

高等学校教材

数字信号处理 实 验

殷 林 殷勤业 贾玉兰 编



西安交通大学出版社

高等学校教材

数字信号处理实验

殷 林 殷勤业 贾玉兰 编

西安交通大学出版社

数字信号处理实验

殷 林 殷勤业 贾玉兰 编

责任编辑 刘宏珊

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安 7226 印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 7.25 字数: 149 千字

1989年2月第1版 1989年4月第1次印刷

印数: 1—3000

ISBN7-5605-0227-X/TN·9 定价: 1.45元

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会电路与系统编审小组组织征稿,推荐出版,责任编委皇甫堪副教授。

本教材由西安交通大学信息与控制工程系殷林、殷勤业和贾玉兰同志合作编写,国防科技大学皇甫堪副教授担任主审。

本教材的总参考学时数为50学时(课内外学时数比为1:2),若分别开设“数字信号处理(上)”和“数字信号处理(下)”,则学时数分别为30学时和20学时。

本书所配合的教材主要是邹理和教授编著的《数字信号处理(上)》和吴兆熊教授等编著的《数字信号处理(下)》(国防工业出版社)。同本课程教材一样,本书也分上、下两部分,第一部分是针对大学本科生而开设的,共十二个实验(实验一~十二)。这些实验包括信号与系统的时域和频域特性分析、IIR和FIR数字滤波器的各种结构实现方法、IIR和FIR数字滤波器的基本设计方法、快速傅里叶变换及其应用、各种结构滤波器的有限字长效应以及单板机实现FIR滤波器等内容。本书第二部分是针对电类各专业硕士研究生而开设的,主要涉及随机信号和二维信号处理,共十个实验(实验十三~二十二),这些实验包括 $(0, 1)$ 均匀分布和 $N(0, 1)$ 高斯分布白噪声的产生与统计检验方法、维纳

滤波、卡尔曼滤波、自适应滤波、预测反卷积、传统和现代谱估计方法、复时谱的计算和同态反卷积、二维数字滤波器设计以及TMS32010实现自适应陷波器等内容。

本教材的内容以自学为主，教师只需就一些重点和疑难问题作少量讲解。为方便实验者，在附录中提供了大量的实验用子程序，使实验者一般只需编制主程序和一二个子程序，便可完成实验。我们希望实验者在上机以前，仔细阅读实验指导书（包括实验报告要求部分），根据给出的程序框图编写好程序，这样学生一般仅需要4~6个机时就可以完成全部实验内容。

对于这二十二个实验，并不要求全做。在编写过程中，我们尽量使每个实验具有相对独立性，教师可根据教学要求和实验条件决定取舍，或者将实验分为必做和选做两部分，个别实验也可作为示教实验。当然，教师也可根据教学要求适当补充一些实验内容。

本教材由殷勤业编写实验一、四~九、十二、二十一，贾玉兰编写实验二、三、十、十一，殷林编写实验十三~二十、二十二，并由殷林统编全稿。在本教材编写过程中，自始至终得到邹理和教授的关怀、指导和鼓励，并提出了许多宝贵意见，本书主审皇甫堪副教授也提出了许多中肯和有益的修改意见，西安交通大学信息处理研究室提供了良好的实验条件。在此，表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1988年6月

内 容 简 介

本书为电子工业部统编教材，分两部分，第一部分十二个实验主要讨论确定性数字信号处理，涉及到信号与系统的时、频域特性分析、各种数字滤波器的结构实现和设计方法、快速傅里叶变换及应用、单板机实现模拟信号的实时处理以及有限字长效应等。第二部分十个实验主要讨论随机信号和二维信号处理，涉及到随机信号的产生和检验、维纳、卡尔曼和自适应滤波、现代谱估计、同态滤波、TMS32010芯片的应用以及二维数字滤波器的设计等。另外，附录中提供了大量实验用子程序和五种通用绘图子程序。

