

重庆邮电大学

学生实验实习报告册

学年学期： 2022 -2023 学年 ☐春 ☒秋学期

课程名称： 信号处理实验

学生学院： 通信与信息工程学院

专业班级：

学生学号：

学生姓名：

联系电话：

重庆邮电大学教务处制

课程名称	信号处理实验	课程编号	A2010550
实验地点	YF314	实验时间	2022 年 11 月 25 日
校外指导教师	郑丹玲	校内指导教师	郑丹玲
实验名称	用 MATLAB 设计 FIR 数字滤波器		
评阅人签字		成绩	

一、实验目的

- 1、加深对窗函数法设计 FIR 数字滤波器的基本原理的理解。
- 2、学习用 MATLAB 语言的窗函数法编写设计 FIR 数字滤波器的程序。
- 3、了解 MATLAB 语言有关窗函数法设计 FIR 数字滤波器的常用函数用法。
- 4、掌握 FIR 滤波器的快速卷积实现原理。

二、实验原理

2.1 用窗函数法设计 FIR 数字滤波器

FIR 数字滤波器的系统函数为：

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n}$$

这个公式也可以看成是离散 LSI 系统的系统函数：

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b(z)}{a(z)} = \frac{\sum_{m=0}^M b_m z^{-m}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N}}$$

分母 a_0 为 1, 其余 a_k 都为 0 时的一个特例。由于极点全部集中在零点, 稳定和线性相位特性是 FIR 滤波器的突出优点, 因此在实际中广泛使用。

FIR 滤波器的设计任务是选择有限长度的 $h(n)$, 使传输函数 $H(e^{j\omega})$ 满足技术要求。主要设计方法有窗函数法、频率采样法和切比雪夫等波纹逼近法等。本实验主要介绍窗函数法。

用窗函数法设计 FIR 数字滤波器的基本步骤如下：

- (1) 根据过渡带和阻带衰减指标选择窗函数的类型, 估算滤波器的阶数 N 。
- (2) 由数字滤波器的理想频率响应 $H(e^{j\omega})$ 求出其单位冲激响应 $h_d(n)$ 。
- (3) 计算数字滤波器的单位冲激响应 $h(n) = w(n)h_d(n)$ 。
- (4) 检查设计的滤波器是否满足技术指标。

如果设计的滤波器不满足技术指标, 则需要重新选择或调整窗函数的类型, 估算滤波器的阶数 N 。再重复前面的四个步骤, 直到满足指标。常用的窗函数有矩形窗、三角形窗、汉宁窗、哈明窗、切比雪夫窗、布莱克曼窗、凯塞窗等, MATLAB 均有相应的函数可以调用。另外, MATLAB 信号处理工具箱还提供了 `fir1` 函数, 可以用于窗函数法设计 FIR 滤波器。由于第一类线性相位滤波器 (类型 I) 能进行低通、高通、带通、带阻滤波器的设计, 因此, 本实验所有滤波器均采用第一类线性相位滤波器。

2. 各种窗函数特性的比较

表 2-1 六种窗函数的特性参数表

窗函数	旁瓣峰值/dB	近似过渡带宽	精确过渡带宽	阻带最小衰减/dB
矩形窗	-13	$4\pi/N$	$1.8\pi/N$	21
三角形窗	-25	$8\pi/N$	$6.1\pi/N$	25
汉宁窗	-31	$8\pi/N$	$6.2\pi/N$	44
哈明窗	-41	$8\pi/N$	$6.6\pi/N$	53
布莱克曼窗	-57	$12\pi/N$	$11\pi/N$	74
凯塞窗	-57		$10\pi/N$	80

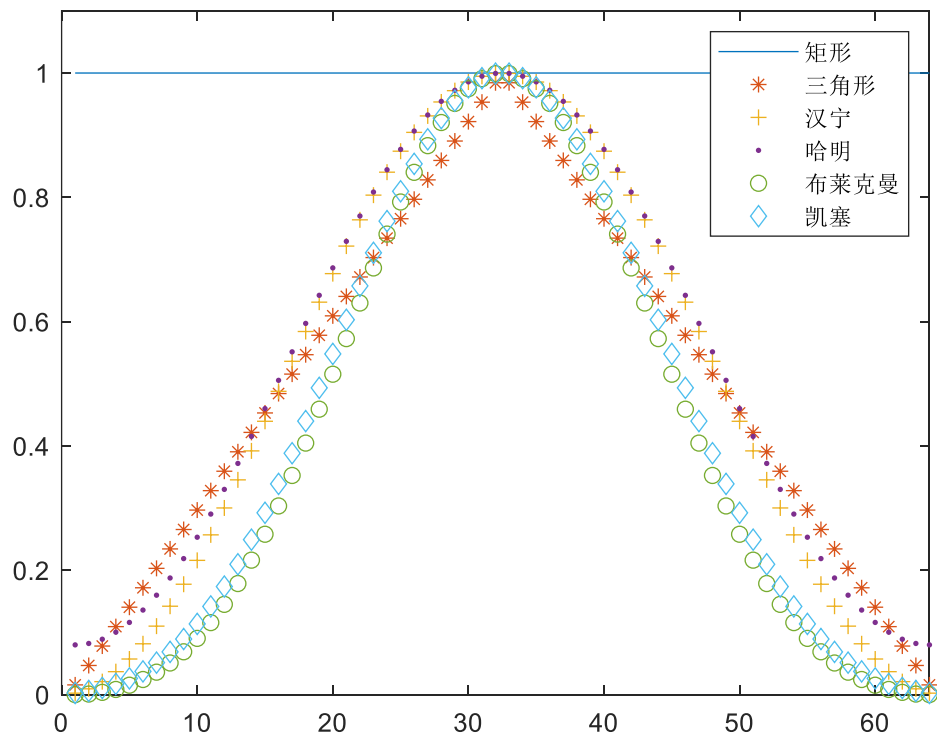


图 2-1 六种窗函数的特性比较图

3. 信号的整数倍零值内插

内插可以提高信号的取样率，整数倍零值内插是在 $x(n)$ 相邻两个样点之间等间隔内插 $I-1$ 个 0 值点， I 是大于 1 的整数，称为内插因子。整数倍内插的频域解释见教材第 8 章的 8.3 节。由于内插后信号频谱发送变化，需采用一个镜像低通滤波器对内插后的信号滤波。

镜像滤波器的系统函数为：

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \frac{\pi}{I} \\ 0, & \frac{\pi}{I} \leq |\omega| \leq \pi \end{cases}$$

