_l ”并且满足 Nyquist 准则。
- “低截止频率: f_l ”是低截止频率 (Hz) 并且必须满足 Nyquist 准则。默认值为 0.125 Hz。如“低截止频率: f_l ”小于 0 或大于“采样频率”的一半, VI 可设置“滤波后的 X”为空数组并返回错误。“滤波器类型”为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “低截止频率: f_l ”必须小于“高截止频率: f_h ”。
- “衰减 (dB)”是阻带的衰减。“衰减”必须大于 0, 以 dB 为单位。默认值为 60.0。如“衰减”小于等于 0, VI 可设置输出为 0 并返回错误。
- “阶数”指定滤波器的阶数并且必须大于 0, 默认值为 2。如“阶数”小于等于 0, VI 可设置“滤波后的 X”为空数组并返回错误。
- “初始化/连续 (初始化: F)”控制内部状态的初始化, 默认值为 FALSE。

- “滤波后的 X” 数组中包含滤波后的采样。

【例 5.6.1】 使用反 Chebyshev 滤波器 VI 对混有高斯白噪声的正弦波信号进行低通滤波处理，同时对滤波前后的信号进行频谱分析并显示。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-35 所示。由图可以看出混有高斯白噪声的正弦波信号经反 Chebyshev 滤波器滤波后，噪声得到了很大程度的抑制。

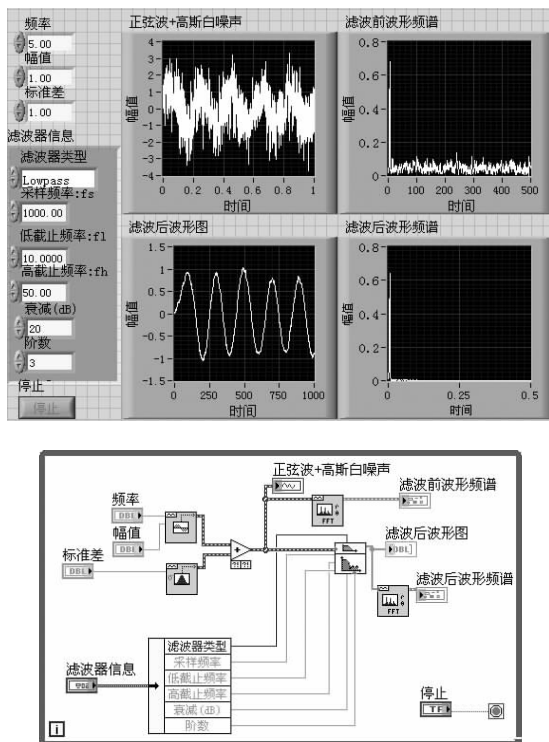


图 5-35 使用反 Chebyshev 滤波器 VI 对混有高斯白噪声的正弦波信号进行滤波

5.7 椭圆滤波器

与相同阶数的 Butterworth 和 Chebyshev 滤波器相比，椭圆滤波器在通带和阻带之间的过渡带最为陡峭，因此椭圆滤波器有很广泛的应用。椭圆滤波器的设置与前面所讲述滤波器类似，椭圆滤波器 VI 的图标和端口如图 5-36 所示。

各主要接线端口解释如下。

- “滤波器类型”指定滤波器的通带。0: Lowpass; 1: Highpass; 2: Bandpass; 3: Bandstop。
- “通带波纹 (dB)”是通带的波纹。“通带波纹”必须大于 0，以 dB 为单位，默认值为 1.0dB。如“通带波纹”小于等于 0，VI 将把输出滤波器数据设置为空数组并返回

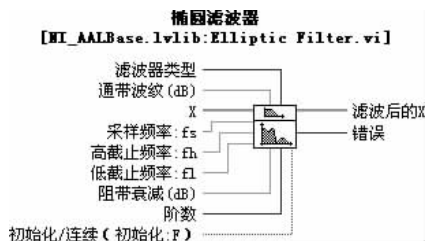


图 5-36 椭圆滤波器 VI 的图标和端口

错误。

- “X” 是滤波器的输入信号。
- “采样频率: f_s ” 是 “X” 的采样频率并且必须大于 0, 默认值为 1.0Hz。如 “采样频率: f_s ” 小于等于 0, VI 可设置 “滤波后的 X” 为空数组并返回错误。
- “高截止频率: f_h ” 是高截止频率, 以 Hz 为单位, 默认值为 0.45Hz。如 “滤波器类型” 为 0 (Lowpass) 或 1 (Highpass), VI 忽略该参数。 “滤波器类型” 为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “高截止频率: f_h ” 必须大于 “低截止频率: f_l ” 并且满足 Nyquist 准则。
- “低截止频率: f_l ” 是低截止频率 (Hz) 并且必须满足 Nyquist 准则, 默认值为 0.125Hz。如 “低截止频率: f_l ” 小于 0 或大于 “采样频率” 的一半, VI 可设置 “滤波后的 X” 为空数组并返回错误。 “滤波器类型” 为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “低截止频率: f_l ” 必须小于 “高截止频率: f_h ”。
- “阻带衰减 (dB)” 是阻带的衰减。 “阻带衰减” 必须大于 0, 以 dB 为单位。默认值为 60.0dB。如 “阻带衰减” 小于等于 0, VI 可设置 “滤波后的 X” 为空数组并返回错误。但是如过滤波器阶数较高, 该 VI 可使用大于滤波器 “阻带衰减” 的衰减值。
- “阶数” 指定滤波器的阶数并且必须大于 0。默认值为 2。如 “阶数” 小于等于 0, VI 可设置 “滤波后的 X” 为空数组并返回错误。
- “初始化/连续 (初始化: F)” 控制内部状态的初始化, 默认值为 FALSE。
- “滤波后的 X” 该数组包含滤波后的采样。

【例 5.7.1】 使用椭圆滤波器 VI 对混有高斯白噪声的正弦波信号进行低通滤波处理, 同时对滤波前后的信号进行频谱分析并显示。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-37 所示。由图可以看出混有高斯白噪声的正弦波信号经椭圆滤波器滤波后, 噪声得到了很大程度的抑制。

