



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 数字信号处理 实践教程

孙闽红 岳恒立 唐向宏 编著



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 数字信号处理 实践教程

Shuzi Xinhao Chuli Shijian Jiaocheng

孙闾红 岳恒立 唐向宏 编著



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书是由唐向宏等编著、高等教育出版社出版的《数字信号处理——原理、实现与仿真》(第2版)的配套实验教材。本书根据课程内容和学生们普遍反映的重点、难点问题,配合主教材各章的教学内容,编写了12个实验。其中9个实验为基础实验,主要内容包括:MATLAB入门与常用数字信号的产生与运算、离散序列的卷积运算与抽样定理的验证、采用 $z$ 变换分析信号与系统的频域特性、有限长序列的离散傅里叶变换、FFT及其应用、IIR数字滤波器的设计、FIR数字滤波器的设计、有限字长效应、多抽样率信号处理基础。同时,结合具体应用,设计了3个综合性实验,主要内容包括:带噪语音信号分析与处理、FFT在信号频分复用中的应用、多抽样率FDMA系统设计。

本书可作为高等院校电子信息类各专业以及相近专业本科生的数字信号处理课程实验指导书,也可供有关科研人员和工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理实践教程/孙闽红,岳恒立,唐向宏  
编著. -- 北京:高等教育出版社,2013.9  
ISBN 978-7-04-038196-2

I. ①数… II. ①孙… ②岳… ③唐… III. ①数字信号处理-高等学校-教材 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第174271号

|      |     |      |     |      |    |      |     |
|------|-----|------|-----|------|----|------|-----|
| 策划编辑 | 吴陈滨 | 责任编辑 | 吴陈滨 | 封面设计 | 赵阳 | 版式设计 | 杜微言 |
| 插图绘制 | 尹莉  | 责任校对 | 胡晓琪 | 责任印制 | 田甜 |      |     |

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印 刷 北京嘉实印刷有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 8.5  
字 数 200千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版 次 2013年9月第1版  
印 次 2013年9月第1次印刷  
定 价 14.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 38196-00

## 前言

数字信号处理是各高等院校电子信息类专业的一门非常重要的专业基础课。该课程的理论性和实践性都很强。因此,为了让学生加深理解,在系统学习基本理论与基本概念的同时,还需加强实践练习。实践练习不仅有助于系统地理解和消化基本理论,而且能充分锻炼初学者独立解决问题的能力。本书正是针对这一目的而编写的,可作为高等院校电子信息类各专业以及相近专业本科生的数字信号处理课程实验指导书,也可供有关科研人员和工程技术人员参考。

本书是由唐向宏等编著、高等教育出版社出版的《数字信号处理——原理、实现与仿真》(第2版)的配套实验教材,可以补充和完善理论教学,帮助学生深入理解所学的基本概念与基本理论,提高学生的实践应用能力。本书的特色主要体现在:一是强化与实际应用的结合,配合理论教程的教学内容,本书在每一章的实验中都新增加了与理论知识紧密结合的具体应用实例,以促进学生对所知识的理解与消化;二是针对现有大多数同类实验教材中没有涉及有限长长效应和多抽样率信号处理的实验教学,新增加了这两部分的实验指导内容,使本书与理论教材之间紧密结合、相互对应,让学生对数字信号处理的实际应用有更深入的理解;三是新增加了综合实验设计,结合具体应用背景,让学生综合应用所学的理论和方法,设计和实现数字信号处理系统的特定功能,锻炼和提高学生综合应用知识解决实际问题的能力。

本书采用的编程语言为 MATLAB,它是一种用于科学计算且功能很强的高级程序设计语言,广泛用于高性能可视化数值计算。MATLAB 语言的基本语法、句型类似 C 语言,如果学习过 C 语言,就可以很快掌握它的使用方法。通过本书的实践学习,可让学生逐步学会利用 MATLAB 语言编写一些简易的程序,最终达到能够掌握利用 MATLAB 来解决较为复杂的一些实际数字信号处理问题的目的。

本书在实验的编排上采取由验证性实验逐步过渡到综合性实验的方法,从简单到复杂,循序渐进,逐步深入。通过前期的验证性实验,提高学生兴趣,并逐步熟悉与掌握 MATLAB 语言。后期增设的综合性实验,要求学生编写必要的 MATLAB 程序,加深对原理的理解,加强对数字信号处理技术的应用。全书共编写 12 个实验,前 9 个实验为基础实验,后 3 个实验为综合性实验。具体内容安排如下。

