

基本通信模块的建模与分析

3.1 内容概要

本章结合 Matlab/Simulink 中的函数和模块,对通信系统模型中的重要组成模型和子系统进行了深入讲解。

首先介绍电子系统中最常用的信号处理模块——滤波器的概念,利用 Matlab 函数进行各种滤波器设计,以及滤波器在 Matlab/Simulink 中的实现方法。然后对 Simulink 和通信工具箱、统计工具箱中的常用通信信源模型进行了功能性介绍,并对信号的参数的物理含义以及测量、标定方法进行了论述。特别讨论了随机信号的统计参数测量。本章也以较多的篇幅讲述了如何利用 FFT 对信号做频域分析这一信号处理中的基本问题。然后讨论了通信信道的两种建模形式以及信噪比和误码率的参数标定。对带通信号的等效低通模型做了简要介绍,结合通信工具箱中的模拟调制与解调模块、数字调制与解调模块、锁相环模块以及频率合成技术等基本通信模块的原理、功能和使用方法,以应用实例的方式做了详细讲解。

对于通信系统中的编解码部分,限于篇幅,本书没有涉及。但读者如果学过编码原理方面的理论知识,依据 Matlab/Simulink 的帮助文档和随机安装的例子不难掌握这些模块的应用。

3.2 学习重点和难点

信源、编码、调制和信道模块构成了通信系统的发送信号处理和传输部分。锁相环、定时提取、自适应均衡、解调、解码、误码统计以及接收波形、频谱的显示模块构成了通信接收机的核心内容。通过本章的学习,读者应掌握利用编程或 Simulink(含通信工具箱、通信模块库、信号处理工具箱和模块库)来进行通信系统局部模型的搭建、仿真参数设计等方法,并能够对仿真结果做出合理解释。本章学习的重点知识如下。

- (1) 理解滤波器的概念、分类和参数指标的含义。
- (2) 掌握用 Matlab 函数或 Simulink 设计工具设计给定指标的滤波器。
- (3) 能够用 Matlab 函数或 Simulink 模块实现给定参数的滤波器,对信号进行处理。
- (4) 了解滤波器在信道传输、选频接收、解调滤波、波形成形等方面的应用,并能够初步

依据应用场合,结合理论知识,大体确定滤波器的参数指标。

(5) 了解相同参数滤波器的不同实现方法,模拟滤波器和数值滤波器在仿真应用中的选择问题等。

(6) 了解通信工具箱中常用的信源模型和主要设置参数的物理意义。

(7) 掌握信号统计参数的物理意义和测量方法。能够通过模块和函数对信号统计参数进行测量。

(8) 掌握利用 FFT 进行信号频谱、功率谱分析的原理和方法。学会使用 Matlab 中的 FFT 函数,Simulink 中的诸多频谱分析模块。特别要熟练掌握频谱仪的参数设置,理解不同设置选项对频谱估计结果精度的影响。

(9) 学会利用帕斯瓦尔定理检验时域和频谱分析的等价性,对频谱分析进行定标。

(10) 理解信道信噪比的各种表示方法及其相互关系。仿真步长与仿真带宽,以及仿真信道中白噪声方差、功率谱密度之间的关系。

(11) 理解带通信号、带通模型与其等效低通信号及等效低通模型之间的关系。对复信号应从物理含义上加深了解。

(12) 了解锁相环、频率合成、载波提取以及定时提取的基本原理。

3.3 习题解答

【3-1】 试设计一个模拟低通滤波器, $f_p = 3400\text{Hz}$, $f_s = 6000\text{Hz}$, $R_p = 3\text{dB}$, $R_s = 30\text{dB}$ 。分别用巴特沃斯和椭圆滤波器原型,求出其 3dB 截止频率和滤波器阶数,传递函数,并作出幅频、相频特性曲线。

【解答】

依据题设的设计指标要求和所欲设计的模拟滤波器类型,首先计算出滤波器的阶数和截止频率。然后,由滤波器阶数和截止频率确定出满足要求的传递函数分子分母系数。最后,作出传递函数的频率响应曲线,以验证设计结果是否满足题设指标要求。巴特沃斯滤波器程序代码如下。