本教材主要作为大专院校无线电类的电子技术与信息、信号与系统本科生和研究生的教材或教学参考书，同时也适合于工程技术人员自学。

目 录

实验一	信号、系统及系统响应·····	(1)
实验二	IIR 滤波器三种结构的实现·····	(12)
实验三	FIR 滤波器两种结构的实现·····	(23)
实验四	用脉冲响应不变法设计 IIR 滤波器·····	(30)
实验五	用双线性变换法设计 IIR 滤波器·····	(42)
实验六	用窗函数设计 FIR 滤波器·····	(51)
实验七	用频率采样法设计 FIR 滤波器·····	(60)
实验八	应用快速傅里叶变换对信号进行频谱 分析·····	(68)
实验九	用 FFT 实现数字滤波器·····	(77)
实验十	零输入极限环振荡的计算机仿真·····	(86)
实验十一	定点实现 IIR 滤波器有限字长效应 的计算机仿真·····	(92)
实验十二	用单板机实现 FIR 滤波器·····	(102)
实验十三	离散随机信号的产生与统计特性分析·····	(112)
实验十四	维纳滤波器的计算机实现·····	(120)
实验十五	卡尔曼过滤信号提取方法·····	(128)
实验十六	自适应信号滤波·····	(133)
实验十七	随机信号的线性预测反卷积·····	(140)
实验十八	随机信号的线性谱估计方法·····	(146)
实验十九	非线性谱估计方法·····	(154)
实验二十	同态滤波技术·····	(162)

实验二十一 用变换法设计二维FIR滤波器.....	(169)
实验二十二 用TMS32010实现自适应陷波器.....	(183)
附录.....	(191)
参考文献.....	(218)

实验一 信号、系统及系统响应

一、实验目的

1. 熟悉理想采样的性质，了解信号采样前后的频谱变化，加深对采样定理的理解。
2. 熟悉离散信号和系统的时域特性。
3. 掌握线性卷积的计算编程方法：利用卷积的方法，观察、分析系统响应的时域特性。
4. 掌握序列傅氏变换的计算机实现方法，利用序列的傅氏变换对离散信号、系统及系统响应进行频域分析。

二、实验原理与方法

采样是从连续时间信号到离散时间信号的过渡桥梁，对采样过程的研究不仅可以了解采样前后信号时域和频域特性发生的变化以及信号内容不丢失的条件，而且有助于加深对拉氏变换、傅氏变化、 z 变换和序列傅氏变换之间关系的理解。

对一个连续时间信号 $x_a(t)$ 进行理想采样的过程可以表示为该信号和一个周期冲激脉冲 $M(t)$ 的乘积，即

$$\hat{x}_a(t) = x_a(t)M(t) \quad (1-1)$$

其中 $\hat{x}_a(t)$ 是连续信号 $x_a(t)$ 的理想采样， $M(t)$ 是周期冲激脉冲

$$M(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t-nT) \quad (1-2)$$

它也可以用傅氏级数表示为

$$M(t) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{jm\Omega_s t} \quad (1-3)$$

这里 T 为采样周期, $\Omega_s = 2\pi/T$ 是采样角频率。若以 $X_a(s)$ 表示连续时间信号 $x_a(t)$ 的双边拉氏变换, 即

$$X_a(s) = \mathcal{L}[x_a(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x_a(t) e^{-st} dt$$

信号理想采样的拉氏变换则为

$$\begin{aligned} \hat{X}_a(s) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{x}_a(t) e^{-st} dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x_a(t) \cdot \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{jm\Omega_s t} e^{-st} dt \\ &= \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_a(t) e^{-(s-jm\Omega_s)t} dt \\ &= \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X_a(s-jm\Omega_s) \end{aligned} \quad (1-4)$$

作为拉氏变换的一种特例, 信号理想采样的傅氏变换

$$\hat{X}_a(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X_a[j(\Omega-m\Omega_s)] \quad (1-5)$$

