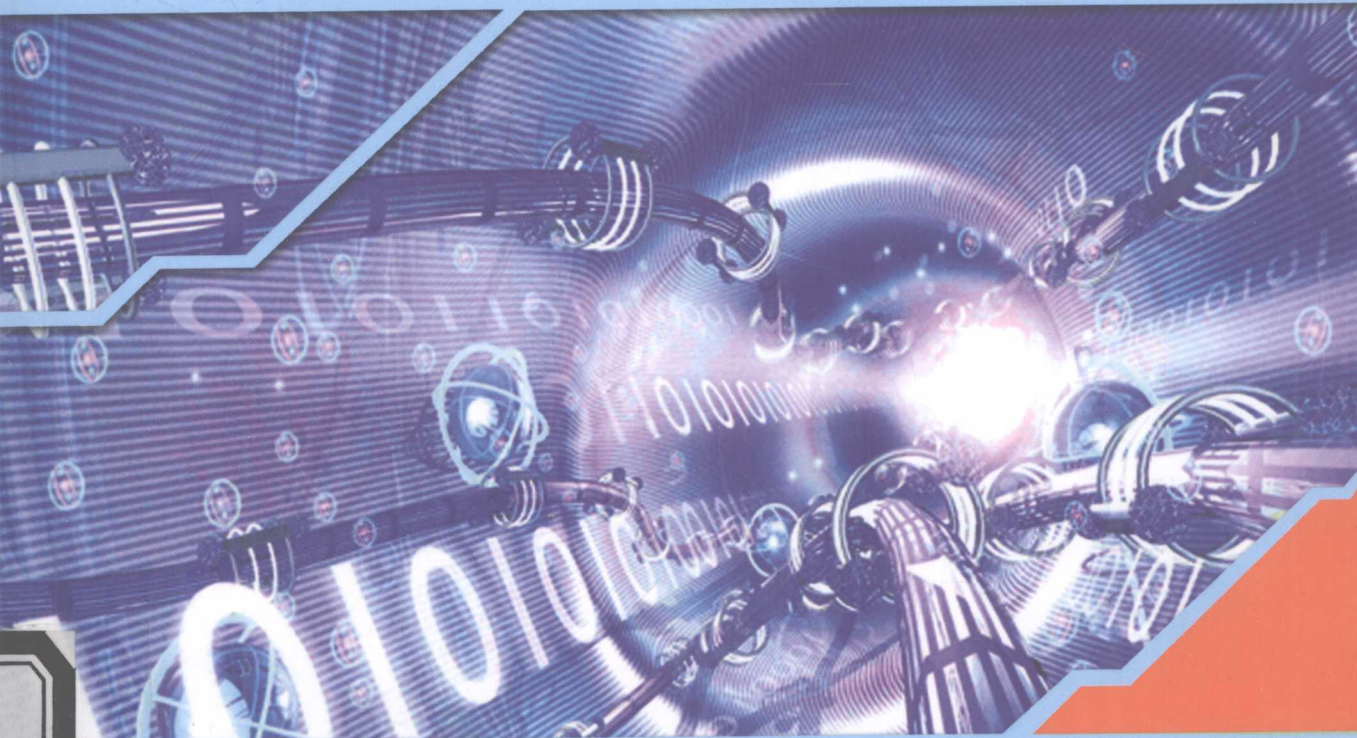




21世纪电气信息学科立体化系列教材

数字信号处理 实践教程

● 主编 杨述斌 李永全



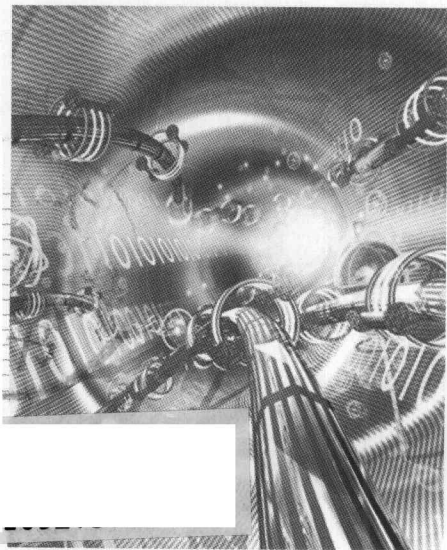
华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