三、实验程序

```
1. clc;
2. clear;
3. close all;
4. %% 窗函数特性的比较
5. N = 64;
6. beta = 7.865;
7. n = 1:N;
8. wbo = boxcar(N);    %矩形窗
9. wtr = triang(N);    %三角窗
10. whn = hanning(N);  %汉宁窗
11. whm = hamming(N);  %哈明窗
12. wbl = blackman(N); %布莱克曼窗
13. wka = kaiser(N,beta); %凯塞窗
14. plot(n,wbo, '- ',n,wtr, '*',n,whn, '+',n,whm, '.',n,wbl, 'o',n,wka, 'd');
15. axis([0,N,0,1.1]);
16. legend('矩形','三角形','汉宁','哈明','布莱克曼','凯塞');
17.
18. %% 用窗函数法设计 FIR 数字滤波器
19. wp = 0.3 * pi;
20. ws = 0.45 * pi;
21. delta_w = ws - wp;
22. N0 = (6.6 * pi / delta_w);
23. N = N0 + mod(N0 + 1,2); %实现 FIR 类型偶对称滤波器，应确保 N 为奇数
24. windows = (hamming(N))';
25. wc = (ws + wp)/2;
26. hd = ideal_lp(wc,N);
27. b = hd.*windows;
28. [H,w] = freqz(b,1,1000,'whole');
29. H = (H(1:501))';
30. w = (w(1:501))';
31. mag = abs(H);
32. db = 20 * log10((mag + eps) / max(mag));
33. pha = angle(H);
34. n = 0:N-1;
35. dw = 2 * pi / 1000;
36. Rp = -(min(db(1:wp/dw+1))); %检验通带波动
37. As = -round(max(db(ws/dw+1:501))); %检验最小阻带衰减
38. figure(2);
39. subplot(2,2,1);
40. stem(n,b, '.');
41. title('实际脉冲响应');
42. xlabel('n');
43. ylabel('h(n)');
44. subplot(2,2,2);
45. stem(n,windows, '.');
```

```

46. axis([0,N,0,1.1]);
47. title('窗函数特性');
48. xlabel('n');
49. ylabel('wd(n)');
50. subplot(2,2,3);
51. plot(w/pi,db);
52. axis([0,1,-80,10]);
53. title('幅度频率响应');
54. xlabel('频率 (单位: \pi)');
55. ylabel('H(e^{j\omega})');
56. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,wp/pi,ws/pi,1]);
57. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-50,-20,-3,0]);
58. grid;
59. subplot(2,2,4);
60. plot(w/pi,pha);
61. axis([0,1,-4,4]);
62. title('相位频率响应');
63. xlabel('频率 (单位: \pi)');
64. ylabel('\phi(\omega)');
65. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,wp/pi,ws/pi,1]);
66. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-3.1416,0.3,3.1416,4]);
67. grid;
68.
69.
70.
71. %% 利用工具箱设计
72. clc;
73. clear;
74. wp = 0.3 * pi;
75. ws = 0.45 * pi;
76. delta_w = ws - wp;
77. N0 = ceil(6.6 * pi / delta_w);
78. N = N0 + mod(N0 + 1,2); %实现 FIR 类型偶对称滤波器，应确保 N 为奇数
79. windows = (hamming(N))';
80. wc = (ws + wp)/2/pi;
81. b = fir1(N-1,wc,windows);
82. [H,w] = freqz(b,1,1000,'whole');
83. H = (H(1:501))';
84. w = (w(1:501))';
85. mag = abs(H);
86. db = 20 * log10((mag + eps) / max(mag));
87. pha = angle(H);
88. n = 0:N-1;
89. dw = 2 * pi / 1000;
90. Rp = -(min(db(1:wp/dw+1))); %检验通带波动
91. As = -round(max(db(ws/dw+1:501))); %检验最小阻带衰减

```

```

92.
93. %% 设计 fir 低通滤波器
94. clc;
95. clear;
96. wp = 0.24 * pi;
97. ws = 0.3 * pi;
98. delta_w = ws - wp;
99. N0 = ceil(11 * pi / delta_w);
100. N = N0 + mod(N0 + 1,2); %实现 FIR 类型偶对称滤波器，应确保 N 为奇数
101. windows = (blackman(N))';
102. wc = (ws + wp)/2;
103. hd = ideal_lp(wc,N);
104. b = hd.*windows;
105. [H,w] = freqz(b,1,1000,'whole');
106. H = (H(1:501))';
107. w = (w(1:501))';
108. mag = abs(H);
109. db = 20 * log10((mag + eps) / max(mag));
110. pha = angle(H);
111. n = 0:N-1;
112. dw = 2 * pi / 1000;
113. Rp = -(min(db(1:int32(wp/dw+1))))); %检验通带波动
114. As = -round(max(db(ws/dw+1:501))); %检验最小阻带衰减
115. figure(3);
116. subplot(2,2,1);
117. stem(n,b, '.');
118. title('实际脉冲响应');
119. xlabel('n');
120. ylabel('h(n)');
121. subplot(2,2,2);
122. stem(n, windows, '.');
123. axis([0,N,0,1.1]);
124. title('窗函数特性');
125. xlabel('n');
126. ylabel('wd(n)');
127. subplot(2,2,3);
128. plot(w/pi,db);
129. axis([0,1,-100,10]);
130. title('幅度频率响应');
131. xlabel('频率 (单位: \pi)');
132. ylabel('H(e^{j\omega})');
133. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0,wp/pi,ws/pi,1]);
134. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-60,-20,-3,0]);
135. grid on;
136. subplot(2,2,4);
137. plot(w/pi,pha);

```

```

138. axis([0,1,-4,4]);
139. title('相位频率响应');
140. xlabel('频率 (单位: \pi) ');
141. ylabel('\phi(\omega)');
142. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0,wp/pi,ws/pi,1]);
143. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-3.1416,0.3,3.1416,4]);
144. grid;
145.
146. %% 产生加性噪声
147. figure(4);
148. [xt,t] = xtg(1000);
149.
150. %% 对噪声滤波
151. yt = fftfilt(b,xt);
152. Hyk=abs(fft(yt));
153. figure(5);
154. subplot(2,1,1)
155. plot(t,yt)
156. title('时域波形图')
157. subplot(2,1,2)
158. stem(Hyk, '.')
159. axis([80,120,min(Hyk),max(Hyk)])
160.
161. %% 选做
162. % 内插 0
163. clc;
164. clear;
165. [xn, fs] = audioread('motherland.wav');
166. I = 2; % 实现 I=2 的整数倍 0 值内插
167. yn1 = []; %预分配内存
168. for i=1:length(xn)
169.     yn1(I*i-1)=xn(i);
170.     yn1(I*i)= 0;
171. end
172. % sound(yn1,I*fs);
173.
174. %滤波器设计
175. wp = 0.45 * pi;
176. ws = 0.55 * pi;
177. delta_w = ws - wp;
178. N0 = ceil(11 * pi / delta_w);
179. N = N0 + mod(N0 + 1,2); %实现 FIR 类型偶对称滤波器, 应确保 N 为奇数
180. windows = (blackman(N))';
181. wc = (ws + wp)/2;
182. hd = ideal_lp(wc,N);
183. b = hd.*windows;

```

```

184. [H,w] = freqz(b,1,1000,'whole');
185. H = (H(1:501))';
186. w = (w(1:501))';
187. mag = abs(H);
188. db = 20 * log10((mag + eps) / max(mag));
189. pha = angle(H);
190. n = 0:N-1;
191. dw = 2 * pi / 1000;
192. Rp = -(min(db(1:int32(wp/dw+1))))); %检验通带波动
193. As = -round(max(db(ws/dw+1:501))); %检验最小阻带衰减
194. figure(6);
195. subplot(2,2,1);
196. stem(n,b, '.');
197. title('实际脉冲响应');
198. xlabel('n');
199. ylabel('h(n)');
200. subplot(2,2,2);
201. stem(n, windows, '.');
202. axis([0,N,0,1.1]);
203. title('窗函数特性');
204. xlabel('n');
205. ylabel('wd(n)');
206. subplot(2,2,3);
207. plot(w/pi,db);
208. axis([0,1,-100,10]);
209. title('幅度频率响应');
210. xlabel('频率 (单位: \pi)');
211. ylabel('H(e^{j\omega})');
212. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0,wp/pi,ws/pi,1]);
213. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-60,-20,-3,0]);
214. grid on;
215. subplot(2,2,4);
216. plot(w/pi,pha);
217. axis([0,1,-4,4]);
218. title('相位频率响应');
219. xlabel('频率 (单位: \pi)');
220. ylabel('\phi(\omega)');
221. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0,wp/pi,ws/pi,1]);
222. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-3.1416,0.3,3.1416,4]);
223. grid;
224.
225. %滤波并画图
226. yn2 = fftfilt(b,yn1);
227. sound(yn2,I*fs);
228. figure(7);
229. subplot(4,1,1)