【程序代码】

```
% ch3prob1A.m
% 巴特沃斯滤波器设计
clear;
f_p = 3400; f_s = 6000; R_p = 3; R_s = 30; % 设计要求指标
[n, fn] = buttord(f_p, f_s, R_p, R_s, 's'); % 计算阶数和截止频率
Wn = 2 * pi * fn; % 转换为角频率
[b, a] = butter(n, Wn, 's'); % 计算 H(s)
f = 0:100:10 000; % 计算频率点和频率范围
s = 1i * 2 * pi * f; % s = jw = j * 2 * pi * f
H_s = polyval(b, s) ./ polyval(a, s); % 计算相应频率点处 H(s) 的值
figure(1);
subplot(2,1,1); plot(f, 20 * log10(abs(H_s))); % 幅频特性
axis([0 10 000 -40 1]);
xlabel('频率 Hz'); ylabel('幅度 dB');
```

```

subplot(2,1,2); plot(f,angle(H_s));           % 相频特性
xlabel('频率 Hz');ylabel('相角 rad');
n,fn                                           % 显示滤波器阶数和截止频率
b,a

```

执行程序后,得出所设计的巴特沃斯滤波器的阶数为 7 阶,截止频率为 3663.5Hz,滤波器的幅频响应和相频响应如图 3-1 所示。其传递函数分子分母系数分别为:

```

n =
    7
fn =
    3.6635e+003
b =
    Columns 1 through 6
           0           0           0           0           0           0
    Columns 7 through 8
           0    3.4240e+030
a =
    Columns 1 through 6
    1.0000e+000    1.0344e+005    5.3503e+009    1.7797e+014    4.0965e+018    6.5254e+022
    Columns 7 through 8
    6.6848e+026    3.4240e+030

```

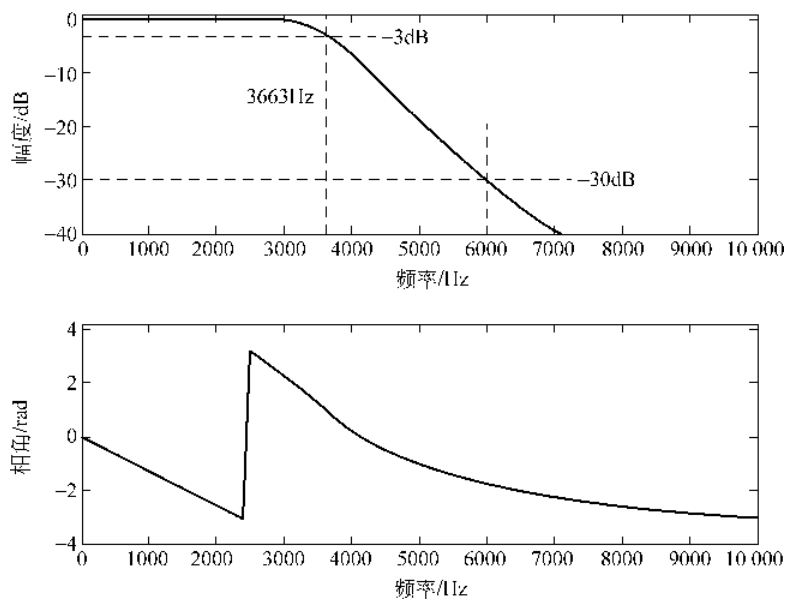


图 3-1 巴特沃斯滤波器的幅频响应和相频响应

类似地,采用椭圆滤波器原型的设计程序如下,其中用 `ellipord` 代替函数 `buttord` 计算滤波器的阶数和截止频率,并用 `ellip` 函数代替 `butter` 函数来计算传递函数。椭圆滤波器设计程序代码如下。

【程序代码】

```
% ch3prob1B.m
```

```

% 椭圆滤波器设计
clear;
f_p = 3400; f_s = 6000; R_p = 3; R_s = 30;          % 设计要求指标
[n, fn] = ellipord(f_p, f_s, R_p, R_s, 's');        % 计算阶数和截止频率
Wn = 2 * pi * fn;                                   % 转换为角频率
[b, a] = ellip(n, R_p, R_s, Wn, 's');              % 计算 H(s)
f = 0:100:10 000;                                   % 计算频率点和频率范围
s = j * 2 * pi * f;                                 % s = jw = j * 2 * pi * f
H_s = polyval(b, s) ./ polyval(a, s);              % 计算相应频率点处 H(s) 的值
figure(1);
subplot(2,1,1); plot(f, 20 * log10(abs(H_s)));      % 幅频特性
axis([0 10 000 -40 1]);
xlabel('频率 Hz'); ylabel('幅度 dB');
subplot(2,1,2); plot(f, angle(H_s));               % 相频特性
xlabel('频率 Hz'); ylabel('相角 rad');
n, fn                                               % 显示滤波器阶数和截止频率