21世纪电气信息学科立体化系列教材

数字信号处理 实践教程

主 编 杨述斌 李永全
副主编 郝国成 沈 田



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理实践教程/杨述斌 李永全 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007年1月

ISBN 978-7-5609-3940-7

I. 数… I. ①杨… ②李… ③郝… ④沈… II. 数字信号-信号处理-高等学校-教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第008355号

数字信号处理实践教程

杨述斌 李永全 主编

策划编辑:王红梅 孙基寿

责任编辑:孙基寿

责任校对:胡金贤

封面设计:秦 茹

版式设计:秦 茹

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心设计室

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×1092 1/16

印张:8.5 插页:2

字数:200 000

版次:2007年1月第1版

印次:2007年1月第1次印刷

定价:14.80元

ISBN 978-7-5609-3940-7/TN·105

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



21世纪电气信息学科立体化系列教材

编审委员会

顾问：

潘 垣（中国工程院院士，华中科技大学）

主任：

吴麟章（湖北工业大学）

委员：（按姓氏笔画排列）

王 斌（三峡大学电气信息学院）

余厚全（长江大学电子信息学院）

陈铁军（郑州大学电气工程学院）

吴怀宇（武汉科技大学信息科学与工程学院）

陈少平（中南民族大学电子信息工程学院）

罗忠文（中国地质大学信息工程学院）

周清雷（郑州大学信息工程学院）

谈宏华（武汉工程大学电气信息学院）

钱同惠（江汉大学物理与信息工程学院）

普杰信（河南科技大学电子信息工程学院）

廖家平（湖北工业大学电气与电子工程学院）

内 容 提 要

本书是数字信号处理的实践配套教材。根据课程内容和读者层次的不同,特别是学生们普遍反映的重难点问题,结合教学实践编写了三大部分:基础理论实验、课程设计和 DSP 新技术。这三部分从简单到复杂,循序渐进,逐步深入。各个部分既可独立,又构成一个有机整体。第 1 章为基础部分,包括 4 个基础理论实验:离散时间信号的分析实验、离散时间系统的时域分析实验、LSI 离散时间系统的频域分析实验、连续时间信号的数字处理实验。第 2 章为提高部分,介绍了数字滤波器的基本理论,重点讨论了 IIR 和 FIR 数字滤波器的设计与实现。第 3 章为拓展部分,介绍了采用通用或专用 DSP 芯片构成的目标系统进行工程设计的通用方法,讨论了 DSP 的具体开发和应用实例,进一步展现了 DSP 应用新技术。

本书可作为高等院校电子信息类各专业以及相近专业的本科生或低年级研究生的教科书,也可供有关科研人员和工程技术人员参考。

前 言

随着信息化的推进,数字信号处理的地位和作用变得越来越重要。因为信息化的基础是数字化,而数字化的核心技术就是数字信号处理。半个世纪以来,在如此强有力的需求牵引下,伴随着计算机技术、微电子技术日新月异的突破,数字信号处理的方法和应用越来越广泛和深入,发展十分迅速。“数字信号处理(DSP)”是研究数字序列信号的表示方法,并对信号进行运算,以提取包含在其中的特殊信息的一门学科。DSP是一门理论和实践密切结合的理论性和工程性都很强的学科,其理论性体现在,它综合应用数学、电路理论、信号与系统等领域的基础理论和方法,发展并形成了自己的理论体系,成为通信、雷达、声纳、电声、电视、测控、生物医学工程等众多学科和领域的重要理论基础与技术基础。其工程性体现在,它的应用极为广泛,从科学技术的各个领域到国民经济建设的各个行业;从国防建设的各种武器装备到林林总总的消费类电子产品的设计与生产,都是数字信号处理技术的应用领域。因此,近年来社会上对既掌握DSP理论和方法,又掌握DSP工程技术的人才的需求,呈爆发式地增长。