```



```

230. N=2048;
231. Xn=1/fs*fft(xn(8000:8199),N); % 从 xn 中取 200 点做谱分析, N 可取 2048
232. plot((0:N/2-1)*fs/N,abs(Xn(1:N/2))); % 模拟域幅度谱
233. xlabel('f(Hz)')
234. title('原始信号模拟域幅度谱')
235. subplot(4,1,2)
236. Yn1=1/(I*fs)*fft(yn1(16000:16399),N); % 内插后, 200 点长变成了 400 点长
237. plot((0:N/2-1)*I*fs/N,abs(Yn1(1:N/2)));
238. xlabel('f(Hz)')
239. title('I=2 内插处理后的信号模拟域幅度谱')
240. subplot(4,1,3)
241. yn2=filter(b,1,yn1); % 对 yn1 进行滤波, b 为所设计的镜像滤波器
242. Yn2=1/(I*fs)*fft(yn2(16000:16399),N); % 内插后, 200 点长变成了 400 点长
243. plot((0:N/2-1)*I*fs/N,abs(Yn2(1:N/2)));
244. xlabel('f(Hz)')
245. title('信号内插后再经过镜像滤波后的模拟域幅度谱')
246. subplot(4,1,4)
247. plot((0:N/4-1)*I*fs/N,abs(Yn2(1:N/4)));
248. xlabel('f(Hz)')
249. title('信号内插后再经过镜像滤波后的模拟域幅度谱')
250.
251. %% 思考题
252. %低通
253. clc;
254. clear;
255. wp = 0.2 * pi;
256. ws = 0.3 * pi;
257. delta_w = ws - wp;
258. N0 = ceil(6.1 * pi / delta_w);
259. N = N0 + mod(N0 + 1,2); %实现 FIR 类型偶对称滤波器, 应确保 N 为奇数
260. windows = (triang(N))';
261. wc = (ws + wp)/2/pi;
262. b = fir1(N-1,wc,windows);
263. [H,w] = freqz(b,1,1000,'whole');
264. H = (H(1:501))';
265. w = (w(1:501))';
266. mag = abs(H);
267. db = 20 * log10((mag + eps) / max(mag));
268. pha = angle(H);
269. n = 0:N-1;
270. dw = 2 * pi / 1000;
271. Rp = -(min(db(1:wp/dw+1))); %检验通带波动
272. As = -round(max(db(ws/dw+1:501))); %检验最小阻带衰减
273. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
274. Attn = 10^(-As/20); %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
275. figure(8);

```

```

276. subplot(2,2,1);
277. stem(n,b, '.');
278. title('实际脉冲响应');
279. xlabel('n');
280. ylabel('h(n)');
281. % subplot(2,2,2);
282. % stem(n, windows, '.');
283. % axis([0,N,0,1.1]);
284. % title('窗函数特性');
285. % xlabel('n');
286. % ylabel('wd(n)');
287. subplot(2,2,2);
288. plot(w/pi, mag);
289. title('幅度频率响应');
290. xlabel('频率 (单位: \pi)');
291. ylabel('H(e^{j\omega})');
292. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, wp/pi, ws/pi, 1]);
293. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [0, Attn, ripple, 1]);
294. grid;
295. subplot(2,2,3);
296. plot(w/pi, db);
297. axis([0, 1, -100, 10]);
298. title('幅度频率响应');
299. xlabel('频率 (单位: \pi)');
300. ylabel('db H(e^{j\omega})');
301. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, wp/pi, ws/pi, 1]);
302. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-40, -As, -1, 0]);
303. axis([0, 1, -50, 5]);
304. grid on;
305. subplot(2,2,4);
306. plot(w/pi, pha);
307. axis([0, 1, -4, 4]);
308. title('相位频率响应');
309. xlabel('频率 (单位: \pi)');
310. ylabel('\phi(\omega)');
311. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, wp/pi, ws/pi, 1]);
312. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-3.1416, 0.3, 3.1416, 4]);
313. grid;
314.
315. %高通
316. clc;
317. clear;
318. wp = 0.4 * pi;
319. ws = 0.6 * pi;
320. delta_w = ws - wp;
321. N0 = ceil(6.2 * pi / delta_w);

```

```

322. N = N0 + mod(N0 + 1,2);      %实现 FIR 类型偶对称滤波器，应确保 N 为奇数
323. windows = (hanning(N))';
324. wc = (ws + wp)/2/pi;
325. b = fir1(N-1,wc,'high',windows);
326. [H,w] = freqz(b,1,1000,'whole');
327. H = (H(1:501))';
328. w = (w(1:501))';
329. mag = abs(H);
330. db = 20 * log10((mag + eps) / max(mag));
331. pha = angle(H);
332. n = 0:N-1;
333. dw = 2 * pi / 1000;
334. Rp = -(min(db(1:wp/dw+1))); %检验通带波动
335. As = -round(max(db(ws/dw+1:501))); %检验最小阻带衰减
336. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
337. Attn = 10^(-As/20); %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
338. figure(9);
339. subplot(2,2,1);
340. stem(n,b,'.');
341. title('实际脉冲响应');
342. xlabel('n');
343. ylabel('h(n)');
344. subplot(2,2,2);
345. % stem(n,windows,'.');
346. % axis([0,N,0,1.1]);
347. % title('窗函数特性');
348. % xlabel('n');
349. % ylabel('wd(n)');
350. plot(w/pi,mag);
351. title('幅度频率响应');
352. xlabel('频率 (单位: \pi)');
353. ylabel('H(e^{j\omega})');
354. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,wp/pi,ws/pi,1]);
355. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[0,ripple,Attn]);
356. grid;
357. subplot(2,2,3);
358. plot(w/pi,db);
359. axis([0,1,-100,10]);
360. title('幅度频率响应');
361. xlabel('频率 (单位: \pi)');
362. ylabel('db H(e^{j\omega})');
363. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,wp/pi,ws/pi,1]);
364. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-70,-43,-3,0]);
365. grid on;
366. subplot(2,2,4);
367. plot(w/pi,pha);