**实验 1: MATLAB 入门与常用数字信号的产生与运算。**介绍 MATLAB 的一些基本功能和命令,让学生尽快了解 MATLAB 的使用方法,然后采用 MATLAB 产生数字信号处理中常用的一些信号,并对信号进行简单的运算。

**实验 2: 离散序列的卷积运算与抽样定理的验证。**帮助学生理解离散序列的卷积运算。通过对连续信号的抽样与恢复,加深对抽样定理的理解。

**实验 3: 采用  $z$  变换分析信号与系统的频域特性。**学习采用  $z$  变换分析信号和系统的频域特性的方法,加深对离散系统的频率响应分析和零极点分布概念的理解。

**实验 4: 有限长序列的离散傅里叶变换。**学习采用离散傅里叶变换(DFT)来分析信号的频谱和求解线性时不变系统(LTI)输出的方法,比较圆周卷积与线性卷积的异同,并加深对频域

抽样定理的理解。

实验 5: FFT 及其应用。主要学习快速傅里叶变换算法(FFT)的应用。

实验 6: IIR 数字滤波器的设计。学习无限长单位冲激响应数字滤波器(IIR)设计的相关函数的使用,掌握使用 MATLAB 来设计 IIR 数字滤波器的过程与方法,并通过调整参数,观察对滤波特性的影响,如对滤波器频率响应及零极点分布造成的影响等。

实验 7: FIR 数字滤波器的设计。学习有限长单位冲激响应数字滤波器(FIR)设计的相关函数的使用,掌握使用 MATLAB 来设计 FIR 数字滤波器的过程与方法,并通过调整参数,观察对滤波特性的影响,如对滤波器频率响应及零极点分布造成的影响等。

实验 8: 多抽样率信号处理基础。实现并分析抽取信号与内插信号的时域与频域特性,实现并比较普通抽取和内插滤波器与多相滤波器的性能。

实验 9: 有限字长效应。通过分析量化效应给数字滤波器频率响应及零极点分布所造成的影响,加深对有限字长效应的理解。

实验 10(综合性实验 1): 带噪声语音信号分析与处理。在 Windows 环境下采集一段带噪声的语音信号,对信号抽样,画出抽样后信号的时域波形和频谱图;给定滤波器性能指标,采用窗函数法或双线性变换法设计滤波器,并画出滤波器频率响应;对该语音信号滤波,画出滤波后信号的时域波形和频谱,比较滤波前后信号的变化;回放语音信号。

实验 11(综合性实验 2): FFT 在信号频分复用中的应用。选择 3 个不同频段的信号对其进行频谱分析,根据信号的频谱特征设计 3 个不同的数字滤波器,将 3 路信号合成为 1 路信号,分析合成信号的时域和频域特点,然后将合成信号分别通过设计好的 3 个数字滤波器,分离出原来的 3 路信号,分析得到的 3 路信号的时域波形和频谱,与原始信号进行比较,说明频分复用的特点。

实验 12(综合性实验 3): 多抽样率 FDMA 系统设计。本实验设计基于多抽样率的 FDMA 系统。对 3 路语音信号进行 4 倍的内插和 4 倍的抽取操作,根据需要设计相应的抗镜像滤波器/抗混叠滤波器,对操作后的信号进行时域波形和频谱分析,并与原始信号比较,分析系统性能。

本实验教程所有例程均在 MATLAB 7.1 平台上调试运行通过。

书中实验 1~实验 6 由岳恒立编写,实验 7~实验 12 由孙闽红编写,全书由唐向宏统稿。由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和疏漏,殷切希望广大读者批评指正。编者邮箱为: tangxh@hdu.edu.cn。

编者

2013 年 3 月于杭州电子科技大学

## 目 录

|     |                       |     |                 |
|-----|-----------------------|-----|-----------------|
| 011 | 实验1 MATLAB入门与常用数字     | 011 | 实验5 FFT及其应用     |
| 111 | 信号的产生与运算              | 101 | 一、实验目的          |
| 111 | 一、实验目的                | 101 | 二、实验原理          |
| 111 | 二、实验原理                | 101 | 三、预习与参考         |
| 111 | 三、预习与参考               | 101 | 四、实验内容          |
| 111 | 四、实验内容                | 101 | 五、实验要求          |
| 111 | 五、实验要求                | 101 | 实验6 IIR数字滤波器的设计 |
| 111 | 实验2 离散序列的卷积运算与抽样      | 101 | 一、实验目的          |
| 111 | 定理的验证                 | 101 | 二、实验原理          |
| 111 | 一、实验目的                | 101 | 三、预习与参考         |
| 111 | 二、实验原理                | 101 | 四、实验内容          |
| 111 | 三、预习与参考               | 101 | 五、实验要求          |
| 111 | 四、实验内容                | 101 | 实验7 FIR数字滤波器的设计 |
| 111 | 五、实验要求                | 101 | 一、实验目的          |
| 111 | 实验3 采用 $z$ 变换分析信号与系统的 | 101 | 二、实验原理          |
| 111 | 频域特性                  | 101 | 三、预习与参考         |
| 111 | 一、实验目的                | 101 | 四、实验内容          |
| 111 | 二、实验原理                | 101 | 五、实验要求          |
| 111 | 三、预习与参考               | 101 | 实验8 多抽样率信号处理基础  |
| 111 | 四、实验内容                | 101 | 一、实验目的          |
| 111 | 五、实验要求                | 101 | 二、实验原理          |
| 111 | 实验4 有限长序列的离散傅里叶       | 101 | 三、预习与参考         |
| 111 | 变换                    | 101 | 四、实验内容          |
| 111 | 一、实验目的                | 101 | 五、实验要求          |
| 111 | 二、实验原理                | 101 | 实验9 有限字长效应      |
| 111 | 三、预习与参考               | 101 | 一、实验目的          |
| 111 | 四、实验内容                | 101 | 二、实验原理          |
| 111 | 五、实验要求                | 101 |                 |

