

《数字信号处理》

实 验 指 导 书

中国石油大学（华东）海空学院

2021 年 4 月

前 言

《数字信号处理实验》是通信工程专业学生的必修课。本指导书的主旨是利用 MATLAB 强大的图形显示功能帮助学生进一步领会和深化有关数字信号处理的基本概念、基本原理以及基本的信号处理操作及滤波器设计方法。利用数字信号处理在通信领域中的实际应用，熟悉计算机进行数字信号处理的方法。

设置的具体实验项目有 4 个，全部实验为设计性实验。实验一序列的傅里叶变换和离散傅里叶变换及其关系：序列 DTFT 和 DFT 的编程实现；利用幅频特性图坐标轴的统一表示出序列 DTFT 和 DFT 的关系。实验二 DFT 的共轭对称性及应用。实验三 FFT 及其在卷积计算和谱分析中的应用：**FFT** 实现序列线性卷积的方法；**FFT** 谱分析的方法及产生误差的应对措施。实验四 IIR 数字滤波器设计及其在 FDM 复用信号滤波中的应用：**IIR** 数字滤波器的间接和直接设计方法；根据频谱图及滤波需求确定 FDM 复用信号滤波器设计的指标参数并完成相应设计。

在更好地理解 and 深刻地把握上述基本理论的基础上，可训练和培养学生利用 MATLAB 进行程序设计及进行理论分析和应用的基本技能，为进一步学习 DSP 技术开发与应用、现代数字信号处理等课程和数字信号处理的实际应用奠定基础。

该指导书适用于学习《数字信号处理》的相关各专业。

编者

2021 年 4 月

目 录

实验一 序列的傅里叶变换和离散傅里叶变换及其关系.....	1
实验二 DFT 共轭对称性和循环卷积定理在 OFDM 系统中的应用	5
实验三 FFT 及其在卷积计算和谱分析中的应用.....	7
实验四 IIR 数字滤波器设计及其在 FDM 复用信号滤波中的应用.....	13

实验一 序列的傅里叶变换和离散傅里叶变换及其关系

一、[实验目的]

- 1.掌握序列傅里叶变换 DTFT 的计算机实现方法;
- 2.掌握序列 DFT 基本理论及其计算机实现方法;
- 3.掌握序列傅里叶变换 DTFT 和序列 DFT 的关系;
- 4.理解 $X(k) = DFT[x(n)]$ 中 k 值与 $x(n)$ 的实际角频率 ω 之间的对应关系。

二、[实验原理]

1. 有限长序列 $x(n)$ 的离散时间傅立叶变换对 (DTFT)

$$X(e^{j\omega_k}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega_k n}$$

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$$

- 2.有限长序列的离散傅里叶变换对 DFT

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

- 3.序列 DTFT 和 DFT 之间的关系

$X(k)$ 可看作是对序列 $x(n)$ 的傅氏变换 $X(e^{j\omega})$ 在 $[0 \sim 2\pi]$ 区间上的 N 点采样, 采样间隔为: $2\pi/N$ 。具体详见教材 P77-P79。

说明 1: 在用 DTFT 分析序列的频谱和绘制幅频图时, 应给出 $|X(e^{j\omega_k})| \sim \omega_k$ 的关系曲线。为了在计算机上观察分析各种序列的连续幅频特性, 通常对 $X(e^{j\omega})$ 在 $0 \sim 2\pi$ 的整周期上进行 M 点采样来观察分析连续频谱。为了能给出 2π 整周期的图形, 并和 DFT 给出的频谱图做比较, 一般将 ω_k 取为:

$$\omega_k = \frac{2\pi}{M}k, k=0,1,2,3,\dots,M-1 \text{ 或 } \omega_k = \frac{4\pi}{M}k, k=0,1,2,3,\dots,M-1 \text{ 等}$$

通常 M 应取得大一些（如 $M=1000$ ），以便观察连续频谱的细节变化。

说明 2：在用 DFT 分析频谱和绘制幅频特性图时，通常要给出 $|X(k)| \sim k$ 之间的关系图。为便于读取 DFT 幅频图中 k 值代表的频率值 ω ，最好将频谱图中 $X(k)$ 的自变量 k 换算成对应的频率并作为横坐标，即 k 代表的频率为：

$$\omega_k = \frac{2\pi}{N}k, k=0,1,2,3,\dots,N-1。$$

进一步，为便于读取频率值，最好关于 π 归一化，即以 ω/π 作为横坐标。

三、[实验内容]