```

```

368. axis([0,1,-4,4]);
369. title('相位频率响应');
370. xlabel('频率 (单位: \pi) ');
371. ylabel('\phi(\omega)');
372. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0,wp/pi,ws/pi,1]);
373. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-3.1416,0.3,3.1416,4]);
374. grid;
375.
376. %带通
377. clc;
378. clear;
379. wpl = 0.15 * pi;
380. wph = 0.65 * pi;
381. wsl = 0.2 * pi;
382. wsh = 0.6 * pi;
383. wd1 = (wpl + wsl)/2;
384. wd2 = (wph + wsh)/2;
385. delta_w = min(abs(wsl-wpl),abs(wsh-wph));
386. N0 = ceil(6.6 * pi / delta_w); %%8 好一点
387. N = N0 + mod(N0 + 1,2); %实现 FIR 类型偶对称滤波器，应确保 N 为奇数
388. wn = [wd1/pi,wd2/pi];
389. b = fir1(N-1,wn,'bandpass', hamming(N));
390.
391. [H,w] = freqz(b,1,1000,'whole');
392. H = (H(1:501))';
393. w = (w(1:501))';
394. mag = abs(H);
395. db = 20 * log10((mag + eps) / max(mag));
396. pha = angle(H);
397. n = 0:N-1;
398. dw = 2 * pi / 1000;
399. Rp = -(min(db(1:(wph-wpl)/dw+1))); %检验通带波动
400. As = -round(max(db((wsh-wsl)/dw+1:501))); %检验最小阻带衰减
401. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
402. Attn = 10^(-As/20); %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
403. figure(10);
404. subplot(2,2,1);
405. stem(n,b,'. ');
406. title('实际脉冲响应');
407. xlabel('n');
408. ylabel('h(n)');
409. subplot(2,2,2);
410. % stem(n, windows, '. ');
411. % axis([0,N,0,1.1]);
412. % title('窗函数特性');
413. % xlabel('n');

```

```

414.% ylabel('wd(n)');
415.plot(w/pi,mag);
416.title('幅度频率响应');
417.xlabel('频率 (单位: \pi) ');
418.ylabel('H(e^{j\omega})');
419.set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,wpl/pi,wsl/pi,wsh/pi,wph/pi,1]);
420.set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[0,ripple,Attn]);
421.grid;
422.subplot(2,2,3);
423.plot(w/pi,db);
424.axis([0,1,-100,10]);
425.title('幅度频率响应');
426.xlabel('频率 (单位: \pi) ');
427.ylabel('db H(e^{j\omega})');
428.set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,wpl/pi,wsl/pi,wsh/pi,wph/pi,1]);
429.set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-70,-50,-3,0]);
430.grid on;
431.subplot(2,2,4);
432.plot(w/pi,pha);
433.axis([0,1,-4,4]);
434.title('相位频率响应');
435.xlabel('频率 (单位: \pi) ');
436.ylabel('\phi(\omega)');
437.set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,wpl/pi,wsl/pi,wsh/pi,wph/pi,1]);
438.set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-3.1416,0.3,3.1416,4]);
439.grid;
440.
441.
442.%带阻
443.clc;
444.clear;
445.wpl = 0.15 * pi;
446.wph = 0.65 * pi;
447.wsl = 0.2 * pi;
448.wsh = 0.6 * pi;
449.wd1 = (wpl + wsl)/2;
450.wd2 = (wph + wsh)/2;
451.delta_w = min(abs(wsl-wpl),abs(wsh-wph));
452.N0 = ceil(6.2 * pi / delta_w);
453.N = N0 + mod(N0 + 1,2); %实现 FIR 类型偶对称滤波器，应确保 N 为奇数
454.wn = [wd1/pi,wd2/pi];
455.b = fir1(N-1,wn,'stop', hanning(N));
456.
457.[H,w] = freqz(b,1,1000,'whole');
458.H = (H(1:501))';
459.w = (w(1:501))';

```

```

460. mag = abs(H);
461. db = 20 * log10((mag + eps) / max(mag));
462. pha = angle(H);
463. n = 0:N-1;
464. dw = 2 * pi / 1000;
465. Rp = -(min(db(1:(wph-wpl)/dw+1))); %检验通带波动
466. As = -round(max(db((wsh-wsl)/dw+1:501))); %检验最小阻带衰减
467. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
468. Attn = 10^(-As/20); %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
469. figure(11);
470. subplot(2,2,1);
471. stem(n,b, '.');
472. title('实际脉冲响应');
473. xlabel('n');
474. ylabel('h(n)');
475. subplot(2,2,2);
476. % stem(n, windows, '.');
477. % axis([0,N,0,1.1]);
478. % title('窗函数特性');
479. % xlabel('n');
480. % ylabel('wd(n)');
481. plot(w/pi, mag);
482. title('幅度频率响应');
483. xlabel('频率 (单位: \pi)');
484. ylabel('H(e^{j\omega})');
485. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, wpl/pi, wsl/pi, wsh/pi, wph/pi, 1]);
486. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [0, ripple, Attn]);
487. grid;
488. subplot(2,2,3);
489. plot(w/pi, db);
490. axis([0, 1, -100, 10]);
491. title('幅度频率响应');
492. xlabel('频率 (单位: \pi)');
493. ylabel('db H(e^{j\omega})');
494. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, wpl/pi, wsl/pi, wsh/pi, wph/pi, 1]);
495. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-70, -45, -3, 0]);
496. grid on;
497. subplot(2,2,4);
498. plot(w/pi, pha);
499. axis([0, 1, -4, 4]);
500. title('相位频率响应');
501. xlabel('频率 (单位: \pi)');
502. ylabel('\phi(\omega)');
503. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, wpl/pi, wsl/pi, wsh/pi, wph/pi, 1]);
504. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-3.1416, 0.3, 3.1416, 4]);
505. grid;

```

四、仿真分析

1、阅读并输入实验原理中介绍的例题程序，观察输出的数据和图形，结合基本原理理解每一条语句的含义。

此时利用例 2-2 进行举例来说明实验 1 内容，即选择合适的窗函数设计一个 FIR 数字低通滤波器，要求：通带截止频率为 $\omega_p=0.3\pi$ ， $R_p=0.05\text{dB}$ ；阻带截止频率为 $\omega_s=0.45\pi$ ， $A_s=50\text{dB}$ 。描绘该滤波器的脉冲响应、窗函数及滤波器的幅频响应曲线和相频响应曲线。