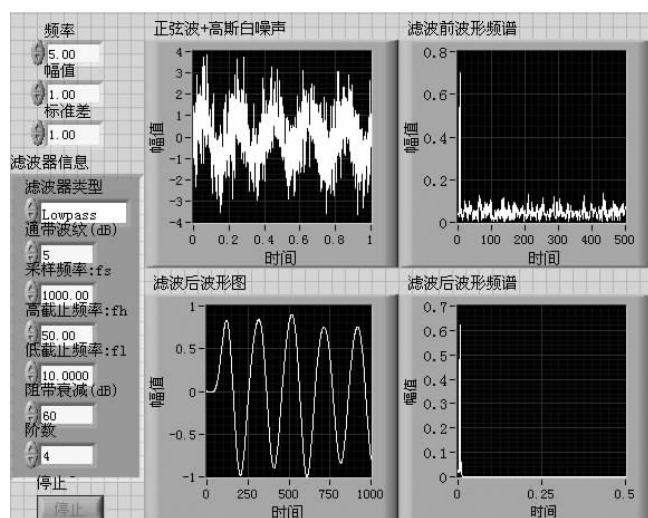


图 5-37 使用椭圆滤波器 VI 对混有高斯白噪声的正弦波信号进行滤波

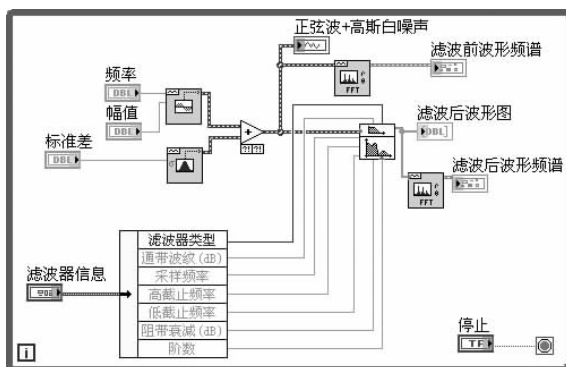


图 5-37 使用椭圆滤波器 VI 对混有高斯白噪声的正弦波信号进行滤波 (续)

5.8 贝塞尔滤波器

前面已对贝塞尔滤波器的理论知识已经作了详细的阐述, 贝塞尔滤波器就是用贝塞尔多项式作逼近函数的滤波器, 用户可以使用贝塞尔滤波器来减小 IIR 滤波器固有的非线性相位畸变。IIR 滤波器的阶数越高, 过渡带越陡峭, 非线性相位畸变就越明显。贝塞尔滤波器必须通过提高阶数来减小峰值误差, 因此它的应用范围是有限的。在实际应用中, 可以通过设计 FIR 滤波器来实现线性的相位响应。贝塞尔滤波器 VI 的图标和端口如图 5-38 所示。



图 5-38 贝塞尔滤波器 VI 的图标和端口

各主要接线端口解释如下。

- “滤波器类型”指定滤波器的通带。0: Lowpass; 1: Highpass; 2: Bandpass; 3: Bandstop。
- “X”是滤波器的输入信号。
- “采样频率: fs”是“X”的采样频率并且必须大于 0, 默认值为 1.0Hz。如“采样频率: fs”小于等于 0, VI 可设置“滤波后的 X”为空数组并返回错误。
- “高截止频率: fh”是高截止频率, 以 Hz 为单位, 默认值为 0.45Hz。如“滤波器类型”为 0 (Lowpass) 或 1 (Highpass), VI 忽略该参数。“滤波器类型”为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “高截止频率: fh”必须大于“低截止频率: fl”并且满足 Nyquist 准则。
- “低截止频率: fl”是低截止频率, 以 Hz 为单位并且必须满足 Nyquist 准则, 默认值为 0.125Hz。如“低截止频率: fl”小于 0 或大于“采样频率”的一半, VI 可设置“滤波后的 X”为空数组并返回错误。“滤波器类型”为 2 (Bandpass) 或 3 (Bandstop) 时, “低截止频率: fl”必须小于“高截止频率: fh”。
- “阶数”指定滤波器的阶数并且必须大于 0, 默认值为 2。如“阶数”小于等于 0, VI 可设置“滤波后的 X”为空数组并返回错误。
- “初始化/连续 (初始化: F)”控制内部状态的初始化, 默认值为 FALSE。

- “滤波后的 X” 该数组包含滤波后的采样。

【例 5.8.1】 使用贝塞尔滤波器 VI 对混有高斯白噪声的正弦波信号进行低通滤波处理，同时对滤波前后的信号进行频谱分析并显示。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-39 所示。由图可以看出混有高斯白噪声的正弦波信号经椭圆滤波器滤波后，噪声得到了很大程度的抑制。