1.编程实现 DTFT。函数格式如下：

```
function [Xejw]=dtft(xn,w);
% Discrete Time Fourier Transform
% xn 为待分析的序列
% w 为观察的频域向量
```

2.编程实现 DFT。函数格式如下：

```
function [Xk]=dft(xn, N)
% Discrete Fourier Transform
% xn 为待分析的序列，
% N 为 DFT 点数
% 程序要求 xn 的长度与 N 不等时，需补零延长至 N
```

3.调用上述 dtft 函数计算序列 $x(n)=R_4(n)$ 的 DTFT，给出其 $|X(e^{j\omega_k})| \sim \omega_k$ 幅频特性图，要求频谱分析的范围为 $0 \sim 6\pi$ ，横坐标对 π 进行归一化为 ω/π ，即幅频特性绘制语句为：plot(w/pi,abs(Xejw));

给出实验结论 1：有限长序列的频谱有何特性？

4.已知序列 $x(n)=R_4(n)$ ，序列 $x_1(n)$ 是将序列 $x(n)=R_4(n)$ 补零至 $N=32$ 后形成新的序列。按要求完成以下实验内容：

(1) 分别计算序列 $x(n)$ 和 $x_1(n)$ 的在频率区间 $[0 \sim 2\pi]$ 范围上的 $X(e^{j\omega})$ 和

$X_1(e^{j\omega})$ ，并给出幅度谱的比较图，要求横坐标统一为 ω/π 。

给出实验结论 2：原序列及其补零后序列的 DTFT 是否相同？

(2) 计算序列 $x(n)$ 的 4 点和 32 点 DFT，并给出 $X(e^{j\omega})$ 在 $[0 \sim 2\pi]$ 范围上的幅度谱与 $X(k)$ 幅度谱 $X_4(k)$ 、 $X_{32}(k)$ 之间的关系图，要求横坐标统一为 ω/π 。

给出实验结论 3：序列补零的方法能否减少栅栏效应？能否提高频率分辨率？

四、[思考题]

1. $x(n)$ 的 N 点 DFT $X(k)$ 中，序号 k 代表的实际角频率 ω_k 是多少？

五、[实验报告要求]

- 1、简述实验目的及实验原理；
- 2、给出每一实验内容的源程序，要求显示的图形坐标要标识清楚；
- 3、给出各实验结论；
- 4、回答思考题。

附 1：常用的 MATLAB 命令

(1) 绘图及注释命令

stem(x,y): 离散序列图的绘制

plot(x,y): x 轴和 y 轴均为线性刻度 (linear scale)

subplot(x,y): 同时画出数个图形在同一视窗中

xlabel('\omega/\pi'); % 希腊字母的标注

set(gca,'xtick',[0 0.5 1 1.5 2]); % 指定 x 轴的显示刻度值

`axis([xmin ,xmax,ymin,ymax])`:调整图轴的范围

(2) 数值运算函数

`real(x)`:求复数 x 的实数部分

`imag(x)`:求复数 x 的虚数部分

`abs (x)`: 求复数 x 的模

`angle(x)`:求复数 x 的相位

`conv(x,y)`:求 x 和 y 的卷积，注意下标是从 1 开始

`fliplr(x)`:信号反折

实验二 DFT 的共轭对称性及应用

一、[实验目的]

- 1.掌握实序列的 DFT 共轭对称性的特点，
- 2.学习应用实序列 DFT 的共轭对称性构建频域序列以保证时域序列为实数的方法；

二、[实验原理]

1.DFT 的共轭对称性

$$\begin{aligned}x_r(n) &\Leftrightarrow X_{ep}(k) \\jx_i(n) &\Leftrightarrow X_{op}(k) \\x_{ep}(n) &\Leftrightarrow \operatorname{Re}[X(k)] = X_R(k) \\x_{op}(n) &\Leftrightarrow j\operatorname{Im}[X(k)] = X_I(k)\end{aligned}$$

其中：

$$\begin{aligned}X_{ep}(k) &= \frac{1}{2}[X(k) + X^*(N-k)] \\X_{op}(k) &= \frac{1}{2j}[X(k) - X^*(N-k)]\end{aligned}$$

2.有限长实序列的 DFT 的共轭对称性

设 $x(n)$ 为长度为 N 的有限长实序列，则 $X(k) = \text{DFT}[x(n)]$ 是圆周共轭对称序列： $X(k) = X^*(N-k)$ 。此对称性又可表示为： $X(N-k) = X^*(k)$ 。