此时由设计指标可以得到窗函数应该选择哈明窗，最终仿真结果如下图 1 所示。

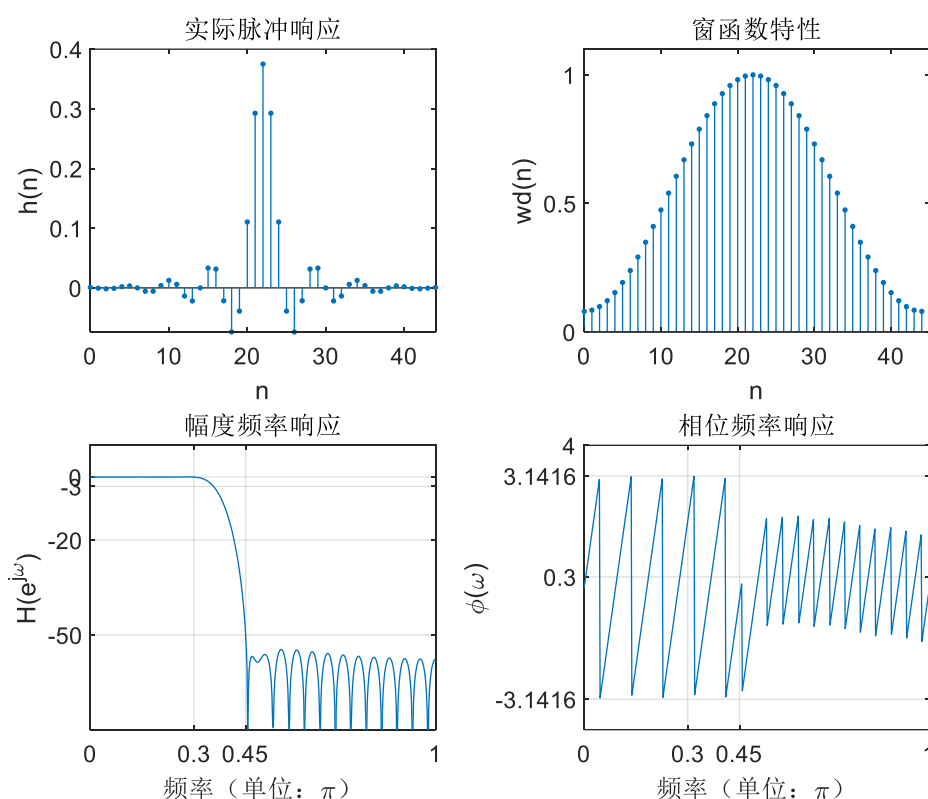


图 1 例 2.2 FIR 滤波器设计仿真图

此时，满足设计要求：通带截止频率为 $\omega_p=0.3\pi$ ， $R_p=0.05\text{dB}$ ；阻带截止频率为 $\omega_s=0.45\pi$ ， $A_s=50\text{dB}$ 。

2. 选择合适的窗函数设计 FIR 数字低通滤波器，要求： $\omega_p=0.24\pi$ ， $R_p=0.1\text{dB}$ ； $\omega_s=0.3\pi$ ， $A_s=60\text{dB}$ 。描绘该滤波器的脉冲响应、窗函数及滤波器的幅频响应曲线和相频响应曲线。

此时由设计指标可以得到窗函数应该选择布莱克曼窗，最终仿真结果如下图 2 所示：

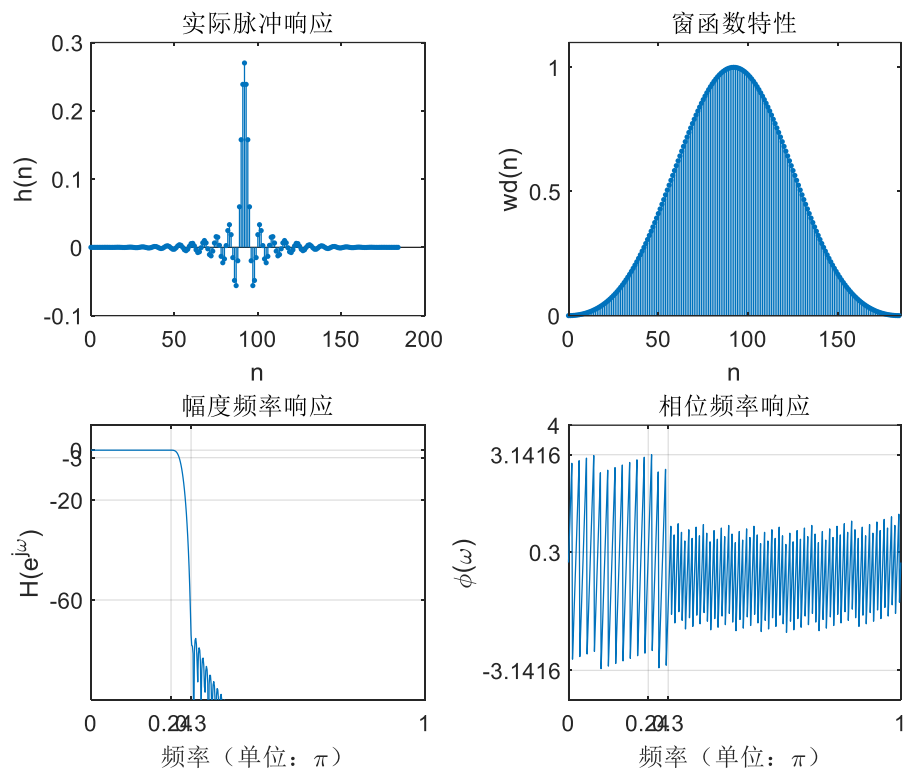


图 2 问题 2 FIR 滤波器设计仿真图

此时，满足设计要求：通带截止频率为 $\omega_p=0.24\pi$ ， $R_p=0.1\text{dB}$ ；阻带截止频率为 $\omega_s=0.3\pi$ ， $A_s=60\text{dB}$ 。

3. 调用信号产生函数 `xtg` 产生具有加性噪声的信号 $x(t)$ ，并显示信号及其频谱。

通过调用对应的函数加性噪声 `xtg`，最终得到仿真结果如下图 3 所示。

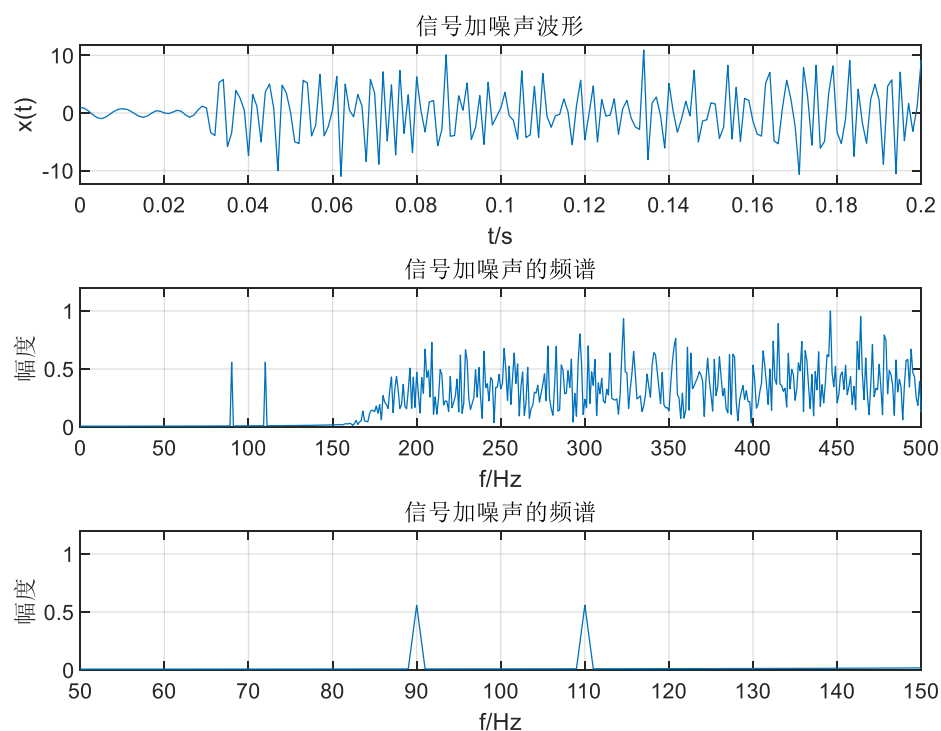


图 3 频域采样定理仿真验证图

由上图 3 可以发现加性噪声的频率主要集中在低频部分，最终的信号也可以看出原有的有用信号主要集中在高频部分，加性噪声集中在低频部分展示出冲击的特性。

4. 采用实验内容步骤 2 中设计的 FIR 数字低通滤波器，调用 Matlab 快速卷积函数 `fftfilt` 实现对 $x(t)$ 的滤波，从高频噪声中提取 $x(t)$ 中的单频调幅信号。绘图显示滤波器的频率响应特性曲线、滤波器输出信号的幅频特性图和时域波形图。