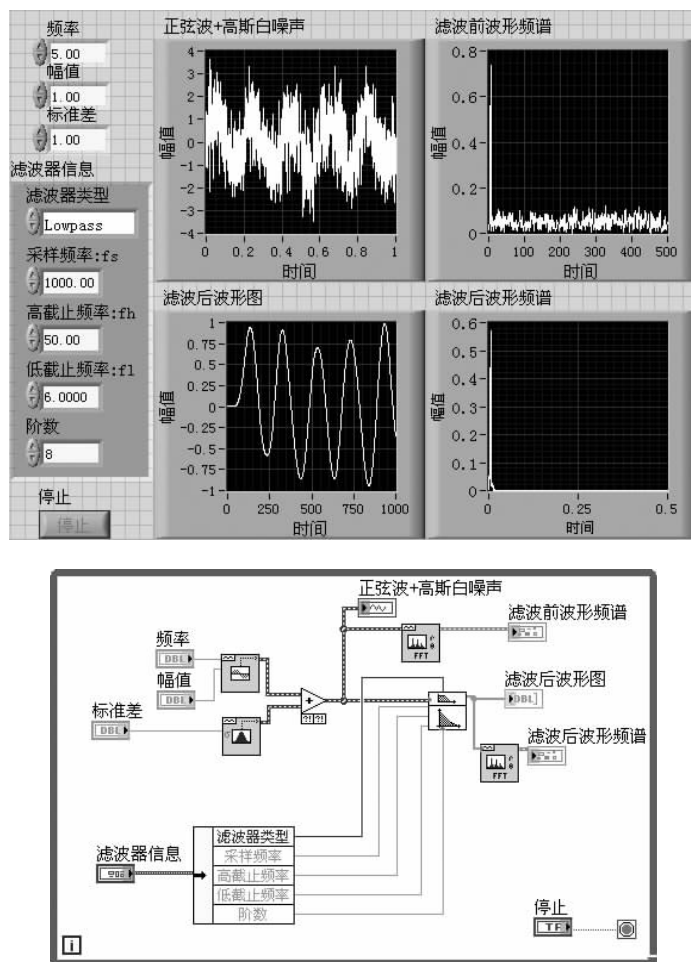


图 5-39 使用贝塞尔滤波器 VI 对混有高斯白噪声的正弦波信号进行滤波

从第 5.4 节到 5.8 节分别详细讲述了设计 IIR 滤波器时常用的几种滤波器。采用“最佳逼近特性”法，相应的有 Butterworth 滤波器、Chebyshev 滤波器、椭圆滤波器、贝塞尔滤波器等类型。各个滤波器具有不同的频率特性，用户在逼近所需的同一个滤波器特性时，要注意根据具体要求选择适当的逼近类型。

【例 5.8.2】 采用条件结构并使用前面几节所讲述的几种常用滤波器分别对一冲激函数信号进行滤波，并对其进行幅度响应和相位响应特性曲线分析显示。实现该例程的前面板如图 5-40 所示。程序框图在本章习题 5-7 中，请读者自行设计完成。

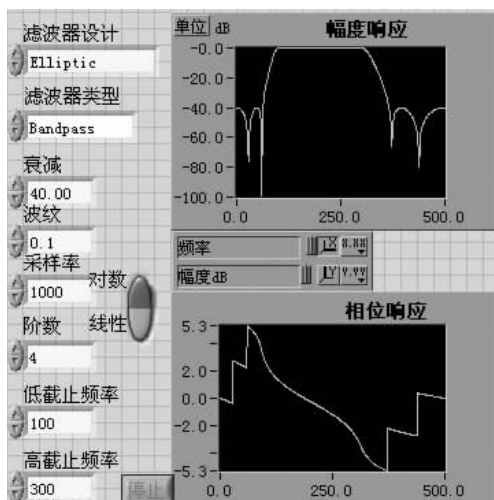


图 5-40 IIR 滤波器设计前面板

5.9 中值滤波器

前面讲述了用不同的滤波器对混有噪声的信号进行滤波处理,可以看出滤波效果较为明显,体现了 LabVIEW 中滤波器 VI 在信号滤波处理中的方便性和灵活性。本节内容将讲述另外一种常见的、应用范围非常广泛的滤波器——中值滤波器。

中值滤波是从数据中取中间值的一种方法。系统在运行中先对某一测量过程连续进行 N 次采样 (N 通常为奇数),然后把采样值从小到大依次排列,取出最中间的这一个值作为本次的采样值。这种滤波方法能有效地抑制仪表元件不稳定引起的误码脉冲干扰和偶然因素引起的波动干扰。对温度和液位等缓慢的测量具有良好的滤波效果,但对快点的压力和流量等测量,一般不采用此种方法,因为运算量大,占用系统资源较多,速度较慢。

中值滤波在图像处理中也经常会得到应用。图像在采集过程中往往受到各种噪声源的干扰,这些噪声在图像上往往表现为一些孤立的像素点即毛刺,这可理解为毛刺的像素灰度与它们的相邻像素有显著不同。同样在图像处理过程中,在进行如边缘检测这样的进一步处理之前,通常需要首先进行一定程度的降噪。

中值滤波是一种非线性数字滤波器技术,它既可做到噪声抑制、滤除脉冲干扰及图像扫描噪声,又可以克服线性滤波器带来的图像细节模糊,保持图像边缘信息,其主要功能就是使那些与邻近像素显著不同的像素具有与其邻近像素更加相似的强度,达到消除图像的孤立毛刺的目的,因此,中值滤波经常用于去除图像或者其他信号中的噪声。

中值滤波是图像处理中的一个常用步骤,它对于斑点噪声 (Speckle noise) 和椒盐噪声 (Salt-and-pepper noise) 来说尤其有用。保存边缘的特性使它在不希望出现边缘模糊的场合也很有用。在 LabVIEW 2017 提供的工具包——IMAQ Vision 中,中值滤波可以直接调用功能函数“IMAQ Nth Order”来实现,关于这部分知识将在第 6 章的相关内容中详细阐述。

中值滤波器 VI 的图标和端口如图 5-41 所示。

各主要接线端口解释如下。

- “X” 是滤波器的输入信号。“X” 中的元素数量 n 必须大于 “右秩”。如 “X” 中的元素数量小于等于 “右秩”，VI 可设置 “滤波后的 X” 为空数组并返回错误。
- “左秩” 用于计算左侧中值滤波器的元素数。“左秩” 必须大于等于 0，默认值为 2。
- “右秩” 用于计算右侧中值滤波器的元素数。如 “右秩” 小于 0，该 VI 将假定 “右秩” 等于 “左秩”。“右秩” 必须小于 “X” 中的元素数量，默认值为 -1。
- “滤波后的 X” 数组中包含滤波后的采样。该数组的大小等于输入数组 “X”。

中值滤波器的设计思想就是检查输入信号中的采样并判断它是否代表了信号，使用奇数个采样组成的观察窗实现这项功能。观察窗口中的数值进行排序，位于观察窗中间的中值作为输出。然后丢弃最早的值，取得新的采样，重复上面的计算过程。

“中值滤波器 VI” 使用式 (5-10) 获取滤波后的 X 的元素。

$$y_i = \text{Median}(J_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \tag{5-10}$$

y_i 代表输出序列 “滤波后的 X”， n 是输入序列 “X” 中元素的数量， J_i 是以输入序列 “X” 中以第 i 个元素为中心的子集，以及 “X” 范围外等于 0 的索引元素。等式 (5-11) 定义了 J_i 。

$$J_i = \{X_{i-rl}, X_{i-rl+1}, \dots, X_{i-1}, X_i, X_{i+1}, \dots, X_{i+rr-1}, X_{i+rr}\} \tag{5-11}$$