```

执行程序后,得出所设计的椭圆滤波器的阶数为 3 阶,截止频率为 3400Hz,滤波器的幅频响应和相频响应如图 3-2 所示。椭圆滤波器的传递函数分子分母系数分别为:

```

n =
    3
fn =
    3400
b =
    0.25387e+003    4.6242e-009    3.0568e+012
a =
    1.0000e+000    1.2540e+004    4.4313e+008    3.0568e+012

```

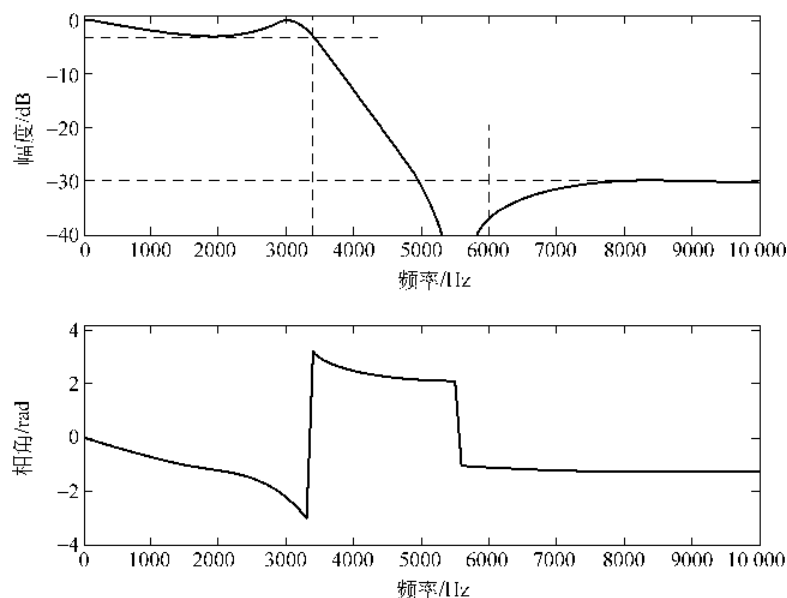


图 3-2 椭圆滤波器的幅频响应和相频响应

对比同等设计指标要求下巴特沃斯滤波器的阶数,椭圆滤波器的设计阶数要小得多,也就意味着实现起来容易一些。但是,椭圆滤波器在带内存在幅度波动,相频响应上也比巴特沃斯滤波器要激烈。因此,椭圆滤波器一般适用于对相频线性度要求不高的场合。

【3-2】 接上题,作出所设计滤波器的冲激响应波形,然后用 Digital Filter Design 模块实现该滤波器,用示波器观察其冲激响应,并与计算得出的理论曲线进行对比。

【解答】

依据上题结果,由巴特沃思滤波器的分子 num,分母 den 系数计算出传递函数,再由 impulse 指令计算理论冲激响应。计算程序如下。

【程序代码】

```
% ch3prob2A.m
num = [0,0,0,0,0,0,0,3.4240e+030];
den = [1.0000e+000, 1.0344e+005, 5.3503e+009, 1.7797e+014, 4.0965e+018, 6.5254e+022, 6.6848e+026, 3.4240e+030];
Transferfun = tf(num,den);
impulse(Transferfun);
```

执行该程序,得出传递函数的代数形式如下:

```
Transferfunction:
               3.424e030
-----
s^7 + 103440s^6 + 5.35e009s^5 + 1.78e014s^4 + 4.097e018s^3
      + 6.525e022s^2 + 6.685e026s + 3.424e030
```

并作出传递函数对应的冲激响应波形,如图 3-3 所示。

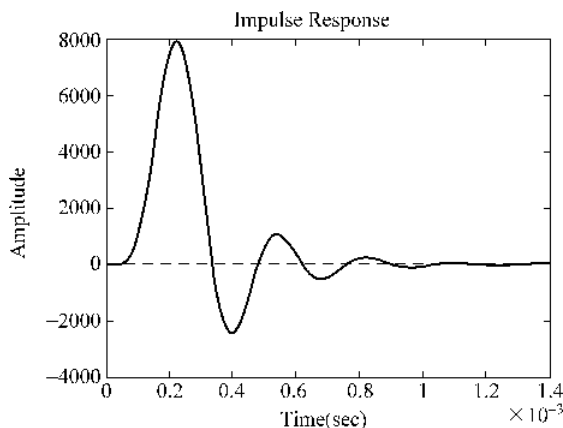


图 3-3 巴特沃斯滤波器的冲激响应

Digital Filter Design 模块是数字滤波器设计和实现模块,用于依据给定滤波器设计指标,设计并实现对应的数字滤波器。习题 3-1 所设计的是模拟滤波器,可依据其给出指标用 Digital Filter Design 设计对应的数字滤波器。最后设计出测试仿真模型,通过示波器观察滤波器的冲激响应,并与模拟滤波器的理论冲激响应(图 3-3)对比。