三、[实验内容]

1.试利用 DFT 的共轭对称性，设计两种高效算法，使得计算一个 N 点 DFT 来得到两个实序列的 N 点 DFT。设：

$$x_1(n) = \cos \frac{\pi}{4} n \quad x_2(n) = \sin \frac{\pi}{8} n$$

(1)算法一：令 $x(n) = x_1(n) + x_2(n)$ ，计算其 16 点离散傅里叶变换（提示：取 $N=16$ ）

时, $x_1(n) = x_1(N-n)$, $x_2(n) = -x_2(N-n)$ 。

$$X(k) = DFT[x(n)]$$

由 $X(k)$ 分别求出 $DFT[x_1(n)] = X_1(k)$ 和 $DFT[x_2(n)] = X_2(k)$, 并通过对 $X_1(k)$ 和 $X_2(k)$ 求 IDFT 的方法验证得出的结果是否正确。

给出实验结论 1-1: $X_1(k)$ 、 $X_2(k)$ 与 $X(k)$ 的关系?

(2) 算法二: 令 $x(n) = x_1(n) + jx_2(n)$, 重复 (1)。

给出实验结论 1-2: $X_1(k)$ 、 $X_2(k)$ 与 $X(k)$ 有何关系?

2. 有限长实序列的 DFT 的共轭对称性

由有限长实序列的 DFT 的共轭对称性可知, 频域成共轭对称的序列作 IDFT 后为实序列, 而实数的发送可以大大简化发送设备。OFDM 正是利用这一特性来保证发往信道的序列为实数序列的。

按要求编程完成以下内容:

设 XK_in 为一频域复数序列, $XK_in = [1+j, -3-j, -3+3*j, -1-3*j]$;

试利用实序列的 DFT 的共轭对称性公式 $X(N-k) = X^*(k)$, 将频域序列 XK_in 扩展成共轭对称形式 Xk , 以保证其对应的时域序列 $xn = \text{ifft}(Xk, 16)$ 为实数序列。

(1) 求频域序列 Xk ; 并给出 Xk 的实部与虚部图;

实验结论 2-1: 说明 Xk 的实部与虚部各有何特点;

(2) 求 $xn = \text{ifft}(Xk, 16)$;

实验结论 2-2: 说明 xn 是否为实数序列, 可以用 xn 的实部与虚部图来说明。

四、[思考题]

1. 对序列 $x(n)$, 如何通过计算 $N/2$ 点 DFT 而得到 N 点 DFT?

五、[实验报告要求]

1. 简述实验目的及实验原理;
2. 给出每一实验内容的源程序, 要求显示的图形坐标要标识清楚;
3. 给出各实验结果及结论并回答思考题。

实验三 FFT 及其在卷积计算和谱分析中的应用

一、[实验目的]

1. 在理论学习的基础上,通过本实验,加深对 FFT 的理解,熟悉 FFT 子程序;
2. 熟练掌握 FFT 实现两个序列的线性卷积的方法;
3. 熟悉应用 FFT 进行信号频谱分析过程中可能出现的问题以便在实际中正确应用 FFT;
4. 学习用 FFT 对连续信号进行谱分析的方法和参数选择原则;
5. 掌握用 FFT 对连续信号进行谱分析时,由模拟信号采样得到序列的 $X(k)=DFT[x(n)]$ 中 k 值与模拟信号实际频率 f 或 Ω 的对应关系。

二、[实验原理]

FFT 并不是与 DFT 不同的另一种变换,而是为了减少 DFT 运算次数的一种 DFT 快速算法。常用的 FFT 是基 2 算法,其长度 $N=2^M$ 。当要变换的序列长度不等于 2 的整数次幂时,为了使用以 2 为基数的 FFT,可以用末位补零的方法,使其长度延长至 2 的整数次幂。其应用一般都以卷积运算的具体计算为依据,或者以 DFT 作为连续傅里叶变换的近似为基础。

1. 用 FFT 计算线性卷积

用 FFT 可以实现两个序列的循环卷积,其原理框图如图 3-1。一般情况,设两个序列的长度分别为 N_1 和 N_2 ,循环卷积等于线性卷积的充要条件是 FFT 的长度 N 满足: $N \geq N_1 + N_2$,对于长度不足 N 的两个序列,分别将他们补零延长到 N 。