式 (5-11) 中， rl 是滤波器的 “左秩”， rr 是滤波器的 “右秩”。

y_i 的计算如图 5-42 所示。



图 5-41 中值滤波器 VI 的图标和端口

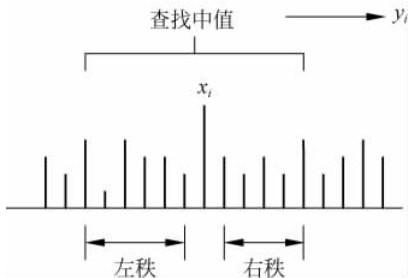


图 5-42 查找中值 y_i

【例 5.9.1】 使用中值滤波器 VI 对混有 Gaussian 白噪声的脉冲信号进行滤波处理，同时对滤波前后的信号进行频谱分析并显示，并对滤波后的脉冲信号进行脉冲参数的测量，测得的数据可以与事先设置的数据进行比较，可以看出其中的误差。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-43 所示。

如果没有更多的信息，在使用该 VI 完成中值滤波的模式分析以确定基准和最高的输入脉冲信号序列后，找出噪声和信号之间的微小区别将变得比较困难。因此，为了准确地确定脉冲信号的参数，输入信号序列的噪声部分的峰值振幅必须小于或等于预先设定的脉冲信号振幅的 50%。但在许多实际应用中，一个 50% 的脉冲噪声系数是难以实现的。

中值滤波器比低通滤波器能更有效地提取脉冲信号，因为中值滤波器能够在滤除高频噪声的同时更好地保留信号的边缘信息。由图 5-43 可以看出混有 Gaussian 白噪声的脉冲信号经中值滤波器滤波后，噪声得到了很大程度的抑制。在本例程中注意 “左秩” 和 “右秩” 的设置。

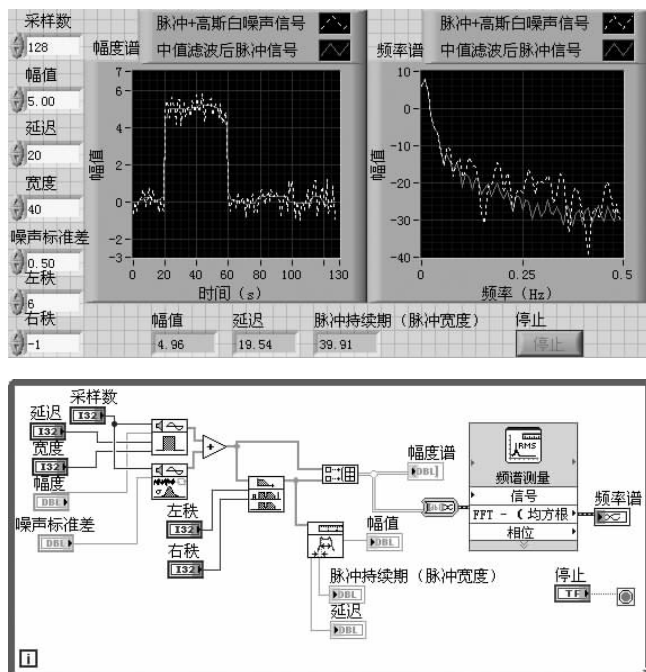


图 5-43 使用中值滤波器 VI 对混有高斯白噪声的脉冲信号进行滤波

5.10 自适应滤波器

5.10.1 自适应滤波器概述

自适应滤波器理论是 20 世纪 50 年代末开始发展起来的,是现代数字信号处理技术的重要组成部分,对复杂信号的处理具有独特的优势。随着计算机技术的迅速发展,自适应滤波器的新算法、新理论和新的实现方法不断涌现。一方面,在算法上对自适应滤波器的稳定性、收敛性、收敛速度和跟踪特性等方面都进行了深入的研究;另一方面,微电子技术的发展为算法的实现提供了硬件基础。正是由于这两方面的原因,自适应滤波器在通讯、遥感与遥测、自动控制、雷达与电子干扰、模式识别、声道均衡、噪声对消、回波抵消、语音信号处理、生物医学等方面获得了广泛的应用。

自适应滤波器实际上是一种能够自动调整本身参数的特殊维纳滤波器,在设计时不需要预先知道关于输入信号和噪声的统计特性,它能够在工作过程中逐步“了解”或估计出所需要的统计特性,并以此为依据自动调整自身的参数,以达到最佳滤波效果。

自适应滤波器与普通滤波器的最重要的两个区别:(1) 自适应滤波器的滤波参数是可变的,它能够随着外界信号特性的变化动态地改变参数,保持最佳滤波状态。它除了普通滤波器的硬件设备外还有软件部分,即自适应算法。(2) 自适应算法决定了自适应滤波器如何根据外界信号的变化来调整参数。自适应算法的好坏直接影响滤波的效果。

应用自适应滤波器主要包括两种情形:(1) 输入信号的特性是不变的,但是未知的。对于这种情形,最佳滤波参数是固定的,这时候要求自适应滤波器的参数尽快收敛到最佳

滤波参数,一般情况下把参数的收敛过程称为“学习”过程。(2)输入信号的特性是“缓慢”变化的。这里的“缓慢”是对信号幅度而言。这时最佳滤波器的参数也是“缓慢”变化的,这就要求自适应滤波器的参数能尽快“反应”过来,跟随信号的变化。这个过程一般称为“跟踪”过程。

自适应滤波器的核心就是自适应算法。目前,自适应滤波器的实现大多采用MATLAB、Simulink、DSP、FPGA等,虽然能够有效地实现滤波功能,但是其缺点是编程比较复杂,缺少良好的人机接口界面,难以形成应用系统来测试滤波器在工程中的实际性能。

若采用MATLAB与LabVIEW相结合设计自适应滤波器,需要通过LabVIEW中的脚本调用复杂的MATLAB程序,在滤波器要求精度高时,程序复杂度就会增大,不利于用户快速开发自适应滤波器。