|                                    |            |                                   |            |
|------------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| 三、预习与参考 .....                      | 97         | 二、实验原理 .....                      | 110        |
| 四、实验内容 .....                       | 103        | 三、预习与参考 .....                     | 111        |
| 五、实验要求 .....                       | 104        | 四、实验内容 .....                      | 117        |
| <b>实验 10 带噪语音信号分析与处理</b> .....     | <b>105</b> | 五、实验要求 .....                      | 117        |
| 一、实验目的 .....                       | 105        | <b>实验 12 多抽样率 FDMA 系统设计</b> ..... | <b>118</b> |
| 二、实验原理 .....                       | 105        | 一、实验目的 .....                      | 118        |
| 三、预习与参考 .....                      | 106        | 二、实验原理 .....                      | 118        |
| 四、实验内容 .....                       | 108        | 三、预习与参考 .....                     | 119        |
| 五、实验要求 .....                       | 109        | 四、实验内容 .....                      | 128        |
| <b>实验 11 FFT 在信号频分复用中的应用</b> ..... | <b>110</b> | 五、实验要求 .....                      | 128        |
| 一、实验目的 .....                       | 110        | <b>参考文献</b> .....                 | <b>129</b> |
| 二、实验原理 .....                       | 110        |                                   |            |
| 三、预习与参考 .....                      | 110        |                                   |            |
| 四、实验内容 .....                       | 110        |                                   |            |
| 五、实验要求 .....                       | 110        |                                   |            |
| 六、实验结果 .....                       | 110        |                                   |            |
| 七、实验总结 .....                       | 110        |                                   |            |
| 八、实验心得 .....                       | 110        |                                   |            |
| 九、实验报告 .....                       | 110        |                                   |            |
| 十、实验评分 .....                       | 110        |                                   |            |
| 十一、实验备注 .....                      | 110        |                                   |            |
| 十二、实验附录 .....                      | 110        |                                   |            |
| 十三、实验参考文献 .....                    | 110        |                                   |            |
| 十四、实验致谢 .....                      | 110        |                                   |            |
| 十五、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 十六、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 十七、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 十八、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 十九、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 二十、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 二十一、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 二十二、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 二十三、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 二十四、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 二十五、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 二十六、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 二十七、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 二十八、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 二十九、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 三十、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 三十一、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 三十二、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 三十三、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 三十四、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 三十五、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 三十六、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 三十七、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 三十八、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 三十九、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 四十、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 四十一、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 四十二、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 四十三、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 四十四、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 四十五、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 四十六、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 四十七、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 四十八、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 四十九、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 五十、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 五十一、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 五十二、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 五十三、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 五十四、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 五十五、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 五十六、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 五十七、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 五十八、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 五十九、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 六十、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 六十一、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 六十二、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 六十三、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 六十四、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 六十五、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 六十六、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 六十七、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 六十八、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 六十九、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 七十、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 七十一、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 七十二、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 七十三、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 七十四、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 七十五、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 七十六、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 七十七、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 七十八、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 七十九、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 八十、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 八十一、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 八十二、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 八十三、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 八十四、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 八十五、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 八十六、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 八十七、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 八十八、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 八十九、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 九十、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |
| 九十一、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 九十二、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 九十三、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 九十四、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 九十五、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 九十六、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 九十七、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 九十八、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 九十九、实验其他 .....                     | 110        |                                   |            |
| 一百、实验其他 .....                      | 110        |                                   |            |

## 实验 1 MATLAB 入门与常用数字信号的产生与运算

### 一、实验目的

本实验结合教材第 1 章教学内容。掌握 MATLAB 的使用方法,学习 MATLAB 产生数字信号处理中常用信号及对信号进行简单运算的方法。

### 二、实验原理

#### 1. MATLAB 基本操作

MATLAB(Matrix Laboratory,矩阵实验室)是 Math Works 公司于 1984 推出的一套高性能的数值计算和可视化软件。MATLAB 提供了一个人机交互的数学系统环境,该系统的基本数据结构是矩阵,在生成矩阵对象时,不要求明确的维数说明。与利用 C 语言或 FORTRAN 语言作数值计算的程序设计相比,利用 MATLAB 可以节省大量的编程时间,是适合于工程应用各领域的分析、设计和复杂计算的数学软件,易学易用,在工程技术界, MATLAB 已广泛应用于自动控制理论、数理统计、数字信号处理、时间序列分析、动态系统仿真、图像处理等领域。

MATLAB 既是一种语言,又是一个编程环境。作为一个编程环境, MATLAB 提供了很多方便用户管理变量、输入输出数据以及生成和管理 M 文件的工具。下面以 MATLAB 7.1 为例介绍基本操作方法。