系统测试仿真模型如图 3-4 所示,数字滤波器的设计采样率为 48000 样值/秒。模型

中,采用脉冲串信号作为输入以近似冲激输入,只要脉冲串周期足够长,脉冲宽度足够窄,脉冲串信号信号发生器脉冲类型采用基于采样的(Sample Based),周期为 1000 样值,脉冲宽度为 1 样值,采样时间设置为 1/48 000 秒,仿真系统亦设置为固定步长的,步长取 1/48 000,仿真时长可取 0.001 秒。双击测试模型其中 Digital Filter Design 模块打开设计对话框,依据习题 3-1 给定指标输入设计参数,如图 3-5 所示,其中虚线椭圆所框部分为设置内容,输入参数并单击 Design Filter 按钮完成设计,即显示幅频响应和相频响应,也可显示设计的冲激响应、零极点图、滤波器系数等内容。系统执行仿真后示波器输出冲激响应波形,如图 3-6 所示,对比图 3-3 可知,两者除了幅度不同以外,在波形上是一致的。

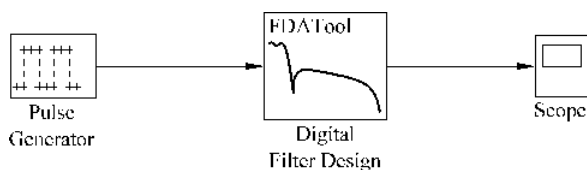


图 3-4 Digital Filter Design 滤波器设计的系统测试仿真模型

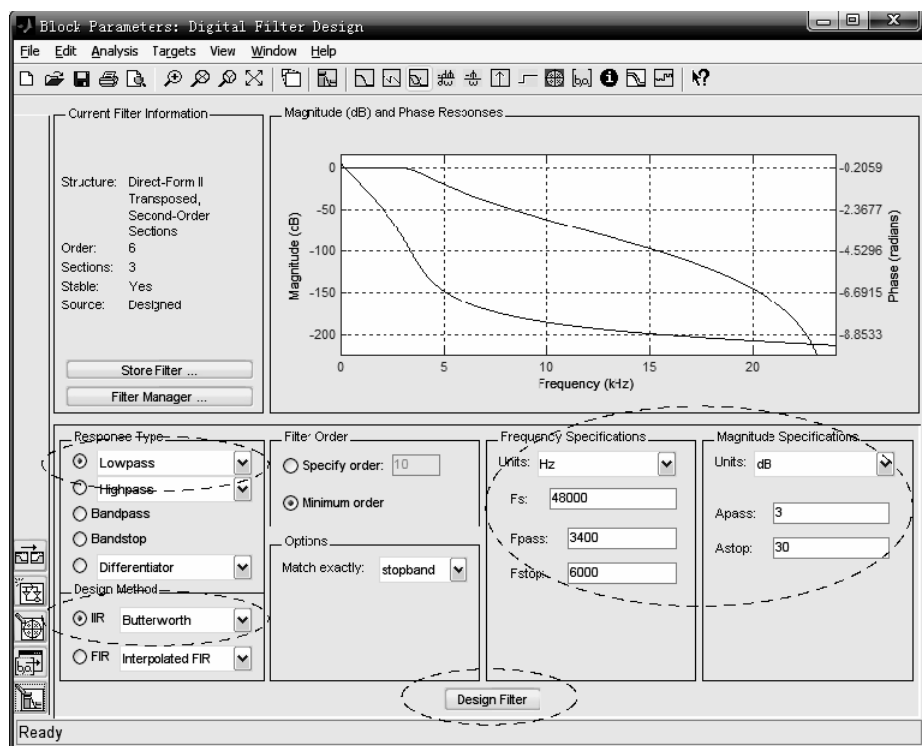


图 3-5 Digital Filter Design 滤波器设计参数输入对话框(巴特沃斯滤波器)

将图 3-5 Digital Filter Design 滤波器设计参数输入对话框中滤波器设计方法(Design Method 中的 IIR)选项修改为椭圆滤波器,则可实现数字椭圆滤波器下的冲激响应仿真。