针对目前自适应滤波器设计中的不足,本节将利用LabVIEW 2017中的自适应滤波器工具包,实现具有工程应用价值的LMS(最小均方误差)算法、RLS(递推最小二乘)算法的两种自适应滤波器。

5.10.2 自适应滤波器结构原理及算法

自适应数字滤波器的原理框图如图5-44所示,主要由参数可调的数字滤波器(也称为自适应处理器)和自适应滤波算法两部分组成。其中,参数可调数字滤波器可以是FIR数字滤波器或IIR数字滤波器,也可以是格形数字滤波器。自适应滤波器分为线性自适应滤波器和非线性自适应滤波器两种,其中,非线性自适应滤波器在信号处理方面具有更强的能力,但计算复杂,在实际工程应用中受到较大的限制。因此线性自适应滤波器在实际应用中较为常见。线性自适应滤波器具有结构简单、算法容易等优点。

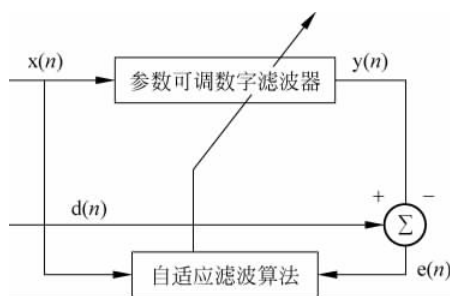


图 5-44 自适应滤波器结构

图5-44中, $x(n)$ 表示 n 时刻的输入,通过参数可调的数字滤波器后,产生表示 n 时刻的输出信号 $y(n)$, $y(n)$ 与参考信号 $d(n)$ 进行比较产生误差信号 $e(n)$ 。自适应数字滤波器的单位脉冲响应受误差信号 $e(n)$ 控制,根据 $e(n)$ 的值而自动调节,使之适合下一时刻 $(n+1)$ 的输入 $x(n+1)$,以便使输出 $y(n+1)$ 更接近于所期望的响应 $d(n+1)$,直至均方误差 $e(n)$ 达到最小值, $y(n)$ 最佳地逼近 $d(n)$,系统完全适应了所加入的两个外来信号,即外界环境。 $x(n)$ 和 $d(n)$ 两个输入信号可以是确定的,也可以是随机的,可以是平稳的随机过程,也可以是非平稳的随机过程。

自适应滤波器与普通滤波器不同的是它的冲激响应或滤波参数是随外来信号的变化而变化的,收敛需要经过一段时间的自动调节后达到最佳滤波的效果。自适应滤波器自身有一个算法,可以根据输入、输出及原参数值,按照一定规则修改滤波参数,从而使它本身能有效地跟踪外来信号的变化。因此自适应滤波理论研究的一个重要方面即自适应算法。

LMS 算法和 RLS 算法是自适应滤波算法中最基本的两种算法, 在有关书籍中对这两种算法都有详细的介绍, 本节只给出简要说明, 对于具体的内容, 用户可以参阅相关书籍进行学习。

最早的自适应滤波算法是 LMS 算法。它是横向滤波器的一种简单而有效的算法。实际上, LMS 算法是一种随机梯度估值算法, 它在相对于抽头权值的误差信号平方幅度的梯度方向上迭代调整每个抽头权值。自 Widrow 等人 1976 年提出 LMS 自适应滤波算法以来, 经过几十年的迅速发展, 已经使这一理论成果成功地应用到通信、系统辨识、信号处理和自适应控制等领域, 为自适应滤波开辟了新的发展方向。

LMS 是基于最小均方误差 (MMSE) 算法和最陡下降 (SD) 法提出的, 它以均方误差最小为判据。设 $d(n)$ 为滤波器输出想要逼近的信号, $y(n)$ 为滤波器输出信号, 则误差为 $e(n) = d(n) - y(n)$, 最小均方误差准则是使在滤波器的输出信号与期望输出信号之间的均方误差 $E\{e^2(n)\}$ 达到最小。通过调整自适应滤波的权系数向量 $\mathbf{w}(n)$, 使均方误差达到最小。根据输入数据的长期统计特性寻求最佳滤波, 它是对一类数据的最佳滤波器。在已提出的自适应算法中, LMS 算法因其具有方法简单、计算量小、易于实现且对信号的统计特性具有稳健性等优点, 在信号处理领域得到了广泛应用。其不足之处是收敛速度较慢, 执行稳定性差, 而且与输入信号的统计特性有关。

LMS 算法由于采用了一种特殊的梯度估值方法, 避免了一般梯度估值带来的弊端。它对自适应线性滤波器是有效的, 也可以推广至自适应递归滤波器。假设噪声信号 $s(n)$ 为 0, 则期待信号:

$$d(n) = \mathbf{h}^T(n)x(n) \quad (5-12)$$

估计信号:

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n)x(n) \quad (5-13)$$

其中, 自适应滤波器的输入向量 $x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]$; 未知系统冲击响应向量 $\mathbf{h}(n) = [h_0(n), h_1(n), \dots, h_{L-1}(n)]^T$; 自适应滤波器的系数向量 $\mathbf{w}(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{L-1}(n)]^T$; 期望信号 $d(n) = d'(n) + s(n)$; 在噪声信号 $s(n)$ 为 0 的情况下, $d'(n) = d(n)$; 误差信号 $e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \mathbf{w}^T(n)x(n)$ 。

定义目标函数:

$$J(n) = E[e^2(n)] = E[(d(n) - \mathbf{w}^T(n)x(n))^2] \quad (5-14)$$

对 $\mathbf{w}(n)$ 求导, 并令导数为 0, 即可得到最佳滤波器权矢量 $\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p}$ 。其中, $\mathbf{p} = E[d(n)x(n)]$ 是期望信号 $d(n)$ 与输入矢量 $x(n)$ 的互相关矢量; $\mathbf{R} = E[x(n)x^T(n)]$ 是输入信号矢量 $x(n)$ 的自相关矩阵。

上式求解过程包括运算量很大的矩阵求逆运算, 为方便实现, 通常在目标函数的定义中用误差平方代替均方误差, 可以证明误差平方是均方误差的无偏估计, 即定义目标函数:

$$\hat{J} = e^2(n) \quad (5-15)$$

对目标函数求导可得到:

$$\nabla \hat{J}(n) = \frac{\partial [e^2(n)]}{\partial [\mathbf{w}(n)]} = -2\mathbf{x}(n)e(n) \quad (5-16)$$