MATLAB 7.1 的工作桌面由标题栏、菜单栏、工具栏、命令窗口(Command Window)、工作空间窗口(Workspace)、当前目录窗口(Current Directory)、历史命令窗口(Command History)及状态栏组成,如图 1.1 所示。

MATLAB 的命令窗口是接收用户输入命令及输出数据显示的窗口,几乎所有的 MATLAB 行为都是在命令窗口进行的。当启动 MATLAB 软件时,命令窗口就做好了接收指令和输入的准备,并出现命令提示符“>>”。在命令提示符后输入指令通常会创建一个或多个变量。变量可以是多种类型的,包括函数和字符串,但通常的变量只是数据。这些变量被放置在 MATLAB 的工作空间中,工作空间窗口提供了变量的一些重要信息,包括变量的名称、维数大小、占用内存大小以及数据类型等信息。历史命令窗口是用来显示当前操作之前输入的命令。

此外, MATLAB 操作时有一些值得注意的事项。

(1) 在 MATLAB 命令窗口工作区输入 MATLAB 命令后,还需按下 Enter 键, MATLAB 系统才能执行输入的 MATLAB 命令,否则 MATLAB 不执行命令。一般每输入一个命令并按下 Enter 键,计算机就会显示此次输入的执行结果。如果用户不希望计算机显示此次输入的结果,只要在所输入命令的后面再加上一个分号“;”即可。

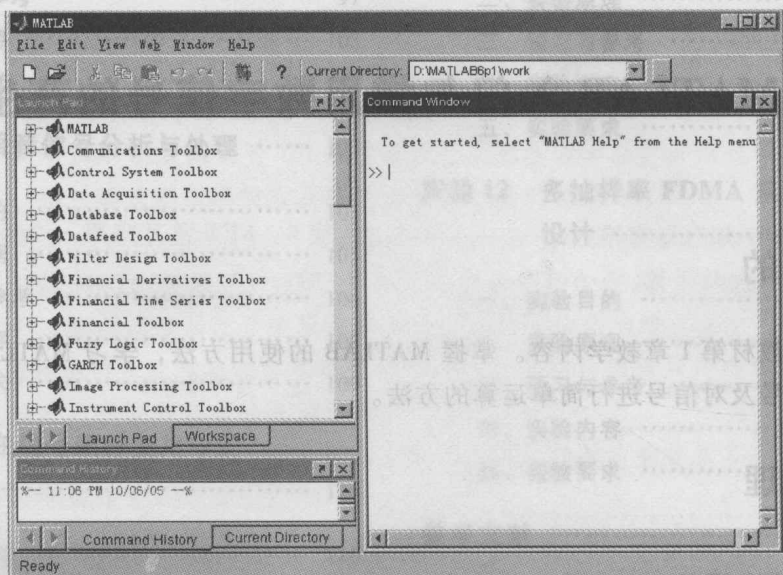


图 1.1 MATLAB 用户界面

(2) MATLAB 可以输入字母、汉字，但是标点符号必须在英文状态下书写。

(3) MATLAB 中不需要专门定义变量的类型，系统可以自动根据表达式的值或输入的值来确定变量的数据类型。MATLAB 中数据是以矩阵的形式存储的。

(4) 变量名可以由字母、数字和下划线混合组成，但必须以字母开头，字符长度不能大于 31。MATLAB 中的变量名是区分大小写字母的。

(5) 命令行与 M 文件中的百分号 “%” 标明注释。在语句行中百分号后面的语句被忽略而不被执行，在 M 文件中百分号后面的语句可以用 Help 命令打印出来。

MATLAB 作为一种高级计算语言，它不仅能以人机交互式的命令行的方式工作，还可以像 BASIC、FORTRAN、C 等其他高级计算机语言一样进行控制流的程序设计，即编制一种以 m 为扩展名的文件，简称为 M 文件。

M 文件有两种形式，即命令式和函数式。命令式文件就是命令行的简单叠加，MATLAB 会自动按顺序执行文件中的命令，其运行相当于在命令窗口中逐行输入并运行命令，因此，用户在编制此类文件时，只需把所要执行的命令按行编辑到指定的文件中，且变量不需预先定义，也不存在文件名对应问题，也可以访问存在于整个工作空间内的数据。但要注意命令式文件在运行中所产生的所有变量均为全局变量。也就是说，这些变量一旦生成，就一直保存在内存空间中，直到用户执行 clear 或 quit 时为止。

为了实现计算中的参数传递，需要用到函数式文件。函数式文件在 MATLAB 中应用十分广泛，MATLAB 所提供的绝大多数功能函数都是由函数式文件实现的。函数式文件的结构为：

function 输出参数 = 函数名(输入参数)

函数体 % 注释

M 文件使用时要注意以下几个问题：

(1) 文件扩展名一定为 m；

(2) 以符号%引导的行是注释行,不可执行,可供 help 命令查询;

(3) 不需要用 end 语句作为 M 文件的结束标志;