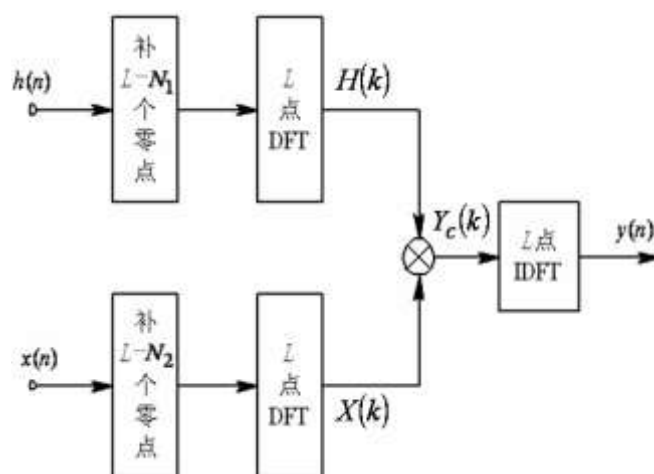


图 3-1 用 FFT 计算循环卷积的原理框图

2. 用 FFT 对信号进行频谱分析

MATLAB 提供了快速傅里叶变换算法 FFT 计算 DFT 的函数 `fft`，其调用格式如下：

$$X_k = \text{fft}(x_n, N) \text{ 或 } X_k = \text{fft}(x_n)$$

参数 x_n 为被变换的时域序列向量， N 是 DFT 变换区间长度，当 N 大于 x_n 的长度时，`fft` 函数自动在 x_n 后面补零。当 N 省略时，`fft` 函数按 x_n 的实际长度计算，此时，相当于 DFT 的计算。

在运用 DFT 进行频谱分析的过程中可能产生三种误差：混叠、泄漏、栅栏效应，具体概念详见教材。其中需要注意的是减少栅栏效应（提高频谱密度）与提高 DFT 频率分辨率是不同的两个概念，减小栅栏效应的一个有效方法就是借助于在原序列的末端补零。补零只能减轻栅栏效应，不能提高 DFT 的频率分辨率。