由最速下降法可得：

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu[-\nabla \hat{J}(n)] = \mathbf{w}(n) + 2\mu x(n)e(n) \quad (5-17)$$

这就是 LMS 算法的迭代公式，式中， $n=1, 2, 3, \dots$ 为时间序列； $x(n)$ 为 n 时刻的输入信号； $e(n)$ 为 n 时刻的输出误差信号，也是系统的输出信号； $\mathbf{w}(n)$ 为自适应滤波器在 n 时刻的权系数矢量； μ 为步长因子。保持系统稳定的 μ 的理论取值范围为 $0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}}$ ， $\lambda_{\max}$ 是自相关矩阵 $\mathbf{R}$ 的最大特征值。

LMS 算法中，固定步长因子 μ 对算法的性能有决定性的影响，它是用来描述根据误差调整数字滤波器的系数的因子，也就是每次的调整量，即步长 μ 的大小决定算法的收敛速度和达到稳态的失调量的大小，对于常数 μ 来说，算法的失调与自适应收敛过程矛盾，要想得到较快的收敛速度可选用大的 μ 值，这将导致较大的失调量；如果要满足失调量的要求，则收敛过程将受到制约。当 μ 较小时，算法收敛速度慢，并且为得到满意的结果需要很多的采样数据，但稳态失调误差较小；当 μ 较大时，该算法收敛速度快，但稳态失调误差变大，并有可能使算法发散。收敛速度与稳态失调误差是不可兼得的两个指标。以往的很多研究对 LMS 算法的性能和改进算法已经做了相当多的工作，但至今仍然是一个重要的研究课题。

由于变步长 LMS 算法能够根据输入信号自适应地调整步长 μ ，从而解决了收敛速度和稳态误差之间的矛盾。同时，通过选择合理的步长调整函数，运算量的提升变得可以接受，并且算法结构比较容易实现，变步长的自适应滤波器是又一个分支。

另一类重要的自适应算法是 LS（最小二乘）算法，LS 算法早在 1795 年就由高斯提出来了，但 LS 算法存在运算量大等缺点，因而在自适应滤波中一般采用其递推形式——RLS 算法，这是一种通过递推方式寻求最佳解的算法，复杂度比 LS 算法小，因而获得了广泛应用。1994 年 Sayed 和 Kailath 建立了 Kalman 滤波和 RLS 算法之间的对应关系，证明了 RLS 算法事实上是 Kalman 滤波器的一种特例，从而使人们对 RLS 算法有了进一步的理解，而且 Kalman 滤波的大量研究成果可应用于自适应滤波处理。这对自适应滤波技术起到了重要的推动作用。

RLS 算法是最小二乘法的一类最常用的快速算法，其算法描述为：

$$\text{初始化：} \quad P(0) = \delta^{-1}I, \mathbf{w}(0) = 0 \quad (5-18)$$

对每个采样点 $n = 1, 2, \dots$ 进行迭代运算：

$$\begin{aligned} k(n) &= \frac{\lambda^{-1}P(n-1)x(n)}{1 + \lambda^{-1}x^T(n)P(n-1)x(n)} \\ e(n) &= d(n) - x^T(n)\mathbf{w}(n-1) \\ \mathbf{w}(n) &= \mathbf{w}(n-1) + k(n)e(n) \\ P(n) &= \lambda^{-1}P(n-1) - \lambda^{-1}k(n)x^T(n)P(n-1) \end{aligned} \quad (5-19)$$

在初始化过程中， δ 取小的正整数，目的是为了保证矩阵非奇异，防止求逆矩阵时溢出。

算法 RLS 是一种在自适应迭代的每一步都要求最优的迭代算法，它以最小二乘准则

为依据, 最小二乘准则就是要使一定范围内误差的平方和达到最小, 即 $\sum_{i=k}^{k+m-1} e^2(n)$ 达到最小, 即最小二乘算法的基本思想是通过调节滤波器的系数使误差信号的加权平方和最小。由于采用在每时刻对所有已输入信号重估的平方误差和最小准则, 故其克服了 LMS 算法收敛速度慢和信号非平稳适应性差等缺点。虽然在初始收敛速度方面, RLS 算法比 LMS 算法快一个数量级, 执行时稳定性也好, 但是算法运算量大而复杂, 所需的数据存储量也大, 实时性效果较差, 但采用计算机来存储处理大规模数据可以给算法运算带来极大便利。

5.10.3 基于 LabVIEW 的自适应滤波器的设计实现

LabVIEW 2017 中的自适应滤波器工具包提供了丰富的自适应滤波器设计所需要的函数节点 VI, 下载工具包安装后, 其位置位于程序框图窗口中的“函数”选板→“信号处理”→“Adaptive Filters”子函数选板中, 如图 5-45 所示。