(4) 在运行此文件之前,需要把它所在目录加到 MATLAB 的搜索路径上去,或将文件所在目录设为当前目录。

MATLAB 系统最初依托的操作系统是 DOS 系统,因此它保留了许多 DOS 系统下的命令,仍可在命令窗口内输入执行,下面简要介绍常用的命令。

clc: 清除命令窗口的所有显示内容,并把光标移到命令窗口的左上角。

clear all: 清除工作区间保存的所有变量。

clf: 清除 MATLAB 当前图形窗口的图形。

who: 列出当前工作区间的变量。

whos: 列出当前工作区间的变量的更多信息。

which: 显示指定函数和文件的路径。

what: 显示当前目录或者指定目录下的 M 文件。

help: 按照指定关键字查阅函数功能。

look for: 按照指定的关键字查找所有相关的 M 文件。

MATLAB 系统中还有很多变量和常数,用以表达特殊含义,在编程过程中应该注意不要用 MATLAB 中的内部函数或命令名作为新的变量名。以下列出主要的变量和常数。

变量 ans: 指当前未定义变量名的答案。

常数 eps: 表示浮点相对精度,其值是从 1.0 到下一个最大浮点数之间的差值。该变量值作为一些 MATLAB 函数计算的相对精度,按 IEEE 标准,  $\text{eps} = 2^{-52}$ , 近似为  $2.2204 \times 10^{-16}$ 。

常数 Inf: 表示无穷大。当输入或计算中有除以 0 时产生 Inf。

虚数单位 i、j: 表示复数虚部单位,相当于  $\sqrt{-1}$ 。

NaN: 表示不定型值,是由 0/0 运算产生的。

常数 pi: 表示圆周率  $\pi$ , 其值为 3.1415926535897...

从最原始版本的 MATLAB 开始,图形功能就已经成为基本的功能之一。随着 MATLAB 版本的逐步升级, MATLAB 的图形工具箱从简单的点、线、面处理发展到了集二维图形、三维图形甚至四维表现图和对图形进行着色、消隐、光照处理、渲染及多视角处理等多项功能于一身的强大功能包。本教程只涉及二维基本绘图命令及图形修饰命令,相关内容将在预习与参考部分介绍。

## 2. 常用的离散时间信号

离散时间信号是指在离散时刻才有定义的信号,简称离散信号或离散序列。离散序列通常用  $x(n)$  来表示,自变量  $n$  必须是整数。

典型的离散时间信号有以下几种。

(1) 单位冲激序列

单位冲激序列  $\delta(n)$ , 也称为单位抽样序列, 定义为

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1-1)$$

注意：单位冲激序列不是单位冲激函数的简单离散抽样，它在  $n=0$  处是取确定的值1。

### (2) 单位阶跃序列

单位阶跃序列  $u(n)$  定义为

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

### (3) 矩形序列

$R_N(n)$  定义为

$$R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1-3)$$

矩形序列有一个重要的参数，就是序列宽度  $N$ 。 $R_N(n)$  与  $u(n)$  之间的关系为  $R_N(n) = u(n) - u(n-N)$ 。

### (4) 实指数序列

单边指数序列定义为

$$x(n) = a^n u(n) \quad (1-4)$$

式中  $a$  为实数。如果  $|a| < 1$ ， $x(n)$  的幅度随  $n$  的增大而减小，序列  $x(n)$  收敛；如果  $|a| > 1$ ，序列  $x(n)$  则发散。

### (5) 正弦型序列

正弦型序列定义为

$$x(n) = \sin(n\omega_0 + \phi) \quad (1-5)$$

其中， $\omega_0$  是正弦序列的数字域频率； $\phi$  为初相。与连续的正弦信号不同，正弦序列的自变量  $n$  必须为整数。可以证明，只有当  $2\pi/\omega_0$  为有理数时，正弦序列具有周期性。

### (6) 复指数序列

复指数序列定义为

$$x(n) = e^{(a+j\omega_0)n} \quad (1-6)$$

当  $a=0$  时，得到虚指数序列  $x(n) = e^{j\omega_0 n}$ ，式中  $\omega_0$  是正弦序列的数字域频率。由欧拉公式知，复指数序列可进一步表示为

$$x(n) = e^{(a+j\omega_0)n} = e^{an} e^{j\omega_0 n} = e^{an} [\cos(n\omega_0) + j\sin(n\omega_0)] \quad (1-7)$$

与连续复指数信号一样，将复指数序列实部和虚部的波形分开讨论，得出如下结论：

当  $a > 0$  时，复指数序列  $x(n)$  的实部和虚部分别是按指数规律增长的正弦振荡序列；

当  $a < 0$  时，复指数序列  $x(n)$  的实部和虚部分别是按指数规律衰减的正弦振荡序列；

当  $a=0$  时，复指数序列  $x(n)$  即为虚指数序列，其实部和虚部分别是等幅的正弦振荡序列。

## 3. 序列的运算

序列的运算通常包括移位、和、积、尺度变换、翻褶、卷积等。序列通过运算后将产生新序列。

### (1) 序列移位

设某一序列为  $x(n]$ ，当  $m > 0$  时，它的移位序列  $x(n-m)$  是由序列  $x(n)$  延后或者右移  $m$

位形成的新序列,称为  $x(n)$  的延序列。而  $x(n+m)$  是由  $x(n)$  超前或者左移  $m$  形成的,称为  $x(n)$  的超前序列。