式(1-4)和式(1-5)表明, 信号理想采样后的频谱是原信号频谱的周期延拓, 其延拓周期等于采样频率。图1.1给出了原信号频谱和其采样后频谱之间的关系。显然如果原信号是带限信号, 且采样频率高于原信号最高频率分量的2倍, 则采样后不会发生频谱的混淆。反之, 将会发生如图

1.2 所示的频谱混淆现象。我们将在实验中观察这一现象。

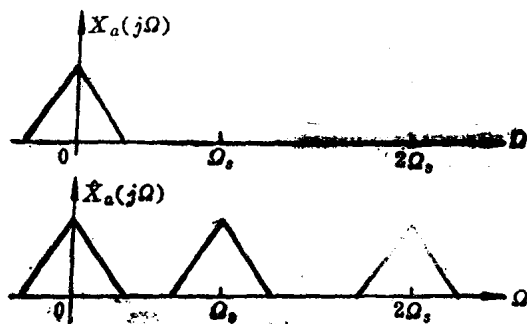


图 1.1 频谱的周期延拓

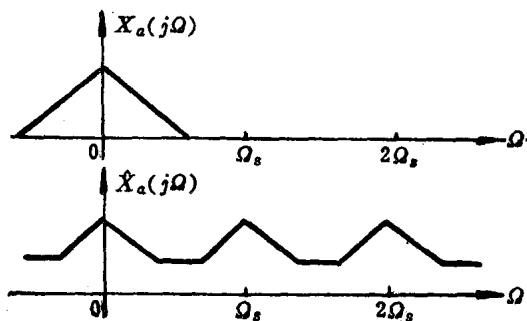


图 1.2 频谱的混淆

在计算机上直接按式 (1-5) 用高级语言编程计算理想采样 $\hat{x}_a(t)$ 的频谱 $\hat{X}_a(j\Omega)$ 很不方便 (请读者想想, 这是为什么?). 我们可以利用序列的傅氏变换来实现频谱 $\hat{X}_a(j\Omega)$ 的计算。将式 (1-2) 代入式 (1-4), 并将积分号与求和号对调, 得

$$\hat{X}_a(s) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_a(t) \delta(t - nT) e^{-st} dt$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_a(nT) e^{-nsT} \quad (1-6)$$

这里的 $x_a(nT)$ 就是采样后的离散序列 $x(n)$ ，即

$$x(n) = x_a(nT)$$

而序列 $x(n)$ 的 z 变换为

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) z^{-n} \quad (1-7)$$

以 $e^{j\omega}$ 代替上式中的 z ，又可以得到序列的傅氏变换

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j\omega n} \quad (1-8)$$

比较式 (1-6) 和式 (1-8)，我们不难看出： $\hat{X}_o(j\Omega) = X(e^{j\omega})|_{\omega=\Omega T}$ 。这说明两者之间只在频率度量上差一个常数因子（采样周期 T ）。在实验中应该注意这一差别。

离散信号和系统均可以用序列来表示。序列图形给人以形象、直观的印象，它可以加深我们对信号和系统的时域特性的理解。本实验还将观察、分析几种信号及系统的时域特性。

为了了解和分析各种序列，我们不但要观察它们的时域图形，还要分析它们的频域特性。对序列的频谱分析，可以通过式 (1-8) 的序列傅氏变换来完成。一般来说，在数字计算机上不可能，也不必要得到 $X(e^{j\omega})$ 的连续曲线。通常我们只要观察、分析 $X(e^{j\omega})$ 在某些频率点上的值就可以了。对于长度为 N 的有限长序列进行频谱分析，一般只需在 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀地取 M 个频率点 $\{\omega_k\}$ ， $k=0, 1, \dots, M-1$ ，计算这些点上的序列傅氏变换

$$X(e^{j\omega_k}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega_k n} \quad (1-9)$$

其中 $\omega_k = 2\pi k/M$, $k=0, 1, \dots, M-1$ 。通常 M 值可以选取大一些, 以便观察频谱的细节变化。 $X(e^{j\omega_k})$ 是 ω_k 的复函数, 对它取模 $|X(e^{j\omega_k})|$, 可以绘出它的幅频特性曲线。