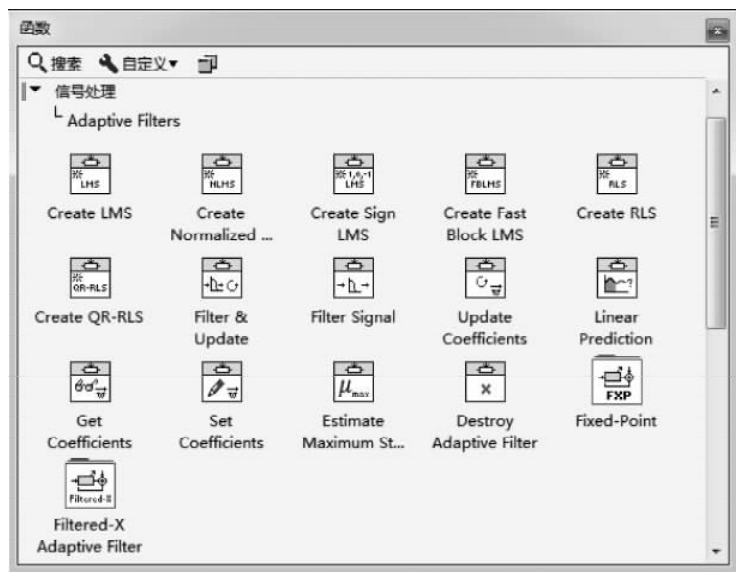


图 5-45 “Adaptive Filters”子函数选板

LabVIEW 2017 提供的自适应滤波器工具包, 利用其中已经设计好的各种算法函数 VI 可以很方便地设计出具有实际工程价值的自适应滤波器系统。这种基于图形化编程的方法不需要复杂的编程计算, 可以更加方便灵活地让用户快速开发自适应滤波器。用户在设计实现自适应滤波器时, 主要用到 LabVIEW 2017 提供的自适应滤波器工具包中的以下函数节点 VI: LMS 算法 (AFT Create FIR LMS. vi)、归一化 LMS 算法 (AFT Create FIR Normalized LMS. vi)、漏溢 LMS 算法 (AFT Create FIR Leaky LMS. vi)、快速 LMS 算法 (AFT Create FIR Fast Block LMS. vi)、极性 LMS 算法 (AFT Create FIR Sign LMS. vi)、RLS 算法 (AFT Create FIR RLS. vi)、QR-RLS 算法 (AFT Create FIR QR-RLS. vi) 等。这些函数节点 VI 的用法可以参考 LabVIEW 2017 中相关的即时帮助信息。

本节内容将通过实例设计实现基于 LMS 算法、RLS 算法函数节点 VI 的自适应滤波

器。首先详细讲述在实现自适应滤波器设计时常用的 LMS 算法 VI、RLS 算法 VI 和自适应滤波器信号与校正系数函数 VI 的主要接线端口功能使用。

LMS 算法 VI 的图标和端口如图 5-46 所示。

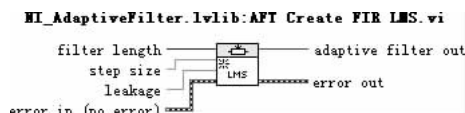


图 5-46 LMS 算法 VI 的图标和端口

各主要接线端口解释如下。

- “filter length” 即滤波器长度，用于指定自适应滤波器的长度。该值必须大于等于 2，默认值是 128。
- “step size” 即步长因子，用于指定自适应滤波器的步长，该值必须大于等于 0。步长的增加能够提高自适应滤波器滤波效果的收敛速度。但是，步长值较大时，该算法收敛速度快，但稳态失调误差变大，并有可能使算法发散。可以使用“AFT Estimate Maximum Step Size for FIR LMS. VI”来估计最大步长值，默认值是 0.01。
- “leakage” 即漏溢，用于指定自适应滤波器的漏溢因子，该有效值的范围是 $[0, 0.1]$ 。如果该值为 0，则 VI 将使用标准 LMS 算法创建自适应滤波器；如果该值非 0，则 VI 将使用漏溢 LMS 算法创建自适应滤波器，默认值为 0。
- “adaptive filter out” 即返回 VI 创建的自适应滤波器。

RLS 算法 VI 的图标和端口如图 5-47 所示。

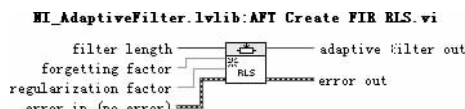


图 5-47 RLS 算法 VI 的图标和端口

各主要接线端口解释如下。

- “filter length” 即滤波器长度，用于指定自适应滤波器的长度。该值必须大于等于 2，默认值是 128。
- “forgetting factor” 即遗忘因子，用于指定自适应滤波器的遗忘因子，该有效值的范围是 $[0, 1]$ 。NI 推荐设定值的范围为 $[0.9, 1]$ ，默认值 0.95。
- “regularization factor” 即调整因子，该值必须大于等于 0，默认值是 $1E-5$ 。
- “adaptive filter out” 即返回 VI 创建的自适应滤波器。

自适应滤波器信号与校正系数函数 VI 的图标和端口如图 5-48 所示。

各主要接线端口解释如下。

- “reset? (F)” 即重置滤波器，强制重置内部滤波器状态为 0，默认值是 FALSE。
- “adaptive filter in” 用于指定输入创建的自适应滤波器。

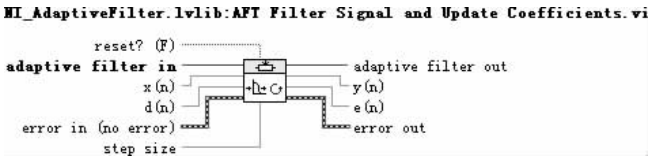


图 5-48 自适应滤波器信号与校正系数函数 VI 的图标和端口

- “ $x(n)$ ” 用于指定输入带噪声信号 $x(n)$ 到自适应滤波器。
- “ $d(n)$ ” 用于指定输入参考信号 $d(n)$ 到自适应滤波器。
- “step size” 即步长因子，用于指定自适应滤波器的步长。若该值小于 0，则 VI 忽略这个参数而使用创建自适应滤波器时的步长；若该值为 0，则 VI 在没有校正自适应滤波器系数下处理信号；若该值大于 0，则 VI 使用该值作为步长去校正自适应滤波器系数。默认值是 -1。注意，该参数仅仅当自适应滤波器使用 LMS 算法时才有效。如果自适应滤波器使用归一化 LMS 算法或归一化漏溢 LMS 算法时，该值必须小于 2。
- “adaptive filter out” 即返回无变化的输入自适应滤波器，即端口 “adaptive filter in”。
- “ $y(n)$ ” 返回自适应滤波器的输出信号。
- “ $e(n)$ ” 返回误差信号，即 $d(n)$ 与 $y(n)$ 之间的差异。

现通过实例设计实现已知条件如下所示的自适应滤波器。仿真输入信号设置为正弦波信号与高斯白噪声叠加而成： $x(n) = A\sin(2\pi f_0 n) + v(n)$ ，其中 A 为正弦波信号幅度， f_0 为频率， $v(n)$ 为均值为零的高斯白噪声， n 为输入信号的长度， σ 为噪声幅值。设初值为 $A = 2.0$ ， $f_0 = 10\text{Hz}$ ， $\sigma = 0.1$ ；参考输入信号为正弦波信号， $x(n) = A\sin(2\pi f_0 n)$ ，设初值为 $A = 2.0$ ， $f_0 = 10\text{Hz}$ ，除了在 RLS 算法中初值多了一项 $x(0) = 0$ 外，其余的均与 LMS 算法相似，即权向量的初值都为 $w(0) = 0$ ，滤波器的长度、迭代步长、遗忘因子可以在前面板上设置调节。