3. 模拟信号的频谱分析

（1）模拟信号的采样及 DFT 谱分析的原理

对模拟周期信号进行谱分析时，首先要按照采样定理将其变成时域离散信号。用 DFT 分析模拟信号谱的原理如图 3-2 所示。

序列 $x(n)$ 的傅里叶变换和连续信号频谱的关系可以表示为：

$$\tilde{X}'_a(kF) = T_s X(k) = T_s \text{DFT}[x(n)]_N \quad 0 \leq k \leq N-1$$

上式说明：可以通过对连续信号采样并进行 DFT 再乘以 T_s ，近似得到模拟信号频谱的周期延拓函数在第一个周期 $[0, F_s]$ 上的 N 点等间隔采样

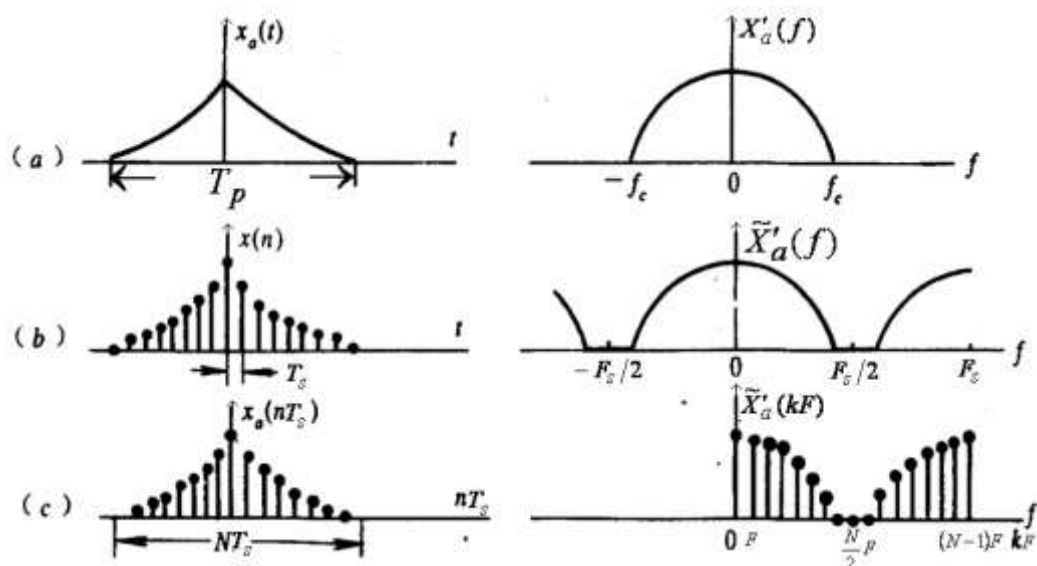


图 3-2 用 DFT 分析模拟信号谱的原理示意图

(2) 模拟信号进行谱分析时的参数选择问题

对模拟信号进行谱分析时，有几个重要的参数要选择：

采样频率 F_s 、频率分辨率 F 、DFT 的长度 N 、模拟信号的截取时长 $T_p = N \cdot T_s$ 。

要提高谱分辨率，又保持谱分析的范围不变（ F_s 采样频率不变），只能增长记录时间 T_p （截取长度），增加采样点数 N 。

(3) 周期信号谱分析时对截取长度 T_p 的要求

对模拟周期信号用 DFT（FFT）作谱分析，要求有两点：一是截取的长度 T_p 是周期的整数倍；二是采样频率满足采样定理，且满足每个周期中采样点数相等。这样得到的离散谱才能代表离散信号的频谱。否则会有相当大的谱分析误差。如果不知道信号周期，可以尽量选择信号的观察时间长一些。

三、[实验内容]

1. 已知序列 $x(n) = \left\{ \frac{1}{2}, 1, 1, \frac{1}{2} \right\}$ ，利用 FFT 计算线性卷积 $x(n) * x(n)$ ，并画出相应的图形。

2. 对如下模拟周期信号用 FFT 进行谱分析

$$x(t) = \cos 8\pi t + \cos 16\pi t + \cos 20\pi t$$

选择 $F_s = 64\text{Hz}$ ，对变换区间 $N=16, 32, 64$ 三种情况进行谱分析，并回答相应的问题。

- (1) 用 stem 绘制三种情况下的幅频特性曲线 $f_k \sim X(k)$ ，图中要求显示三种情况的频谱分辨率 F 各是多少 Hz。

问题 3-1: 检查 $N=16, 32, 64$ 三种情况下谱峰的出现位置，说明哪个是正确的，哪个是不正确的？为什么？

问题 3-2: 观察幅频谱图，根据分辨率 F 读出信号 $x(n)$ 含有的频率分量分别是多少 Hz？

- (2) 用 plot 绘制三种情况的功率谱曲线 $f_k \sim X(k)$ 。

幅频谱: $|X(k)| = \text{abs}(Xk)$

功率谱: $\text{PSD}(k) = |X(k)|^2 / N = X(k)X^*(k) / N$

Matlab 语句: $\text{PSD} = Xk.*\text{conj}(Xk)/N$;

问题 3-3: 注意观察频谱的形状和谱峰出现位置，检查有无混叠和泄漏现象？说明产生现象的原因。

- (3) 为减少泄露，提高频谱分辨率，另取 N 值，观察谱分辨率、频谱泄露的改善情况。

说明，在绘制幅频特性曲线时需注意以下两点：

注意 1:

用 DFT (FFT) 对模拟信号分析频谱时，需将 $X(k)$ 的自变量 k 换算成对应的模拟频率 f_k 并作为横坐标绘图，以便于观察频谱。这样，不管变换区间 N 或 T_p 取信号周期的几倍，画出的频谱图中有效离散谐波谱线所在的频率值不变。

如图 3-2 所示，

$$f_k = kF = \frac{k}{NT_s} = \frac{k}{T_p}, k = 0, 1, \dots, N-1$$

注意 2:

对于由截取得到的序列 $x(n)$ ，其长度为 N 时，它的 DFT 定义为：

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}, W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$$

可见随着截取长度导致的 N 值的增大，所计算出来的同一模拟信号的幅频特性幅度值会随着变换区间 N 的变化而变化。为避免幅度值随变换区间 N 变化的缺点，实际上在分析频谱时最好给出对最大值归一化的幅度值。如：
`stem(fk,abs(Xk)/max(abs(Xk)))`。

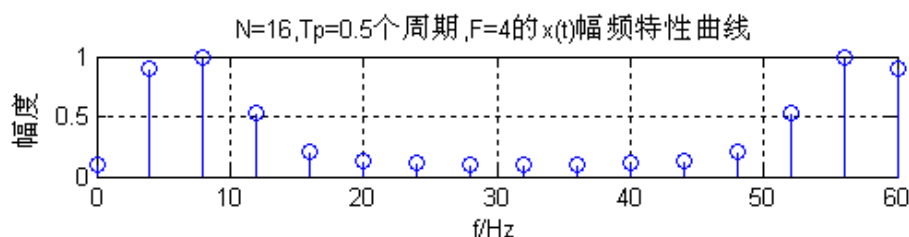
四、[思考题]