学好DSP,既要较好地掌握相关的基础理论,又需要通过实践探求新的结果,并应用这些结果解决实际问题。传统的数字信号处理课程,大多只讨论算法的理论及其推导,较少涉及工程实现方法及相应的软硬件技术。因此,为了让学生加深理解,在系统学习基本理论的同时,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,而且能充分地锻炼初学者独立解决问题的能力。本实践教程就是针对这一目的而编写的。

本实践教程根据课程内容、重难点、实践需求和读者不同层次的需求,编写了三大部分:基础理论实验、课程设计和DSP新技术。这三部分从简单到复杂,循序渐进,逐步深入。各个部分既独立,又构成一个有机整体。读者可以根据自己的情况灵活取舍,也可循序渐进地按教程内容顺序进行。三部分的具体内容如下。

一、基础理论实验

在DSP中,离散时间信号和离散时间系统的分析、采样定理是最基本最重要的基本内容,DFT、FFT是处理数字信号的重要数学工具。它们的使用范围很广,是学生必须深入理解和掌握的部分。基于这种认识,本书在第1章安排了4个实验。这4个实验共需8个学时,具体实验题目如下:

1. 离散时间信号的分析实验;

2. 离散时间系统的时域分析实验；
3. LSI 系统的频域分析实验；
4. 连续时间信号的数字处理实验。

二、课程设计

数字滤波器的基本理论及其设计方法与实现是 DSP 技术的重要内容,其中应重点掌握 IIR 和 FIR 两种不同的数字滤波器的基本设计原理和实现方式。因为它们是 DSP 基本理论的全面应用,是从理论到实际应用的关键,也是后续相关课程的基础。某些数字信号处理教材通常都安排有这两种滤波器实验,但学生反映做完实验后理解不深,特别是在学习相关的课程时,在实际工作中不能灵活地运用它。针对这一现状,本书第 2 章以课程设计为线索,重点讨论了 IIR 和 FIR 数字滤波器的设计与实现。不安排课程设计的学校,可以把此部分按照第 1 章的形式当作一个综合性实验。

三、DSP 新技术

自 1980 年以来,DSP 芯片得到了突飞猛进的发展,其应用越来越广泛。它的运算处理速度,不仅提高了几十倍,而且其关键部件乘法器的数量也增加了一个数量级以上。从制造工艺来看,普遍采用亚微米(Micron)CMOS 工艺。DSP 芯片的引脚数量大大增加,结构灵活性更加突出。但 DSP 系统的成本、体积、重量和功耗都有很大程度的下降。采用通用或专用 DSP 芯片构成的目标系统已成为工程实现的通用方法。本书第 3 章介绍 DSP 的具体开发和应用设计,进一步展现 DSP 应用新技术。

本书由杨述斌提出编写提纲并编写第 1 章,李永全编写第 2 章,郝国成和沈田共同编写第 3 章。全书由杨述斌统稿。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

2006 年 10 月



基础理论实验

- 1.1 数字信号处理的(MATLAB)软件实现平台简介 (1)
 - 1.1.1 MATLAB 应用入门 (2)
 - 1.1.2 信号处理工具箱函数库 (4)
- 1.2 基础理论实验 (9)

课程设计

- 2.1 课程设计概述 (21)
 - 2.1.1 课程设计目的 (21)
 - 2.1.2 课程设计基本要求 (22)
 - 2.1.3 课程设计题目 (22)
 - 2.1.4 课程设计指导 (23)
 - 2.1.5 课程设计成绩评定 (23)
 - 2.1.6 课程设计组织管理 (24)
- 2.2 课程设计的基本原理 (24)
 - 2.2.1 数字滤波器的基本概念 (24)
 - 2.2.2 IIR 数字滤波器的设计方法 (25)
 - 2.2.3 模拟滤波器设计 (26)
 - 2.2.4 IIR 数字滤波器设计 (37)
 - 2.2.5 设计 IIR 数字滤波器的频率变换法 (43)
 - 2.2.6 FIR 数字滤波器的性质 (47)
 - 2.2.7 FIR 滤波器的窗函数设计 (49)
 - 2.2.8 FIR 滤波器频率采样法设计 (52)
 - 2.2.9 用 MATLAB 设计 FIR 滤波器 (54)
 - 2.2.10 滤波过程的实现 (58)
 - 2.2.11 滤波器分析与设计图形界面的使用 (60)
- 2.3 课程设计流程 (61)
- 2.4 课程设计实例 (62)
 - 2.4.1 基于 MATLAB 的语音信号分析与处理的课程设计 (63)
 - 2.4.2 基于 MATLAB 的声音信号频谱分析的课程设计 (67)
 - 2.4.3 基于 MATLAB 的简单语音处理系统设计的课程设计 (68)