一个线性时不变离散系统的响应 $y(n)$, 可以用它的单位脉冲响应 $h(n)$ 与输入信号 $x(n)$ 的卷积来表示

$$\begin{aligned} y(n) &= x(n) * h(n) \\ &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x(m)h(n-m) \end{aligned} \quad (1-10)$$

这里的序列可以是有限长, 也可以是无限长。但为了在计算机上绘图、观察方便, 这里主要讨论有限长。如果 $h(n)$ 和 $x(n)$ 均为有限长序列, 长度分别为 N 和 M , 则响应序列 $y(n)$ 也为有限长序列, 其长度为 $L=N+M-1$ 。这样, 式 (1-10) 中的卷积运算可以“形象”地描述为两个有限长序列的移位、相乘、累加过程。这使计算机的编程十分简便。

根据 z 变换的性质, 两个序列的卷积与它们在频域的乘积相对应, 即, 如果

$$y(n) = x(n) * h(n)$$

$$\text{则} \quad Y(z) = X(z)H(z)$$

这一性质对序列傅氏变换也同样成立

$$Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega})H(e^{j\omega}) \quad (1-11)$$

所以, 卷积运算也可以在频域用乘积实现。式 (1-11) 右边的相乘是各频率点 $\{\omega_k\}$ 上的频谱值相乘。

三、实验内容及步骤

1. 在实验编程前, 认真复习采样、离散信号与系统、线性卷积, z 变换、序列的傅氏变换及其性质等有关内容, 阅读本实验原理与方法和实验用子程序简介。

2. 编制实验用主程序及相应子程序

① 信号产生子程序, 用于产生实验中要用到的信号序列。这些信号序列包括:

a. 理想采样信号序列。对

$$x_a(t) = A e^{-\alpha t} \sin \Omega_0 t U(t)$$

进行理想采样, 可以得到一个理想采样信号序列

$$x_a(n) = A e^{-\alpha n T} \sin (\Omega_0 n T)$$

$$0 \leq n < 50$$

其中 A 为幅度因子, α 是衰减因子, Ω_0 是频率, T 为采样周期。这些参量都要在实验过程中由键盘读入, 以产生 $x_a(n)$ 。

b. 单位脉冲序列

$$x_b(n) = \delta(n) = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}$$

c. 矩形序列

$$x_c(n) = R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

其中 $N=10$

② 系统单位脉冲响应序列产生子程序。本实验要用到两种FIR系统。

$$a. h_a(n) = R_{10}(n)$$

$$b. h_b(n) = \delta(n) + 2.5\delta(n-1) + 2.5\delta(n-2) + \delta(n-3)$$

以上三种不同的信号和二种不同的系统可用条件语句在程序中选择产生。

③ 有限长序列线性卷积子程序，用于完成两个给定长度的序列卷积。输出序列长度为 $L = N + M - 1$ 。

通用绘图子程序和序列的傅氏变换数值计算子程序在实验用子程序简介中已有介绍，供实验者调用。

在完成编制上述子程序的基础上，编制本实验主程序。在主程序中多次调用上述子程序，以实现信号、系统和系统响应的时域和频域分析。图1.3绘出程序流程框图，供实验者参考。

3. 上机实验内容

在调通上述各程序的基础上，运行实验程序，完成下述实验内容：

① 分析理想采样信号序列的特性。产生理想采样信号序列 $x_a(n)$ ，使 $A = 444.128$ ， $\alpha = 50\sqrt{2}\pi$ ， $\Omega_0 = 50\sqrt{2}\pi$ 。图1.4给出了模拟信号 $x_a(t)$ 的幅频特性曲线 $|X_a(j\Omega)|$ 。从此图上我们可以确定对该信号应采用的采样频率，首先我们选用采样频率为1000Hz， $T = \frac{1}{1000}$ 。观察所得理想采样的幅频特性 $|X(e^{j\omega})|$ 和图1.4的 $|X_a(j\Omega)|$ ，在折迭频率以内有无明显差异。请注意：实验中所得的频谱是用序列的