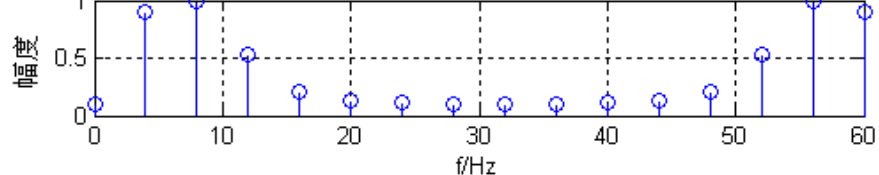
1. 已知模拟信号 $x(t) = \cos(2\pi ft)$ ，其中 $f = 50\text{Hz}$ ，用 DFT (FFT) 对此模拟信号分析频谱时，若采样间隔为 T_s ，采样后的序列 $x(n)$ 的长度为 N ， $X(k) = \text{DFT}[x(n)]$ ，则 $k=1$ 对应的连续频率 f_k 为多少？
2. 对于周期序列，如果周期信号的周期预先不知道，如何使用 FFT 进行谱分析？

五、[实验报告要求]

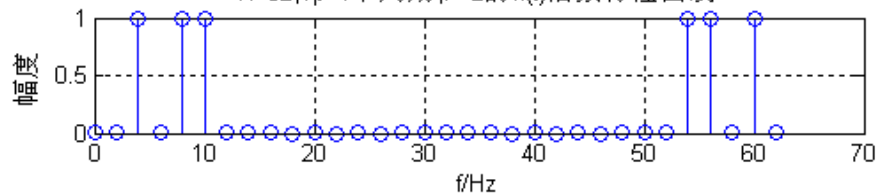
1. 简述实验目的及实验原理；
2. 编写程序并注释；
3. 按要求绘出实验波形，显示的图形坐标要标识清楚；
4. 按要求回答问题和思考题。

附：模拟周期信号谱分析结果示意图

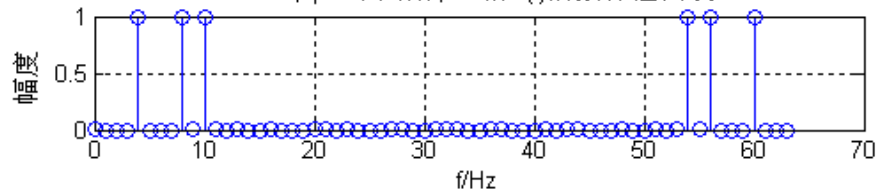




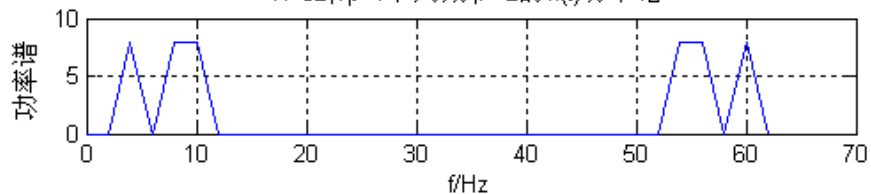
N=32, $T_p=1$ 个周期, $F=2$ 的 $x(t)$ 幅频特性曲线



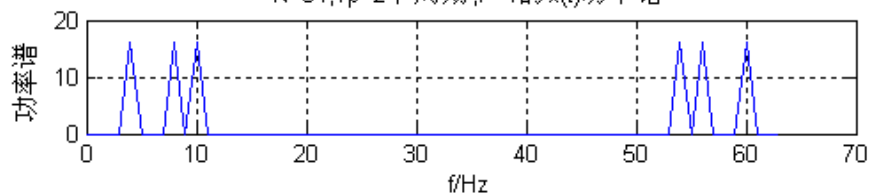
N=64, $T_p=2$ 个周期, $F=1$ 的 $x(t)$ 幅频特性曲线



N=32, $T_p=1$ 个周期, $F=2$ 的 $x(t)$ 功率谱



N=64, $T_p=2$ 个周期, $F=1$ 的 $x(t)$ 功率谱



实验四 IIR 数字滤波器设计及在 FDM 复用信号滤波中的应用

一、[实验目的]