相应的模拟滤波器冲激响应计算程序如下(ch3prob2B.m)。

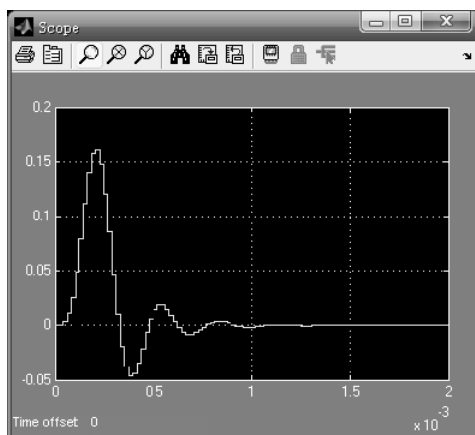


图 3-6 Digital Filter Design 滤波器实现的冲激响应仿真结果

【程序代码】

```
% ch3prob2B.m
num = [0 2.5387e+003 4.6242e-009 3.0568e+012];
den = [1.0000e+000 1.2540e+004 4.4313e+008 3.0568e+012];
Transferfun = tf(num,den);
impz(Transferfun);
```

相应的 Simulink 实现数字椭圆滤波器的 Digital Filter Design 滤波器设计参数输入对话框和频率响应曲线如图 3-7 所示。对比图 3-2 可见,频率响应曲线是一致的。

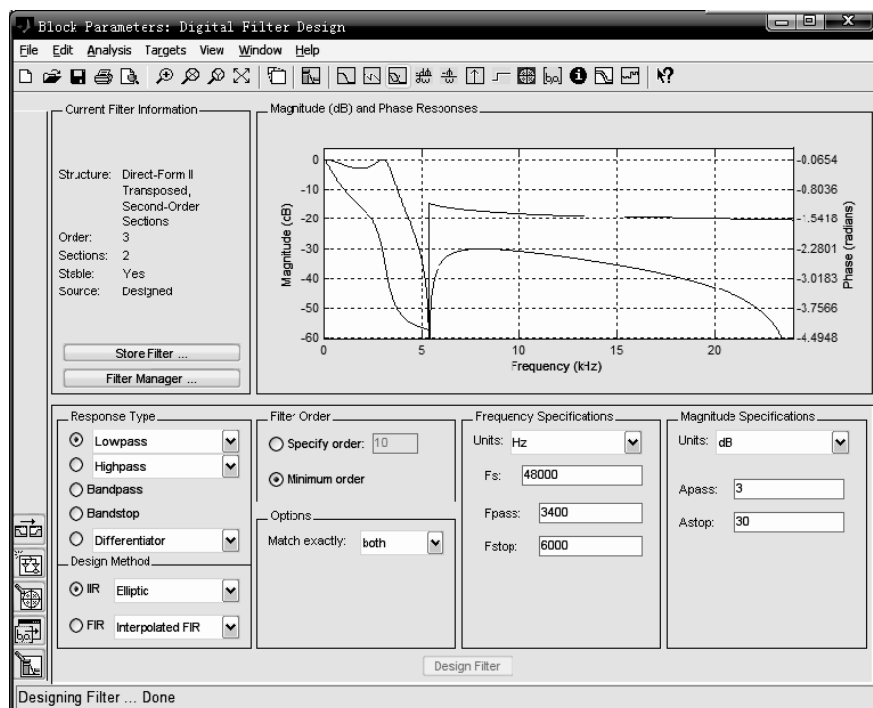


图 3-7 Digital Filter Design 滤波器设计参数输入对话框(椭圆滤波器)

图 3-8 给出了程序 ch3prob2B.m 执行所得到的模拟椭圆滤波器冲激响应以及 Simulink 测试仿真模型中示波器所得的仿真波形。显然,两者在波形上是一致的。