### (2) 序列之和

两序列的和是指两序列中同序号  $n$  (或同时刻) 的序列值逐项对应相加而构成的一个新的序列。表示为  $z(n) = x(n) + y(n)$ 。

### (3) 序列之积

两序列的积是指两序列中同序号  $n$  (或同时刻) 的序列值逐项对应相乘而构成的一个新的序列。表示为  $z(n) = x(n)y(n)$ 。

### (4) 时间尺度变换

序列  $x(n)$  的尺度变换序列为  $x(mn)$  或  $x(n/m)$ , 其中  $m$  为正整数。注意对  $x(n/m)$ , 当  $n/m$  为整数时才有意义。

### (5) 序列翻褶

$x(-n)$  是  $x(n)$  的翻褶序列, 它是以  $n=0$  的纵轴为对称轴将序列  $x(n)$  加以翻褶形成的。

## 三、预习与参考

### 1. 相关 MATLAB 函数

$Y = \text{zeros}(M)$ : 生成  $M \times M$  大小的全零矩阵。

$Y = \text{zeros}(M,N)$ : 生成  $M \times N$  大小的全零矩阵。

$Y = \text{ones}(M)$ : 生成  $M \times M$  大小的全 1 矩阵。

$Y = \text{ones}(M,N)$ : 生成  $M \times N$  大小的全 1 矩阵。

$Y = \sin(x)$ : 计算  $x$  的正弦函数。

$Y = \cos(x)$ : 计算  $x$  的余弦函数。

$Y = \exp(x)$ : 计算自然数  $e$  的  $x$  次方的函数。

$Y = \text{real}(x)$ : 求  $x$  的实数部分函数。

$Y = \text{imag}(x)$ : 求  $x$  的虚数部分函数。

$Y = \text{length}(x)$ : 求  $x$  序列长度的函数。

$\text{plot}(y)$ : 绘制  $Y$  轴为  $y$  值的连续信号图形函数。

$\text{plot}(x,y)$ : 绘制  $X$  轴为  $x$  值、 $Y$  轴为  $y$  值的连续信号图形函数。

$\text{stem}(y)$ : 绘制垂直坐标为  $y$  值的离散信号图形函数。

$\text{stem}(x,y)$ : 绘制水平坐标为  $x$  值、垂直坐标为  $y$  值的离散信号图形函数。

$\text{subplot}(X,Y,Z)$ : 分割图形窗口函数。输入参数:  $X$  和  $Y$  分别表示图形分割窗口的行和列,  $Z$  表示分割后的小窗口序号。

$\text{axis}([xmin,xmax,ymin,ymax])$ : 限定坐标范围函数。输入参数:  $xmin$  和  $xmax$  分别表示  $X$  轴最小和最大取值范围,  $ymin$  和  $ymax$  分别表示  $Y$  轴最小和最大取值范围。

$\text{grid on}$ : 在图形中添加网格函数。

$\text{xlabel}()$ : 将括号内的字符串作为  $X$  轴的标注。

ylabel(): 将括号内的字符串作为 Y 轴的标注。

title(): 将括号内的字符串作为图形标题。

## 2. MATLAB 实现

【例 1-1】利用 MATLAB 编程绘制常用的离散时间信号。

解: 常用的离散时间信号可参考实验原理部分相关内容, 要产生这些信号需要使用到前面介绍过的 MATLAB 相关函数。程序代码如下:

```
clear; close all; clc;
```

```
N = 100;
```

```
x1 = [1, zeros(1, N - 1)]; % 单位冲激序列
```

```
x2 = ones(1, N); % 单位阶跃序列
```

```
n = 0: N - 1;
```

```
a = 0.6;
```

```
x3 = a.^n; % 实指数序列
```

```
w0 = pi/3;
```

```
ang = pi/15;
```

```
x4 = sin(n * w0 + ang); % 正弦序列
```

```
x5 = exp((a + j * w0) * n); % 复指数序列
```

```
figure;
```

```
subplot(5, 1, 1);
```

```
stem(x1); ylabel('单位冲激序列');
```

```
subplot(5, 1, 2);
```

```
stem(x2); ylabel('单位阶跃序列');
```

```
subplot(5, 1, 3);
```

```
stem(x3); ylabel('实指数序列');
```

```
subplot(5, 1, 4);
```

```
stem(x4); ylabel('正弦序列');
```

```
subplot(5, 1, 5);
```

```
stem(abs(x5)); ylabel('复指数序列的模');
```

```
xlabel('n');
```