利用问题 2 中的低通滤波器与实际的信号进行滤波，由于低通滤波器的特性，从理论分析将结果最终应滤波出噪声信号，此时对其进行仿真，结果如下图 4 所示。

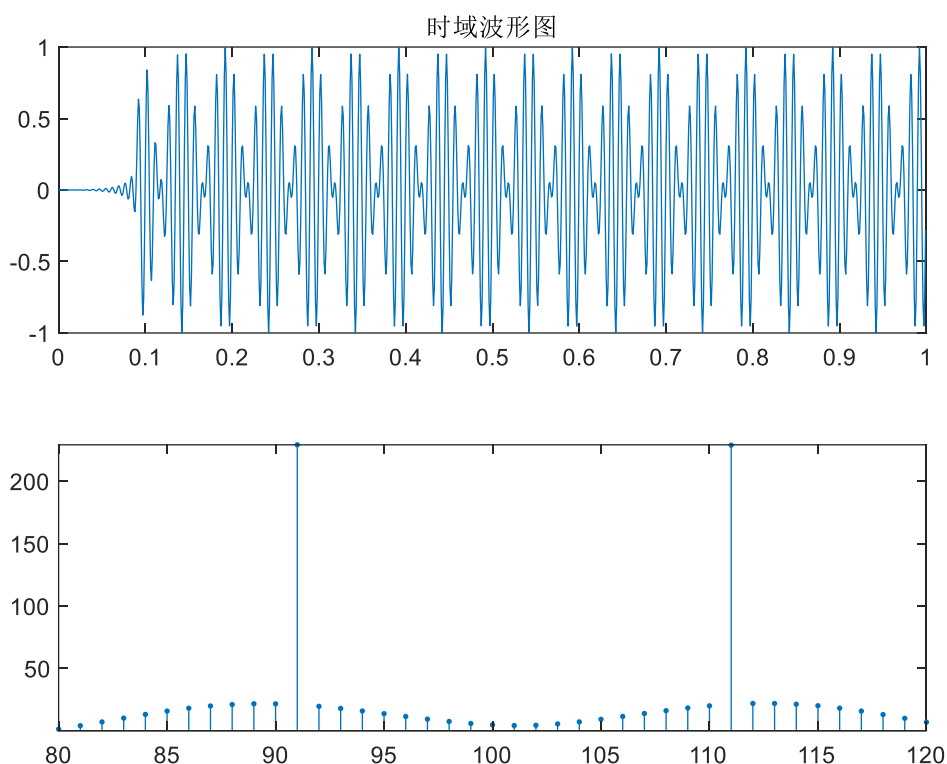


图 4 加噪信号滤波结果图

由上图 4 中的滤波结果可以很明显看出滤波后主要集中在低频段的冲激类似项，即最终滤波结果是将噪声的特性得到，方便研究噪声特性。

此时，满足设计要求：通带截止频率为 $\omega_p = 0.24\pi$ ， $R_p = 0.1\text{dB}$ ；阻带截止频率为 $\omega_s = 0.3\pi$ ， $A_s = 60\text{dB}$ 。

5、**选做题：**读取音频信号 `motherland.wav`，得到 x_n ；

- (1) 对 x_n 进行 $I=2$ 的整数倍 0 值内插，得到音频信号 y_{n1} ；
- (2) 设计一个镜像低通滤波器（可在实验内容 2 的代码上进行修改）；
- (3) 对 y_{n1} 进行滤波，得到音频信号 y_{n2} 。

镜像滤波器的系统函数为：

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \frac{\pi}{I} \\ 0, & \frac{\pi}{I} \leq |\omega| \leq \pi \end{cases}$$

由于此时 $I=2$ ，所以此时的镜像低通滤波器系统函数为：

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \frac{\pi}{2} \\ 0, & \frac{\pi}{2} \leq |\omega| \leq \pi \end{cases}$$

此时 FIR 数字低通滤波器的指标设置为：通带截止频率为 $\omega_p=0.45\pi$ ， $R_p=0.1\text{dB}$ ；阻带截止频率为 $\omega_s=0.55\pi$ ， $A_s=60\text{dB}$ 。此时，应选择布莱克曼窗，具体滤波器仿真结果如下图 5 所示。

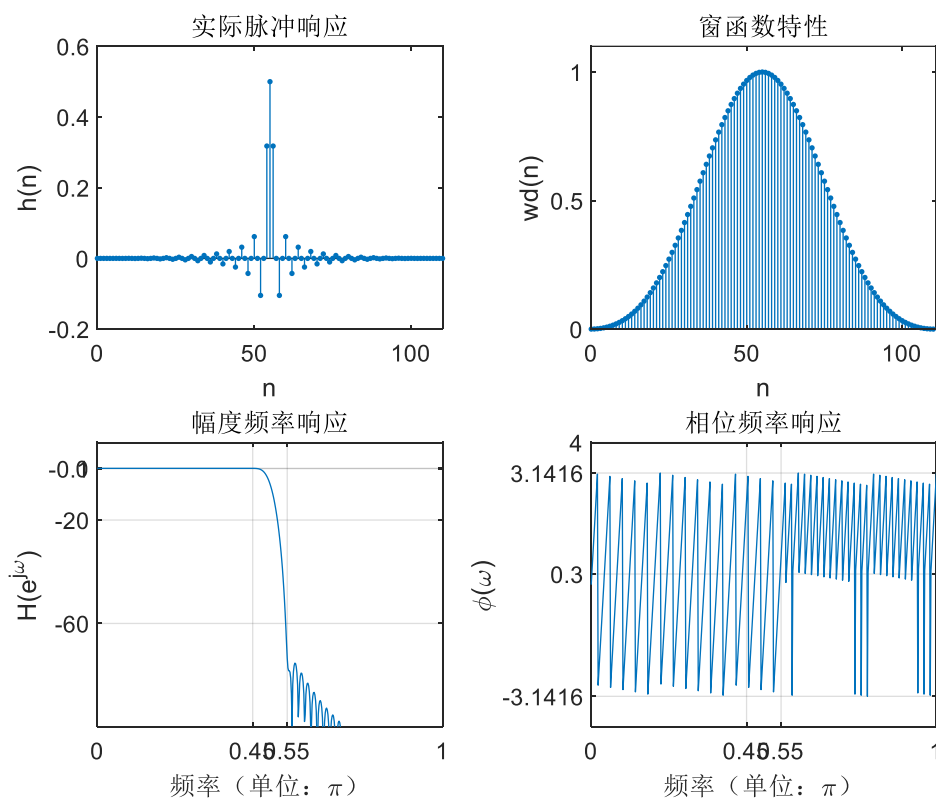


图 5 镜像低通滤波器仿真结果图

此时，满足设计要求：通带截止频率为 $\omega_p=0.45\pi$ ， $R_p=0.1\text{dB}$ ；阻带截止频率为 $\omega_s=0.55\pi$ ， $A_s=60\text{dB}$ 。所以利用该镜像低通滤波器对音频信号进行滤波，最终滤波效果的频谱仿真如下图 6 所示。