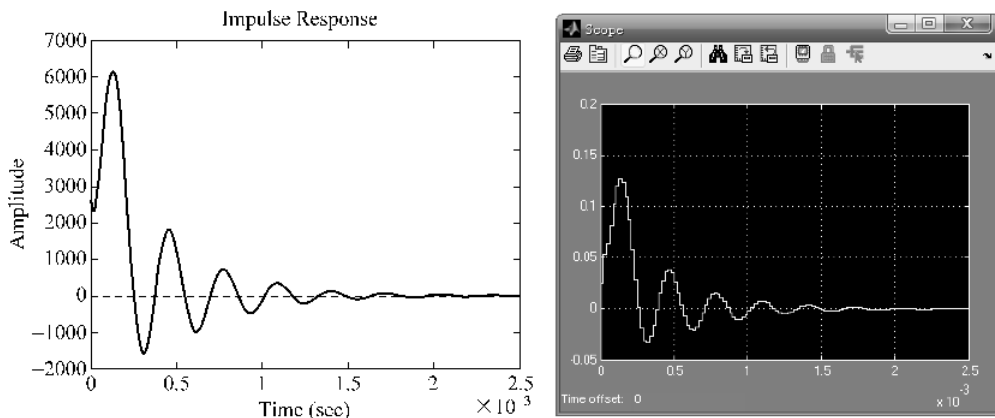


图 3-8 设计模拟椭圆滤波器和数字椭圆滤波器的冲激响应对比

【3-3】 试分别设计一切比雪夫 1 型和切比雪夫 2 型数字低通滤波器,设采样率为 20 000Hz, $f_p = 3400\text{Hz}$, $f_s = 4000\text{Hz}$, $R_p = 3\text{dB}$, $R_s = 20\text{dB}$ 。求其传递函数,并作出幅频、相频特性曲线。然后分别通过编程和 Simulink 模块来实现它们,对比两种实现结果波形是否一致?从仿真结果上说明切比雪夫 1 型和切比雪夫 2 型数字低通滤波器的区别。

【解答】

依据题设参数,切比雪夫 1 型滤波器设计程序如下。

【程序代码】

```
% ch3prob3A.m
f_N = 20 000; % 采样率
f_p = 3400; f_s = 4000; R_p = 3; R_s = 20; % 设计要求指标
Ws = f_s/(f_N/2); Wp = f_p/(f_N/2); % 计算归一化频率
[n, Wn] = cheblord(Wp, Ws, R_p, R_s); % 计算阶数和截止频率
[b, a] = cheby1(n, R_p, Wn); % 计算 H(z)
freqz(b, a, 1000, f_N) % 作出 H(z) 的幅频相频图, freqz(b, a, 计算点数, 采样率)
subplot(2,1,1); axis([0 f_N/2 -30 3])
```

执行得到频率响应曲线如图 3-9 所示。从曲线看,通带内幅度波动,波动范围在 3dB 内, 3400Hz 处衰减为 3dB, 4000Hz 位置幅度衰减大于 20dB, 符合设计指标要求。

依据题设参数,切比雪夫 2 型滤波器设计程序如下。

【程序代码】

```
% ch3prob3B.m
f_N = 20 000; % 采样率
f_p = 3400; f_s = 4000; R_p = 3; R_s = 20; % 设计要求指标
Ws = f_s/(f_N/2); Wp = f_p/(f_N/2); % 计算归一化频率
[n, Wn] = cheb2ord(Wp, Ws, R_p, R_s); % 计算阶数和截止频率
[b, a] = cheby2(n, R_s, Wn); % 计算 H(z)
freqz(b, a, 1000, f_N) % 作出 H(z) 的幅频相频图, freqz(b, a, 计算点数, 采样率)
subplot(2,1,1); axis([0 f_N/2 -30 3])
```