【例 5.10.1】 基于 LMS 算法设计实现以上条件的自适应滤波器。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-49 所示。

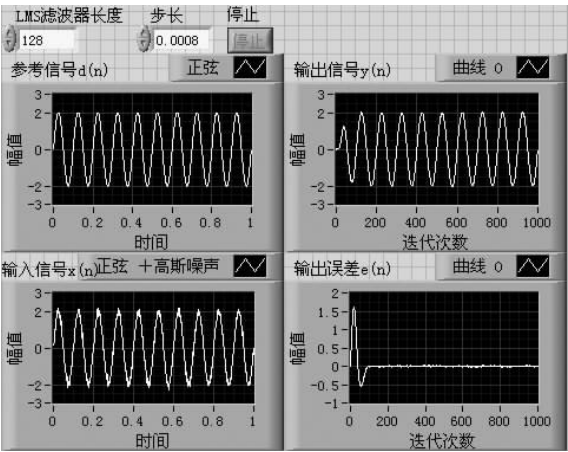


图 5-49 基于 LMS 算法设计实现自适应滤波器

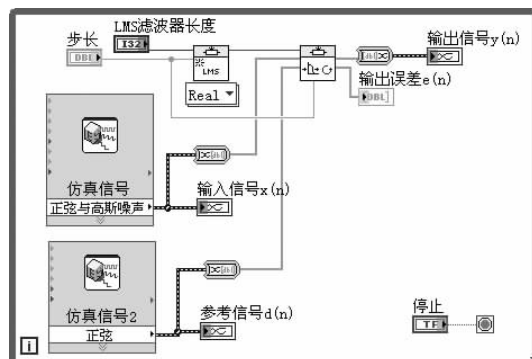


图 5-49 基于 LMS 算法设计实现自适应滤波器 (续)

【例 5.10.2】 基于 RLS 算法设计实现以上条件的自适应滤波器。实现该例程的前面板和程序框图如图 5-50 所示。

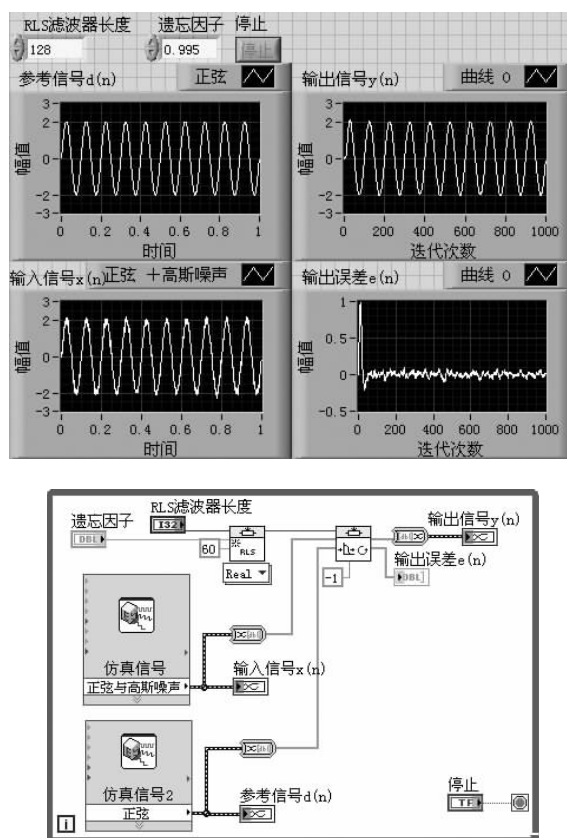


图 5-50 基于 RLS 算法设计实现自适应滤波器

习 题

1. 数字滤波器有哪些优点？实际（非理想）数字滤波器有哪些类型及其各自的特点

是什么?

2. LabVIEW 2017 提供的滤波器 VI 有哪些?

3. 有两路信号,一路是正弦信号叠加均匀白噪声,另一路信号是正弦信号叠加均匀白噪声以及随机信号,对这两路信号混合叠加以模拟传输中的随机干扰信号,使用 Express VI 中的滤波器 VI 对该信号进行低通滤波处理,分别显示原始信号、滤波后的信号及各自的频谱响应曲线。

4. 编写程序框图实现例 5.3.2,使用数字 FIR 滤波器 VI 实现 FIR 加窗滤波器设计。

5. 使用数字 IIR 滤波器 VI 设计实现 IIR 滤波器。

6. 使用 Savitzky-Golay 滤波器 VI 平滑一个噪声信号,该噪声信号为正弦波信号与高斯白噪声所叠加信号。

7. 编写程序框图实现例 5.8.2,采用条件结构并使用前面几节所讲述的几种常用滤波器,分别对一冲激函数信号进行滤波,并对其进行幅度响应和相位响应特性曲线分析显示。

8. 在信号传输过程中,经常会混入高频噪声,噪声的能量甚至会超过信号能量。接收端收到信号后通常首先进行低通滤波,然后对信号作进一步的处理。通过滤波能够有效提高信号的噪声比。原始信号是一个叠加了高频噪声的正弦波,产生高频噪声的方法是将白噪声通过一个 Butterworth 高通滤波器,截止频率为 200Hz,即滤掉频率小于 200Hz 的低频噪声分量,再使用 Butterworth 低通滤波器对原始信号滤波,滤掉高频噪声。截止频率为 50Hz,即滤掉频率大于 50Hz 的噪声分量。编写程序设计实现以上条件的滤波器。

9. 使用中值滤波器 VI 对一个混有高斯白噪声的正弦信号进行滤波处理。

10. 编程计算分别使用 LMS 算法 VI、快速 LMS 算法 VI 和 QR-RLS 算法 VI 设计的自适应滤波器收敛速度的时间。