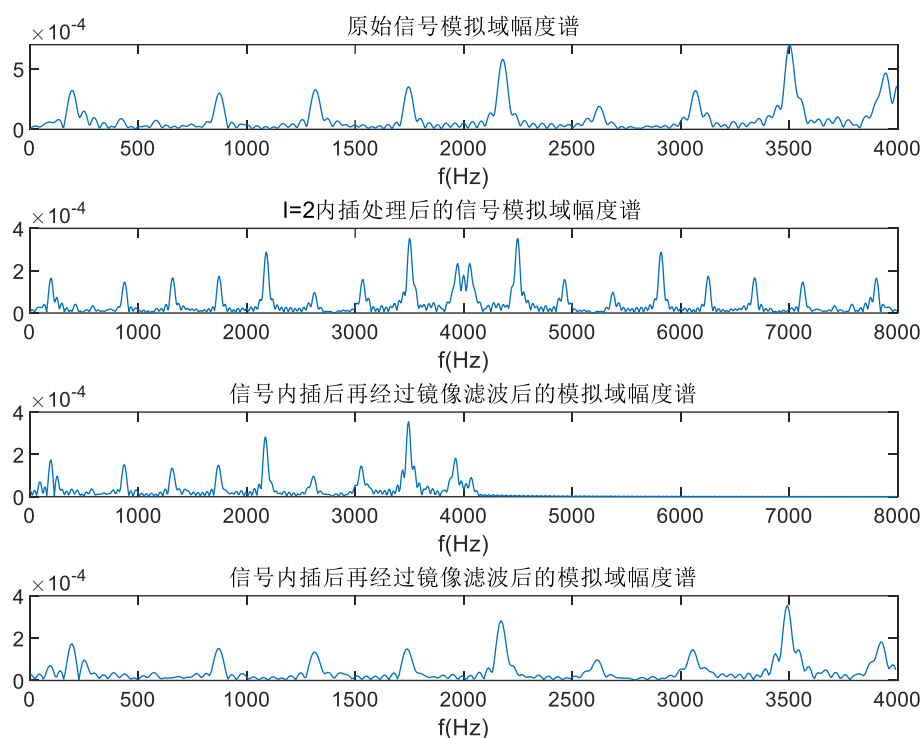


图 6 镜像低通滤波器滤波仿真结果图

最终通过图 6 中的内容可以发现通过镜像滤波器后，音频信号的频谱很好地恢复为原模拟信号，从音频信号的播放中，可以发现音频信号能够很好的清楚播放：“一条大河”。

五、思考题

根据下面指标要求设计四种不同类型的 FIR 线性相位数字滤波器，要求画出 $h(n)$ ，幅频特性曲线、幅频衰减特性曲线，相频特性曲线，标注相关信息，包括横坐标，纵坐标的单位，曲线名称。

(1) 设计数字低通滤波器，指标为：通带截止频率 $\omega_p = 0.2\pi$ ，阻带截止频率 $\omega_s = 0.3\pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 1\text{dB}$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 24\text{dB}$ 。

此时由设计指标可以得到窗函数应该选择三角窗，最终仿真结果如下图 7 所示：

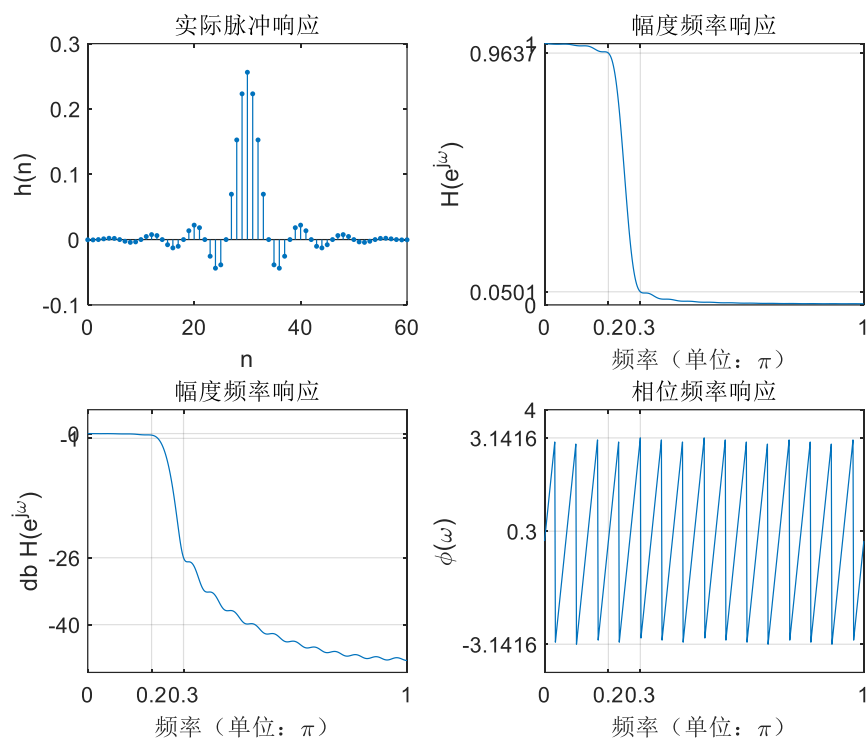


图 7 FIR 数字低通滤波器仿真结果图

此时，由上图 7 结果可以发现，满足设计要求：通带截止频率 $\omega_p = 0.2\pi$ ，阻带截止频率 $\omega_s = 0.3\pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 1\text{dB}$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 24\text{dB}$ 。

(2) 设计数字高通滤波器，指标为：阻带截止频率 $\omega_s = 0.4\pi$ ，通带截止频率 $\omega_p = 0.6\pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 0.2\text{dB}$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 43\text{dB}$ 。

此时由设计指标可以得到窗函数应该选择汉宁窗，最终仿真结果如下图 7 所示：

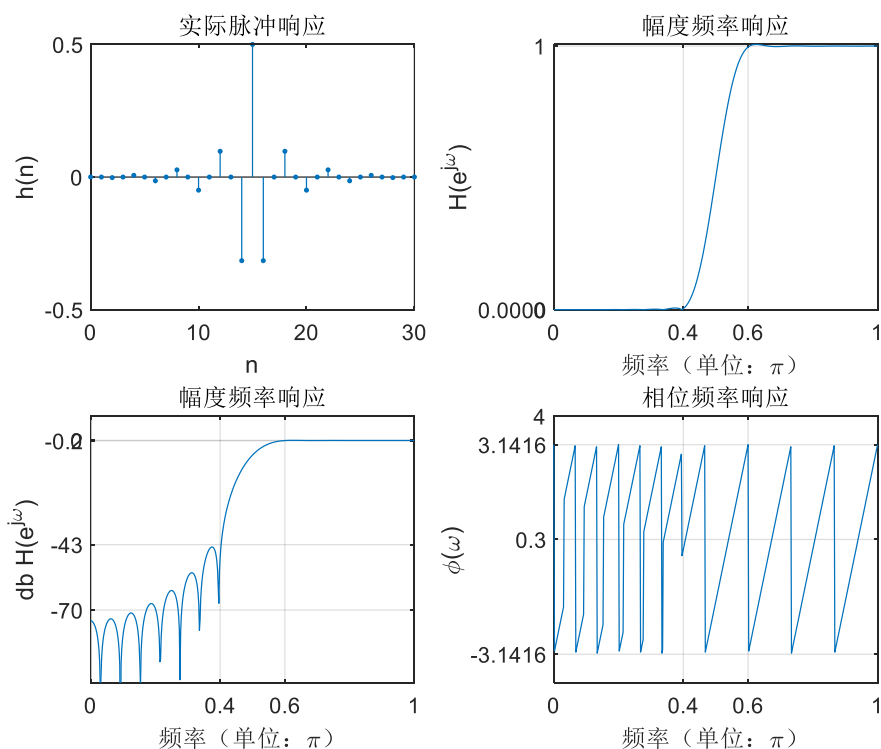


图 8 FIR 数字高通滤波器仿真结果图

此时,由上图 8 结果可以发现,满足设计要求:阻带截止频率 $\omega_s = 0.4\pi$,通带截止频率 $\omega_p = 0.6\pi$,通带衰减 $\alpha_p = 0.2\text{dB}$, 阻带衰减 $\alpha_s = 43\text{dB}$ 。