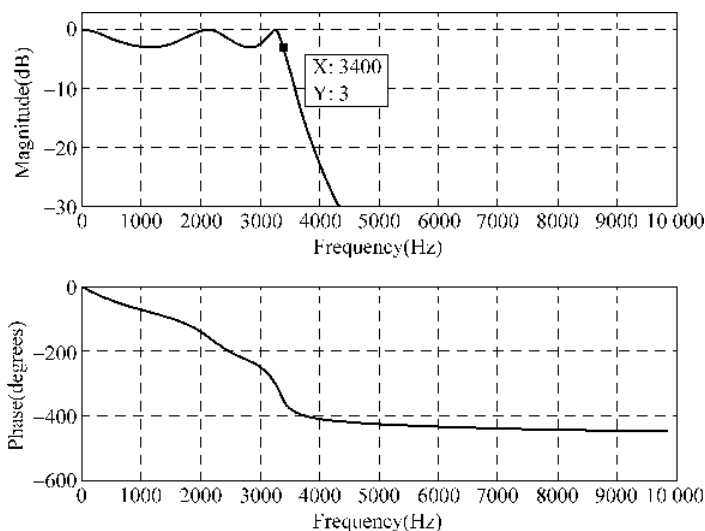



图 3-9 切比雪夫 1 型滤波器频率响应曲线

执行得到频率响应曲线如图 3-10 所示。从曲线看,通带内幅度无波动,4000Hz 以上位置阻带内幅度是波动的,且衰减大于 20dB,符合设计指标要求。

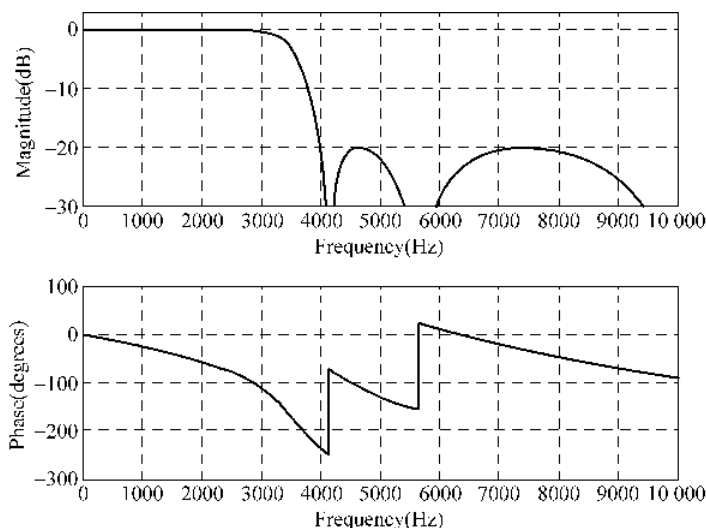


图 3-10 切比雪夫 2 型滤波器频率响应曲线

切比雪夫 1 型滤波器的编程实现程序如下(ch3prob3C.m)。其中使用了 filter 函数进行实现,其输入信号 input 为冲激,计算时长为 4 毫秒。程序执行后得到的冲激响应如图 3-11 所示。

【程序代码】

```
% ch3prob3C.m
f_N = 20 000; % 采样率
f_p = 3400; f_s = 4000; R_p = 3; R_s = 20; % 设计要求指标
Ws = f_s/(f_N/2); Wp = f_p/(f_N/2); % 计算归一化频率
[n, Wn] = cheblord(Wp, Ws, R_p, R_s); % 计算阶数和截止频率
[b, a] = cheby1(n, R_p, Wn); % 计算 H(z)
```

```

t = 0:1/f_N:0.004;
input = [1,zeros(1,length(t) - 1)];           % 输入冲激信号
output = filter(b,a,input);
stem(t,output,'. ');

```

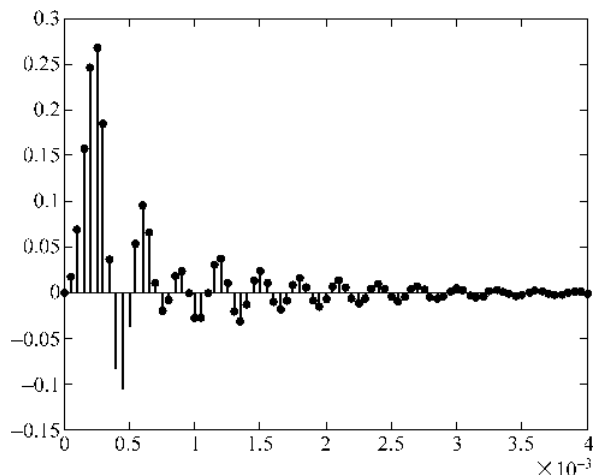


图 3-11 切比雪夫 1 型滤波器的冲激响应(程序实现)

切比雪夫 1 型滤波器对应的 Simulink 实现测试模型如图 3-12 所示。脉冲发生器设置为基于样值的,脉宽为 1 样值,周期为 1000 样值,脉冲发生器的采样率为 20 000 样值/秒。仿真参数采用固定步长,步长为 1/20 000 秒,仿真时长为 0.004 秒。执行仿真后示波器显示波形如图 3-13 所示。对比图 3-13 和图 3-11,两者是相同的。

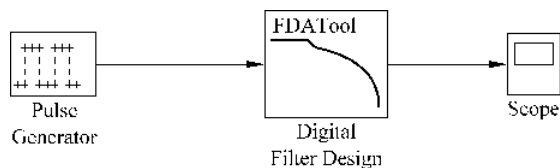


图 3-12 切比雪夫滤波器设计和冲激响应测试模型

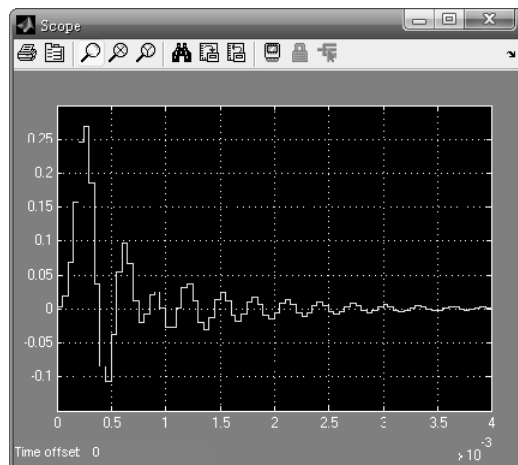


图 3-13 切比雪夫 1 型滤波器的冲激响应(Simulink 实现)