2.4.4	使用 FFT 实现任意三个同频带信号的频分复用的课程设计	(70)
2.4.5	基于 MATLAB 的语音信号简单的特技处理——延时和混响的 课程设计	(72)
2.4.6	基于 MATLAB 的有噪声的语音信号处理的课程设计	(73)
3	DSP 新技术	
3.1	DSP 新技术概述	(75)
3.1.1	平台介绍	(76)
3.1.2	DSP 开发环境及工具	(78)
3.1.3	DSP 应用领域	(81)
3.2	DSP 开发设计	(82)
3.2.1	软件开发过程及开发工具	(82)
3.2.2	汇编语言程序实现 DSP 设计	(87)
3.2.3	用 C 语言和汇编语言混合编程	(98)
3.2.4	用 C 语言开发 DSP 嵌入式系统	(104)
3.2.5	基于 Matlab 的 DSP 系统级的设计方法	(109)
3.2.6	结合 FPGA 的 DSP 设计	(112)
3.3	DSP 新技术展望	(113)
3.3.1	数字信号处理的实现方法	(114)
3.3.2	DSP 系统的特点	(114)
3.3.3	DSP 的潜在应用	(115)
3.3.4	DSP 技术展望	(116)
附录 A	部分基础理论实验程序	(118)
附录 B	课程设计报告格式	(126)
附录 C	符号用法说明	(128)
参考文献	(129)

1

基础理论实验

本章介绍数字信号处理的 4 个基础理论实验,这些实验,可以帮助读者进一步系统地理解和消化数字信号处理的基本理论,能充分地锻炼初学者的数字信号处理的基本实践能力和独立解决问题的能力。

1.1 数字信号处理的(MATLAB)软件实现平台简介

由于数字信号处理实验的主要目的是验证数字信号处理的有关理论,进一步理解和巩固所学的理论知识,所以实验中所用的算法语言不作任何限制。为了提高效率,提倡读者选用自己最熟练、编程效率较高的算法语言。MATLAB 是 Matrix Laboratory 的缩写,是由 Mathworks 公司开发的一套用于科学与工程计算的可视化高性能软件,是一种交互式的以矩阵为基本数据结构的系统,具有强大的矩阵运算能力。与常用的 Fortran、C 等高级语言相比, MATLAB 的语法规则更简单,更贴近人的思维方式,被称为“草稿纸式的语言”。如用户每输入一条命令并按回车键, MATLAB 系统便解释执行,并显示执行结果。根据结果,用户立即知道刚输入的命令的正确性,或可利用中间结果进行其他处理等。这样大大节省了编程时间,提高了效率。此外, MATLAB 中的工具箱和图形显示(打印)功能,有利于直观、方便地进行分析、计算和设计工作。在美国一些大学里, MATLAB 已成为辅助教学的有益工具。MATLAB 的信号处理工具箱为信号处理提供了强大的应用处理函数库,已成功地应用于数字信号处理课程的问题分析、实验、滤波器设计及计算机模拟等工作中。因此,本教程就以 MATLAB 为算法工具,它完全可以满足本教程的实践要求。

目前, MATLAB 的版本是 7.0 版,该版本适用于所有 32 位的 Windows 操作系统,在 NTFS(NT 文件系统)格式下完全安装约需 850 MB。MATLAB 软件主要由主包、仿真系统和工具箱三大部分组成。