1. 熟悉用双线性变换法设计 IIR 数字滤波器的原理与方法；
2. 掌握根据频谱图及滤波需求确定滤波器的指标参数的方法；
3. 通过 FDM 复用信号数字滤波器的设计，掌握 IIR 数字滤波器的 MATLAB 实现方法；
4. 通过观察 FDM 复用信号滤波前后的时域及其频谱图，建立数字滤波的感性认识。

二、[实验原理]

IIR 数字滤波器的设计一般采用间接法：脉冲响应不变法和双线性变换法，应用最广泛的是双线性变换法，其基本过程是：

- (1) 先将给定的数字滤波器的指标转换成过渡模拟滤波器的指标；
- (2) 设计过渡模拟滤波器；
- (3) 将过渡模拟滤波器的系统函数转换成数字滤波器的系统函数。

MATLAB信号处理工具箱中的各种IIR数字滤波器设计函数都是采用双线性变换法。教材第6章介绍的滤波器设计函数butter、cheby1、cheby2和ellip可以分别被调用来设计巴特沃斯、切比雪夫1、切比雪夫2以及椭圆模拟和数字滤波器。

说明：

(1) 实验可调用如上函数直接来设计IIR数字滤波器，即根据数字滤波器指标设计相应的DF。

(2) 实验的数字滤波器的MATLAB实现是指调用MATLAB信号处理工具箱函数filter对给定的输入信号 $x(n)$ 进行滤波，得到滤波后的输出信号 $y(n)$ 。

三、[实验内容及步骤]

1. 试利用双线性变换法，设计 Butterworth 低通数字滤波器，假设信号 $x(t) = \sin(2\pi f_1 t) + 0.5 \cos(2\pi f_2 t)$ ，其中 $f_1 = 5\text{Hz}$ ， $f_2 = 30\text{Hz}$ 。要求通带波纹小于 1dB，幅度衰减大于 15dB，采样周期 $T=0.01\text{s}$ 。

用间接设计方法设计数字低通 DF 的步骤:

(1) 产生时域信号 x_t

要求给出 x_t 的时域波形图。

(2) 信号 x_t 的频谱分析

确定采样频率和采样点数 $N=64$; $F_s=64$; 对 x_t 信号进行采样得到序列 x_{tnT} 。

要求给出 x_t 的频谱图。

$k=0:N-1$;

$w_k=2\pi/N*k$; %k 对应的数字频率

$\text{stem}(w_k/\pi, \text{abs}(X_k)/\max(\text{abs}(X_k)))$; %为避免幅度值随变换区间 N 变化的缺点, 画图时可归一化幅度谱。

问题 1-1: 观察 x_t 的频谱图, 给出信号 x_t 的频率分量对应的数字频率。

提示: 通带截止频率大致为 $\omega_p = 0.2\pi$, 通带截止频率大致为 $\omega_s = 0.3\pi$ 。

(3) 根据读出的数字滤波器的截止频率及已知的通带波纹、阻带衰减, 利用双线性变换法的频率转换形式得到模拟滤波器的频率。

问题 1-2: 给出数字边界频率的双线性转换关系。

(4) IIR 数字滤波器的设计及实现

1) 本实验采用 Butterworth 模拟滤波器设计来完成相应低通滤波器的设计, 具体可调用 `buttord`、`butter` 函数完成 DF 设计。

2) 滤波实现

可调用滤波器实现函数 `filter` 来完成此功能。

要求 1: 绘图显示低通滤波器的损耗函数曲线;

要求 2: 显示滤波后的时域波形图, 观察滤波效果。

2. IIR 滤波器设计在 FDM 频分多路复用信号滤波分离过程中的应用

用数字频率直接设计数字低通 DF 的步骤:

(1) 产生三路调幅信号构成的 FDM 时域复用信号 s_t

已知调制信号形式为 $f_m = \cos(2\pi f t)$, 试分别用频率为 30Hz、60Hz、120Hz 的三路信号去调制频率为 300Hz、600Hz、1200Hz 的余弦载波信号, 实现三路抑制载波调幅信号, 并由三路调幅信号构成 FDM 复用信号 s_t 。

要求给出 s_t 的时域波形图。

(2) FDM 复用信号 s_t 的频谱分析

要求给出 st 幅频特性曲线。

取 $N=2048$; $F_s=4096$; 对 st 信号进行采样得到序列 $stnT$ 。

问题 1: 观察 st 的频谱图, 分别给出三路调幅信号的数字频率范围。

(3) 确定数字滤波器设计指标

根据题目 2 中读出的三路调幅信号的频率范围, 分别确定可以分离 st 中三路调幅信号的三个滤波器(低通、带通、高通)的通带截止频率和阻带截止频率, 并要求滤波器的通带最大衰减为 0.1dB , 阻带最小衰减为 60dB 。