类似地,实现切比雪夫 2 型滤波器的编程实现程序如下(ch3prob3D.m)。其参数设置如图 3-14 所示,程序执行后得到的冲激响应如图 3-15 所示,可见,程序实现和 Simulink 实现结果相同。

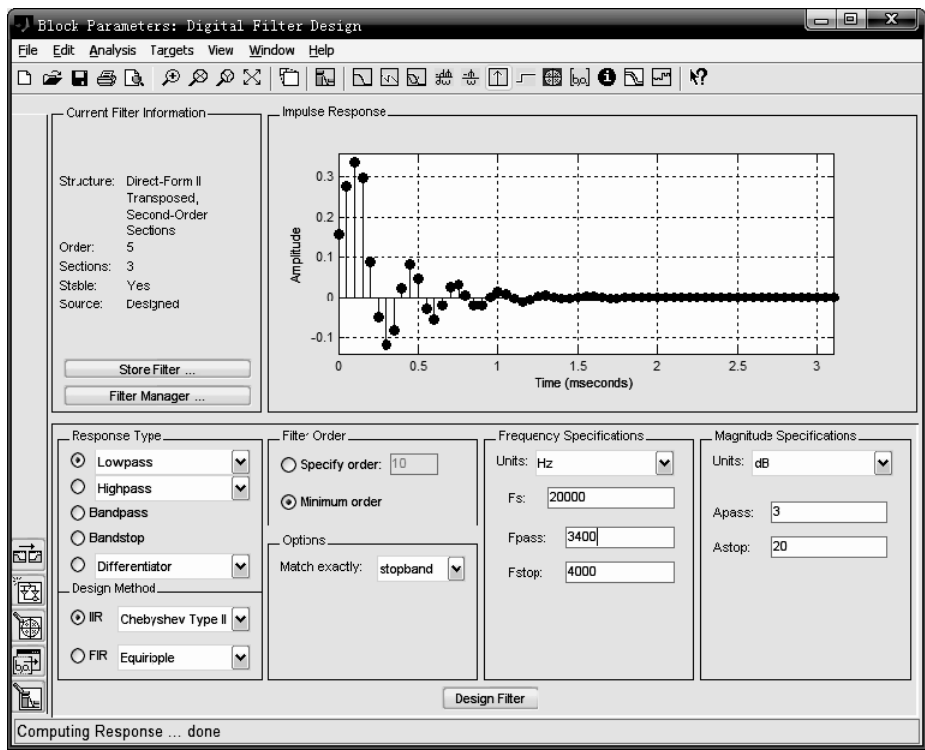


图 3-14 切比雪夫 2 型滤波器的设计对话框参数设置

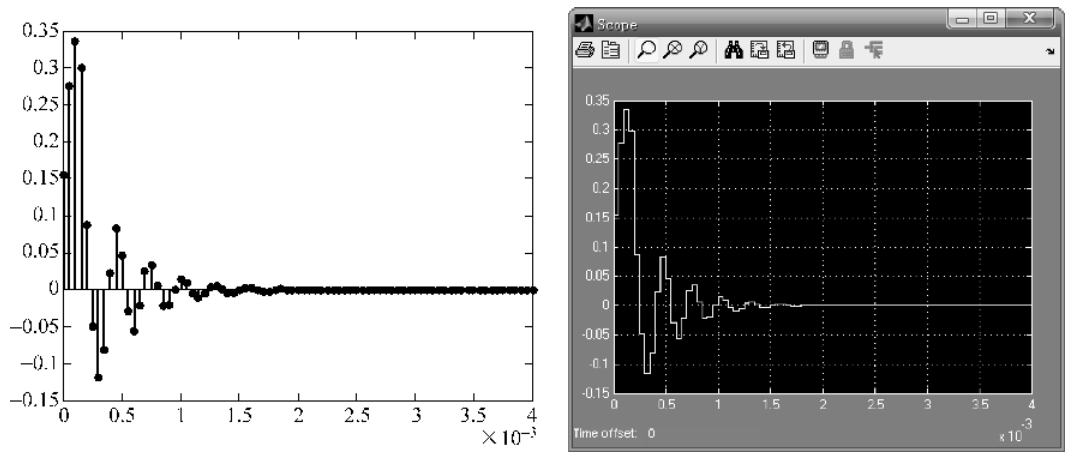


图 3-15 切比雪夫 2 型滤波器的冲激响应(程序实现和 Simulink 实现)波形对比

【程序代码】

```
% ch3prob3D.m
f_N = 20 000;
% 采样率
```