1.1.1 MATLAB 应用入门

1. MATLAB 的安装与卸载

MATLAB 软件在用户接口设计上具有较强的亲和力,其安装过程比较典型:直接运行光盘中的安装程序 setup.exe 文件,然后依据提示一步步选择即可。MATLAB 自身带有卸载程序,它在安装目录下的 uninstall 子目录中,文件名为 uninstall.exe,运行该文件即可卸载。也可以通过 Windows 系统的安装卸载程序进行卸载。

2. MATLAB 的启动与退出

MATLAB 安装完成后,在 Windows 桌面上生成一个快捷方式,它是指向安装目录下 \bin\win32\matlab.exe 的链接。双击快捷方式即可打开 MATLAB 集成环境的基本窗口,该窗口通常称为命令窗口,如图 1-1 所示。MATLAB 的退出与其他程序一样,但值得一提的是它有一个专有的快捷键 $\text{Ctrl} + \text{Q}$ 。

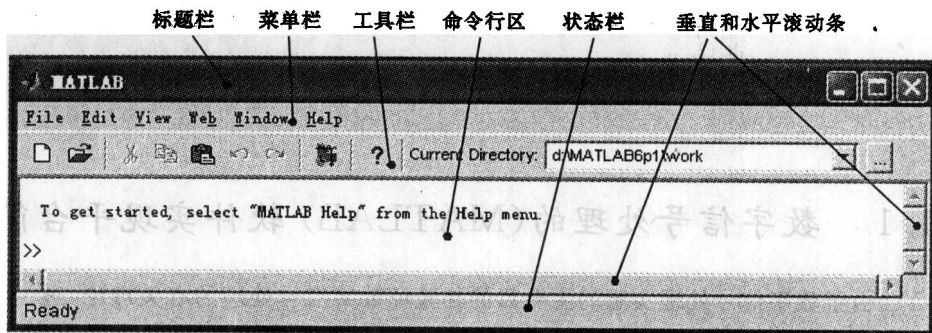


图 1-1 MATLAB 集成环境的基本窗口——命令窗口

3. MATLAB 界面简介

MATLAB 命令窗口中的菜单栏包括 File、Edit、View、Web、Window 和 Help 6 个菜单项。下面重点介绍 File 项。

File 项是数据输入/输出的接口,包括 10 个子项,这里只介绍其中的 5 个子项。

New 新建文件项,该项包括 M-File(.m,文本格式的 MATLAB 程序文件,可以直接通过文件名的方式在 MATLAB 环境下解释运行)、Figure(图形)、Model(仿真模型文件)和 GUI(可视化界面文件)4 个选项。

Open 打开所有 MATLAB 支持的文件格式,系统将自动识别并采用相应的程序对文件进行处理。例如,打开一个.m 文件,系统将自动打开.m 文件编辑器对它进行编辑。

Import Data... 导入用于 MATLAB 处理的数据函数,包括各种图像文件、声音文件和.mat 文件。

Save Workspace As... 将工作空间的变量以.mat(二进制)或 ASCII 文本的形

式存入文件中。

Set Path... 设置工作路径。可以打开如图 1-2 所示的路径设置(Set Path)对话框,将用户自己建立的文件夹加到 MATLAB 的文件夹系统中,以便所编制的文件能够在 MATLAB 环境中直接调用。