说明: 为了使滤波器阶数尽可能低, 每个滤波器边界频率的选择原则是尽量使滤波器过渡带宽一些。

问题 2: 根据上述原则, 分别给出三个数字滤波器的设计指标 $\omega_p, \omega_s, \alpha_p, \alpha_s$

(4) IIR 数字滤波器的设计及实现

1) 本实验选用椭圆滤波器完成相应滤波器的设计, 具体可利用数字频率指标调用 `ellipord` 和 `ellip` 函数完成 DF 设计。

2) 滤波实现

用三个滤波器分别对信号 st 进行滤波, 分离出 st 中的三路不同载波频率的调幅信号 $y1(n)$ 、 $y2(n)$ 、 $y3(n)$ 。可调用滤波器实现函数 `filter` 来完成此功能。

要求 1: 绘图显示各滤波器的损耗函数曲线;

要求 2: 显示 $y1(n)$ 、 $y2(n)$ 和 $y3(n)$ 的时域波形图, 观察分离效果。

四、[思考题]

1. 如何设计采样点数 N , 对 st 进行 N 点 FFT 可以得到 6 根理想谱线。改变采样点数 N 的值, 观察频谱图, 验证你的设计是否正确。

2. 实验中为何选用椭圆滤波器完成数字滤波器的设计?

五、[实验报告要求]

1. 简述实验目的及实验原理;
2. 编写程序并注释;
3. 按要求绘出实验波形, 显示的图形坐标要标识清楚;
4. 按要求回答问题和思考题。

附：MATLAB 函数说明

1. 由模拟滤波器设计数字滤波器的函数

`[N,wc]=buttord(Wp,Ws,Rp,Rs,'s');` % 模拟滤波器阶数 N 和 3dB 截止频率 wc

`[B,A]=butter(N,wc,'s');` % 模拟滤波器系统函数 $H_a(s)$ 系数的确定

`[Bz,Az]=impinvar(B,A,Fs);`

% 用脉冲响应不变法将 $H_a(s)$ 转换成数字滤波器 $H(z)$

`[Bz,Az]=bilinear(B,A,Fs);` % 用双线性变换法设计转换成数字滤波器

2. 根据数字技术指标 $\omega_p, \omega_s, \alpha_p, \alpha_s$ ，调用函数 `ellipord` 和 `ellip` 直接设计数字滤波器：

(1) `[N,wp]=ellipord(wp/pi,ws/pi,rp,rs);`

% 函数功能 1：直接利用数字频率指标设计 IIR 椭圆数字滤波器

% 函数功能 2：计算椭圆 DF 数字滤波器阶数 N 和通带截止频率 wp

% 函数要求 1：直接调用函数设计数字滤波器的相关函数，均要求数字频率

% wp, ws 对 π 进行归一化；

% 函数要求 2：带通 DF 设计时，要求 $wp/\pi, ws/\pi$ 分别由通带的两个指标

$[wpl, wpu]$ 和阻带的两个指标 $[wsl, wsu]$ 构成列长为 2 的向量。

(2) `[Bz,Az]=ellip(N,rp,rs,wp);`

% 低通和带通 DF 滤波器系统函数 $H(z)$ 系数的确定

% 根据 N, ω_p 确定数字滤波器 $H(z)$ 分子/分母多项式的系数向量 B 和 A

(3) `[Bz,Az]=ellip(N,rp,rs,wp,'high');`

% 高通 DF 滤波器系统函数 $H(z)$ 系数的确定

3. IIR 滤波作用的实现

`y=filter(Bz,Az,x)`

% Bz, Az --- $H(z)$ 分子/分母系数； x --- 输入序列 $x(n)$ ； y --- 滤波结果 $y(n)$ 。

4. 求 DF 频响特性及 DF 滤波器的幅频特性-损耗函数绘制的语句：

`[H,w]=freqz(Bz,Az,N)` % Bz, Az --- $H(z)$ 分子/分母系数； N --- 频率点数；

% H --- 滤波器的频响特性 $H(w)$ ； % w --- 数字频率轴 w 。

`plot(w/pi, 20*log10(abs(H)/max(abs(H))))` % DF 损耗函数的绘制。