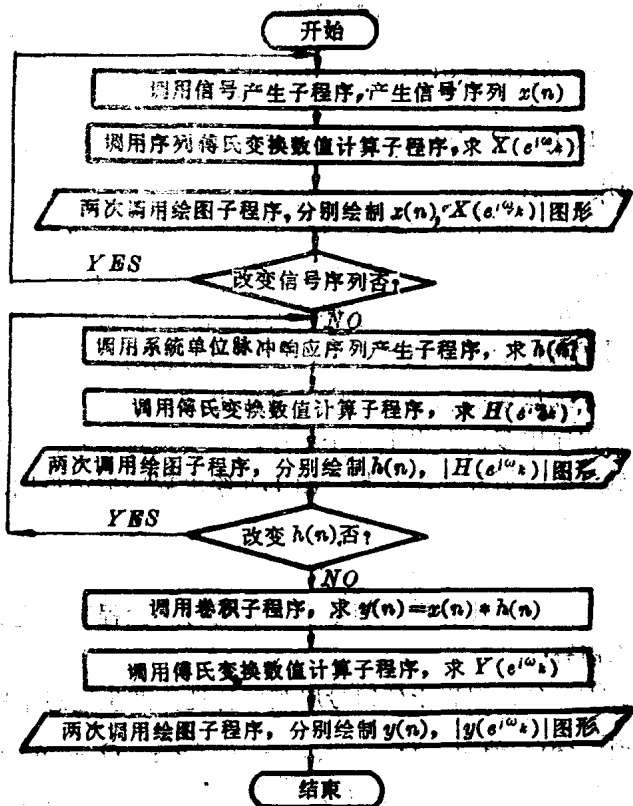


图 1.3

傅氏变换公式 (1-4) 求得, 在频率度量上和 $x_a(nT)$ 的傅氏变换差一个常数因子, $\omega = \Omega T$, ω 为数字角频率, Ω 为模拟角频率, T 为采样周期。

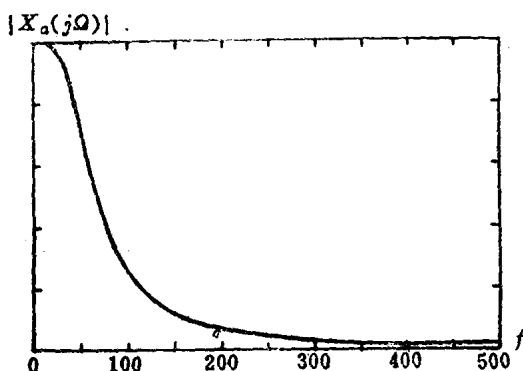


图 1.4 信号 $x_a(t)$ 的幅频特性曲线

改变采样频率, 使 $f_s = 300\text{Hz}$, $T = \frac{1}{300}$, 观察所得幅频特性 $|X(e^{j\omega})|$ 的变化, 并做记录; 进一步减小采样频率, 使 $f_s = 200\text{Hz}$, $T = \frac{1}{200}$, 观察频谱“混淆”现象是否明显存在, 说明原因, 并记录这时的幅频特性曲线。

② 离散信号、系统和系统响应的分析。

a. 观察信号 $x_b(n)$ 和系统 $h_b(n)$ 的时域和幅频特性; 利用线性卷积求信号通过系统的响应。比较系统响应和系统 $h_b(n)$ 的时域及幅频特性。注意它们之间有无差异, 绘出图形。

b. 观察信号 $x_c(n)$ 和系统 $h_a(n)$ 的时域及幅频特性。利用线性卷积求系统响应。判断响应序列图形及序列非零值长度是否与理论结果一致, 说出一种定性判断响应序列图形正确与否的方法 (提示: $x_c(n) = h_a(n) = R_{10}(n)$)。利用序列的傅氏变换数值计算子程序求得 $Y(e^{j\omega})$, 并观察响应序列