程序运行结果如图 1.2 所示。

【例 1-2】用 MATLAB 命令画出下列离散时间信号的波形图。其中  $N=8$ ,  $a=0.8$ 。

(1)  $x_1(n) = a^n [u(n) - u(n - N)]$

(2)  $x_2(n) = x_1(n + 3)$

(3)  $x_3(n) = x_1(n - 2)$

(4)  $x_4(n) = x_1(-n)$

解: 程序代码如下:

```
clc; clear; close all;
```

```
a = 0.8;
```

```
N = 8;
```

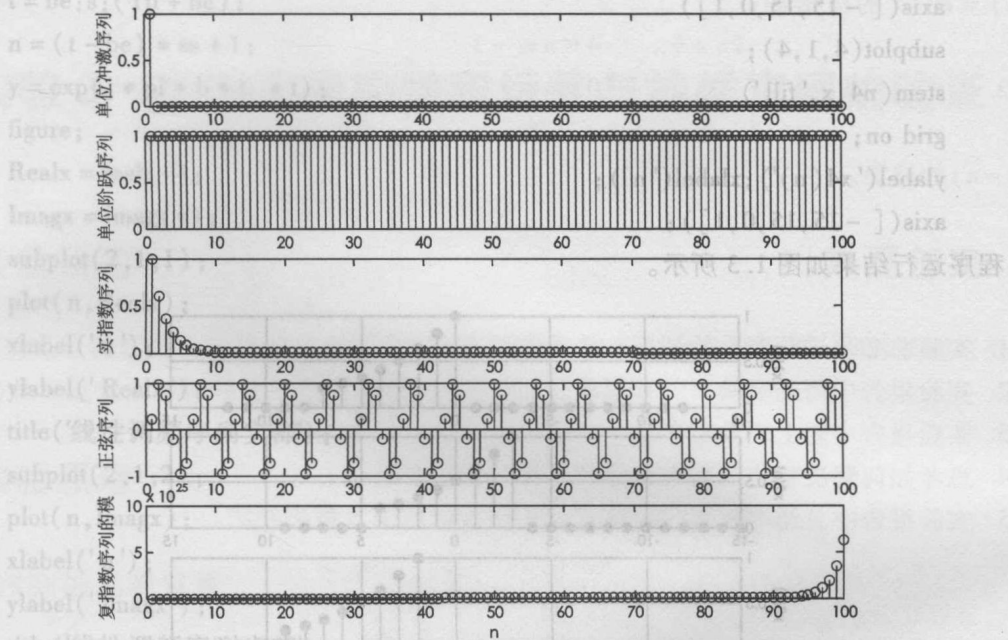


图 1.2 常见离散数字信号

$n = -12:12$ ; %生成从-12到12间隔数据为1的序列

$Rn = [\text{zeros}(1,12), \text{ones}(1,N), \text{zeros}(1,5)]$ ;

$x = a.^n * Rn$ ;

$n1 = n$ ;

$n2 = n1 - 3$ ;

$n3 = n1 + 2$ ;

$n4 = -n1$ ;

$\text{subplot}(4,1,1)$ ;

$\text{stem}(n1, x, 'fill')$ , 对脉冲序列进行采样, 采样率  $f_s = 1/T$ , 中为  $T$

$\text{grid on}$ ; 对采样后的信号进行网格线, 以便观察信号的周期性; 轴

$\text{ylabel}('x1(n)')$ ; 在 MATLAB 中, 对信号进行采样, 采样率  $f_s = 1/T$ , 中为  $T$

$\text{axis}([-15, 15, 0, 1])$  在 MATLAB 中, 对信号进行采样, 采样率  $f_s = 1/T$ , 中为  $T$

$\text{subplot}(4,1,2)$ ;

$\text{stem}(n2, x, 'fill')$

$\text{grid on}$ ;

$\text{ylabel}('x2(n)')$

$\text{axis}([-15, 15, 0, 1])$

$\text{subplot}(4,1,3)$

$\text{stem}(n3, x, 'fill')$

$\text{grid on}$ ;

$\text{ylabel}('x3(n)')$

图 1.4 产生线性调频信号

#### 四、实验

1. 使用 MATLAB 生成离散指数序列  $x_1(n) = 1.2^n u(n)$ ,  $x_2(n) = \sin(0.7\pi n)$ ,  $x_3(n) = \cos(0.7\pi n)$

```
axis([-15,15,0,1])
subplot(4,1,4);
stem(n4,x,'fill')
grid on;
ylabel('x4(n)');xlabel('n');
axis([-15,15,0,1]);
```