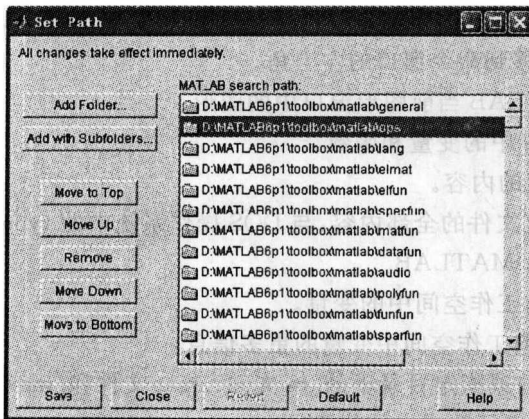


图 1-2 路径设置对话框

单击“Add Folder...”按钮可以将一个文件夹加到系统路径中;“Add with Subfolders...”允许把一个文件夹包括其所有的子文件夹加到系统路径中。这两种操作均可以直观地在右侧的路径栏内看到结果。选中一个加入的文件夹,利用 Move to Top(移至所有路径的最前面)、Move Up(上移一个)、Move Down(下移一个)、Move to Bottom(移至所有路径的最后面)按钮可改变文件在系统路径中的排列顺序,利用“Remove”按钮可将选中的路径从系统中删除。对路径操作完毕后,单击“Save”按钮保存;单击“Close”按钮关闭本对话框;单击“Revert”按钮取消所有未保存的改动;单击“Default”按钮还原到 MATLAB 安装时的路径设置;单击“Help”按钮则启动帮助系统解答疑难。

MATLAB 对输入命令的解释按以下顺序进行。

- ① 检查它是否为工作空间中的变量,是则显示变量内容。
- ② 检查它是否为嵌入函数,是则运行。
- ③ 检查它是否为子函数。
- ④ 检查它是否为私有函数。
- ⑤ 检查它是否为位于 MATLAB 搜索路径范围内的函数文件或脚本文件。

注意:如果有两个以上的方案与输入的命令相匹配,那么 MATLAB 将只执行第一个匹配。

4. MATLAB 常用命令

MATLAB 有一些嵌入函数,应用这些函数可以起到事半功倍的效果。下面是一些

常用的 MATLAB 命令说明如下。

cd 显示或改变当前工作目录。

dir 列出当前或指定目录下的文件和子目录清单,与 DOS 操作系统中的 dir 命令类似。

clc 清除 MATLAB 命令窗口中的所有显示内容。

home 把光标移到命令窗口的左上角。

clf 清除 MATLAB 当前图形窗口中的图形。

clear 清除内存中的变量和函数。

disp 显示变量的内容。

type 列出指定文件的全部内容,与 DOS 操作系统中的 type 命令类似。

exit、quit 退出 MATLAB。

who 列出当前工作空间中的变量。

whos 列出当前工作空间中变量的更多信息。

what 列出当前或指定目录下的 .m 文件、.mat 文件和 .mex 文件。

which 显示指定函数或文件的路径。

lookfor 按照指定的关键字查找所有相关的 .m 文件。

exist 检查指定的变量或函数文件的存在性,返回值为 0 ~ 8。0 表示检查的内容不存在;1 表示检查的内容是工作空间中的变量;2 表示 .m 文件或其他普通文件;3 表示 .mex 文件;4 表示 MDL 文件;5 表示嵌入函数;6 表示 .p 文件;7 表示一个目录;8 表示检查的内容为一个 Java 类。

more 用于滚屏分页。more off 不允许分页输出;more on 允许分页输出;more(n) 指定每页输出的行数,其中 n 表示行数。

! 加在外部命令前面,可以运行一个外部程序。如 !notepad 运行 Windows 记事本程序,但 MATLAB 不能处理输入信息,直到退出所运行的程序为止;!notepad & 运行记事本程序,而且 MATLAB 可继续处理信息。

1.1.2 信号处理工具箱函数库

MATLAB 软件具有专用的信号处理工具箱,这些工具箱对于学习信号与系统、数字信号处理等课程,以及进行通信、电子工程设计都是非常有效的辅助手段。限于篇幅,这里列出常用信号处理工具箱函数库,并只对某些函数的使用作出说明,关于其他函数的使用,请参阅 MATLAB 软件的帮助文档或其他教学参考书。

1. 波形分析

各种常用序列是数字信号处理的基础,MATLAB 提供了许多常用信号的波形产生函数,具体见表 1-1。

表 1-1 波形产生

函 数 名	功 能
chip	产生调频余弦信号
diric	产生 diricchlet 或周期 sinc 函数
pulstran	产生脉冲串
rectpuls	产生非周期的方波信号
sawtooth	产生锯齿波或三角波
sinc	产生 sinc 或 $\sin c(\pi t)/(\pi t)$ 函数波形
square	产生方波
tripuls	产生非周期的三角波