(3) 设计数字带通滤波器, 指标为: 通带范围 $0.2\pi \leq \omega \leq 0.6\pi$, 阻带范围 $0 \leq \omega \leq 0.15\pi$ 和 $0.65\pi \leq \omega \leq \pi$, 通带衰减 $\alpha_p = 1\text{dB}$, 阻带衰减 $\alpha_s = 50\text{dB}$ 。

此时由设计指标可以得到窗函数应该选择汉明窗, 最终仿真结果如下图 9 所示:

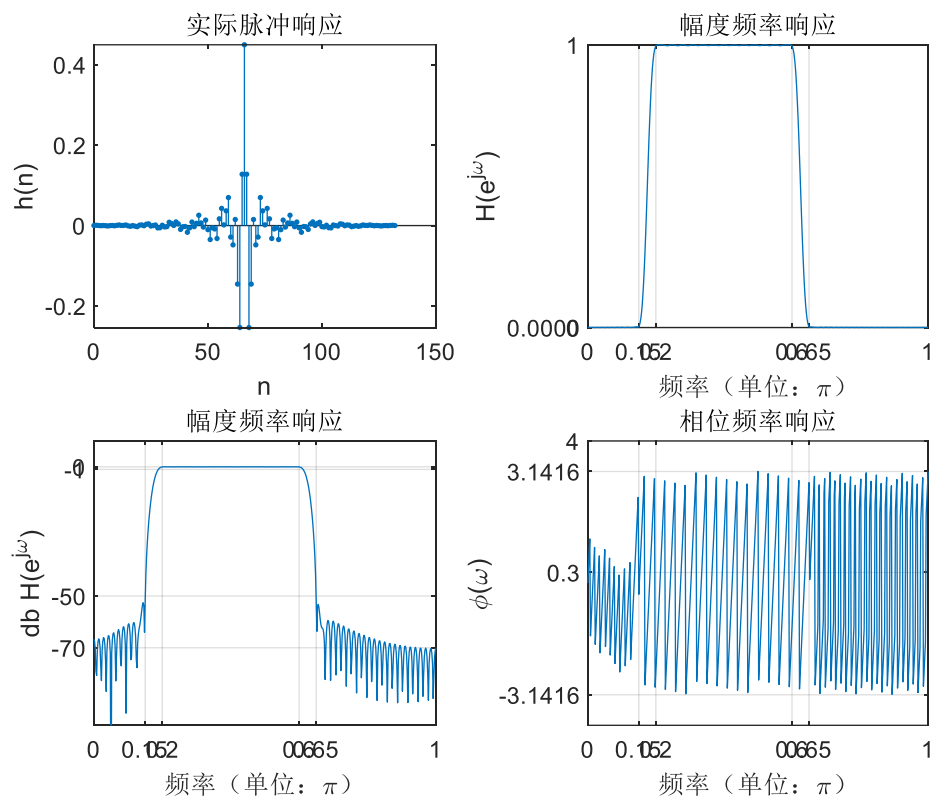


图 9 FIR 数字带通滤波器仿真结果图

此时,由上图 9 结果可以发现,满足设计要求: 通带范围 $0.2\pi \leq \omega \leq 0.6\pi$, 阻带范围 $0 \leq \omega \leq 0.15\pi$ 和 $0.65\pi \leq \omega \leq \pi$, 通带衰减 $\alpha_p = 1\text{dB}$, 阻带衰减 $\alpha_s = 50\text{dB}$ 。

(4) 设计数字带阻滤波器, 指标为: 阻带范围 $0.2\pi \leq \omega \leq 0.6\pi$, 通带范围 $0 \leq \omega \leq 0.15\pi$ 和 $0.65\pi \leq \omega \leq \pi$, 通带衰减 $\alpha_p = 1\text{dB}$, 阻带衰减 $\alpha_s = 45\text{dB}$ 。

此时由设计指标可以得到窗函数应该选择汉宁窗, 最终仿真结果如下图 10 所示:

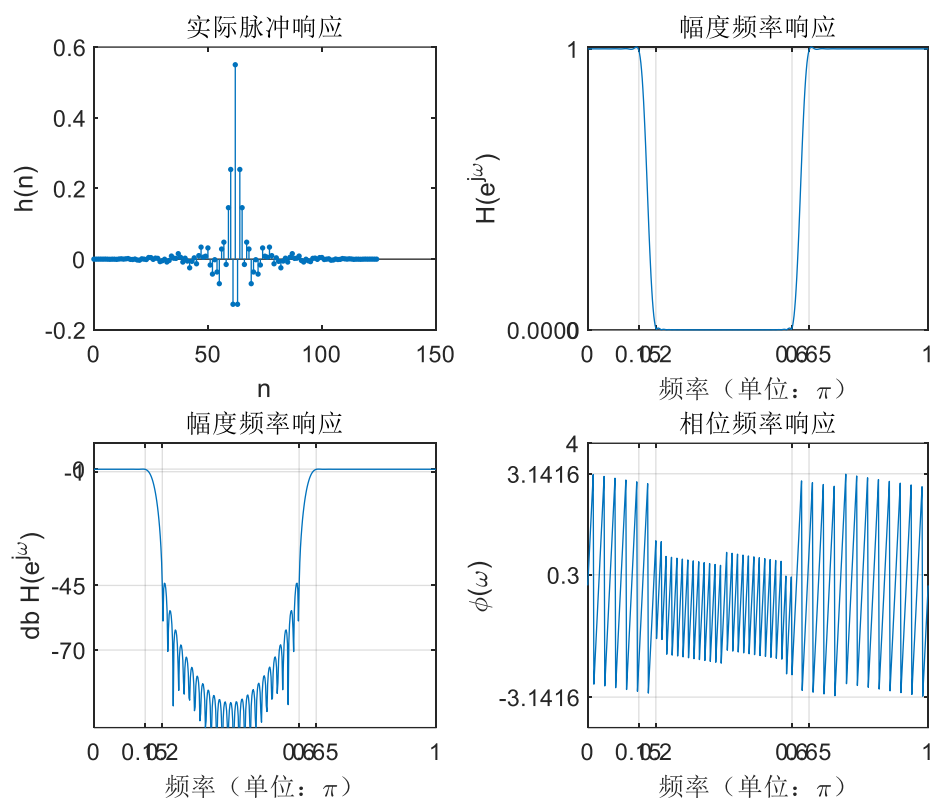


图 10 FIR 数字带阻滤波器仿真结果图

此时，由上图 10 结果可以发现，满足设计要求：阻带范围 $0.2\pi \leq \omega \leq 0.6\pi$ ，通带范围 $0 \leq \omega \leq 0.15\pi$ 和 $0.65\pi \leq \omega \leq \pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 1\text{dB}$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 45\text{dB}$ 。