程序运行结果如图 1.3 所示。

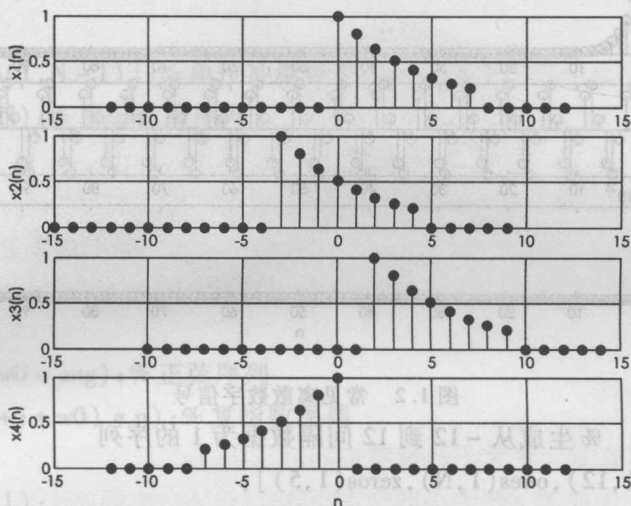


图 1.3 序列移位

### 3. 应用实例

【例 1-3】线性调频信号是一种在雷达或通信系统中常用到的信号，定义为

$$\mu_{\text{LFM}}(n) = \exp(j\pi b n^2), \quad n_1 \leq n \leq n_2$$

在上式中， $b$  为线性调频扫描频率， $|b| = D/T_p^2$ ， $D$  为脉冲压缩比， $T_p$  为脉冲信号的周期。

解：线性调频序列可以写成一个 M 函数，通过外界输入参数  $D$ 、 $T_p$  来控制信号波形。M 函数需要写在 M 文件中。M 文件的建立方法：在 MATLAB 菜单中选择 File → New → M-File，弹出编辑窗口，在编辑窗口中键入程序，完成后保存成 LFMdemo.m 文件即可。函数程序代码如下：

```
function y = LFMdemo(D,be,Tp,s);
%D 为脉冲的压缩比
%Tp 为脉冲宽度
%be 为调频信号的起始时间
%s 为计算的精度

b = D/(Tp^2);
ss = 1/s;
```

```

t = be:s:(Tp + be);
n = (t - be) * ss + 1;
y = exp(j * pi * b * t * t);
figure;
Realx = real(y);
Imagx = imag(y);
subplot(2,1,1);
plot(n,Realx);
xlabel('n');
ylabel('Realx');
title('线性调频序列实部');
subplot(2,1,2);
plot(n,Imagx);
xlabel('n');
ylabel('Imagx');
title('线性调频序列虚部');

```

在 MATLAB 主窗口(或命令窗口)下输入以下命令来调用函数 LFMdemo:

```
>> z = LFMdemo(1e2,0,1e-6,1e-9);
```

得到程序运行结果如图 1.4 所示。

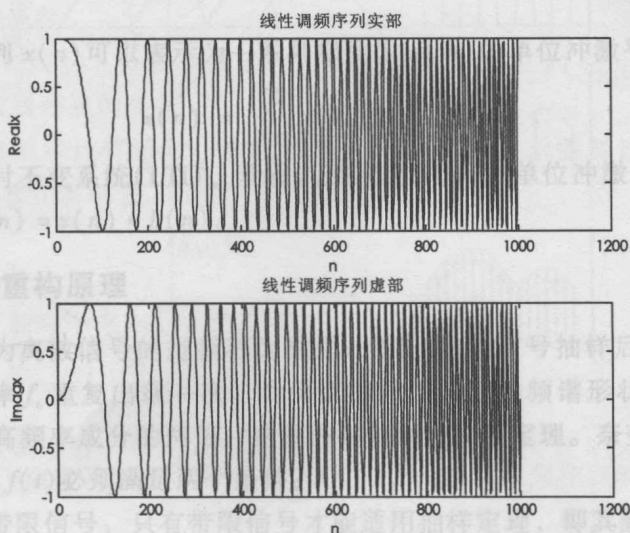


图 1.4 产生线性调频信号

## 四、实验内容

1. 使用 MATLAB 分别绘制单边指数序列  $x_1(n) = 1.2^n u(n)$ 、 $x_2(n) = \sin(9.7\pi n)$ 、

$x_3(n) = e^{j1.6\pi n}$  的波形图。

2. 给定信号  $x(n) = \begin{cases} 2n+4, & -4 \leq n \leq -1 \\ 2n, & 0 \leq n \leq 4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ , 试绘制  $x(n)$ 、 $x_1(n) = 2x(n-2)$  和  $x_2(n) =$

$2x(3-n)$  的波形。

## 五、实验要求

1. 实验前必须进行充分的预习, 熟悉实验内容。
2. 实验报告中简述实验目的和原理。
3. 实验报告中附上实验程序。
4. 思考如何解决移位过程中数值和下标的对应关系。
5. 实验报告中总结本次实验程序调试中出现的问题及解决办法。

## 3. 应用实例

【例1-3】线性调频信号是通信系统中常用到的信号, 定义为

在上式中,  $b$  为线性调频扫描频率,  $|b| = D/T$  为脉冲压缩比,  $T$  为脉冲信号的周期。

解: 线性调频序列可以写成  $x(n) = \exp(j2\pi b n^2)$ 。在 MATLAB 中, 该信号波形。M 函数需要写在 M 文件中: M 文件在 MATLAB 主窗口 (或命令窗口) 下通过命令 “File → New → M-File”, 弹出编辑窗口, 在编辑窗口中输入以下代码并保存。函数程序代码如下:

```
function y = LFMdemo(T,D)
% D 为脉冲压缩比
% Tp 为脉冲宽度
% bc 为调频信号的起始时间
% s 为计算的精度
```

```
bs = 1/s;
b = D/(Tp^2);
n = 0:(1/b):(1/b);
x = exp(j*pi*b*n.^2);
y = x;
```