2. 信号变换

通过傅里叶变换(FT)可实现频谱分析,掌握信号频域特征,达到提取信号中有用信息的目的。MATLAB 信号处理工具箱提供了多种多样的傅里叶变换函数,具体见表 1-2。

表 1-2 信号变换

函 数 名	功 能
czt	线性调频 z 变换
dct	离散余弦变换
dftmtx	离散傅里叶变换矩阵
fft	一维快速傅里叶变换
fft2	二维快速傅里叶变换
fftshift	重新排列快速傅里叶变换(FFT)的输出
hilbert	希尔伯特变换
idct	逆离散余弦变换
ifft	逆一维快速傅里叶变换
ifft2	逆二维快速傅里叶变换
cceps	复倒谱计算
icceps	逆复倒谱计算
recps	实倒谱计算与最小相位重构

3. 滤波器分析

滤波是信号处理的一种基本而重要的技术,利用滤波可从复杂信号中提取所需要

的信号,抑制不需要的部分。滤波器的特性主要由其幅度频率特性、相位频率特性、群时延、滤波器的单位冲激响应等来描述。MATLAB 信号处理工具箱提供了用于滤波器分析的函数,具体见表 1-3。

表 1-3 滤波器分析

函 数 名	功 能
abs	求绝对值(幅值)
angle	求相角
freqs	模拟滤波器的频率响应
freqspace	控制频率响应中的频率间隔
freqz	数字滤波器的频率响应
freqzplot	画出频率响应曲线
grpdelay	平均滤波时延(群时延)
impz	数字滤波器的冲激响应
unwrap	展开相角

4. 滤波器执行

滤波器的实现可在频域和时域中进行。MATLAB 提供了时域内用卷积、频域内用各种滤波器函数的数字滤波器实现方法,具体见表 1-4。

表 1-4 滤波器执行

函 数 名	功 能
conv	求卷积
conv2	求二维卷积
deconv	去卷积
fftfilt	利用重叠相加法基于快速傅里叶变换的 FIR 有限长单位冲激响应滤波
filter	利用直接型滤波器的 IIR 无限长单位冲激响应或 FIR 滤波
filter2	二维数字滤波
filtfilt	零相位数字滤波
filtic	为直接 II 型滤波器选择初始条件
latcfilt	应用格型结构滤波
medfilt1	一维中值滤波
sgolayfilt	Savitzky-Golay 滤波
sosfilt	IIR 二阶滤波
upfirdn	采样率转换

5. FIR 数字滤波器设计

FIR 数字滤波器的优点是在保证满足滤波器幅频响应要求的同时,能获得严格线性相位特性。这对于高保真的信号处理,如语音处理、数据处理和测试等十分重要。FIR 数字滤波器的设计方法有多种,常用的有窗函数、最优化设计、约束的最小二乘逼近、升余弦函数等方法。以下给出 MATLAB 的 FIR 数字滤波器的常用窗函数(见表 1-5)和其设计函数(见表 1-6)。

表 1-5 常用的窗函数

barlett	巴特利窗
blackman	布莱克曼窗
boxcar	矩形窗
chebwin	切比雪夫窗
hamming	海明窗
hann	汉宁窗
kaiser	凯瑟窗
triang	三角窗

表 1-6 FIR 滤波器设计函数

函数名	功能
convmtx	卷积矩阵
cremez	任意响应、具有非线性相位的等波纹 FIR 滤波器设计
firl	基于窗函数的 FIR 数字滤波器设计——标准响应
fir2	基于窗函数的 FIR 数字滤波器设计——任意响应
fircls	约束最小二乘 FIR 数字滤波器设计——任意响应
fircls1	约束最小二乘 FIR 数字滤波器设计——低通与高通
firls	最小二乘 FIR 数字滤波器设计
firrcos	升余弦 FIR 数字滤波器设计
intfilt	内插 FIR 数字滤波器设计
remez	Parks-McClellan 最优 FIR 数字滤波器设计
remezord	Parks-McClellan 滤波器阶数选择

6. IIR 数字滤波器设计

IIR 数字滤波器比 FIR 数字滤波器在达到相同性能指标时所需要的滤波器阶数要低得多,时延也要小得多。IIR 数字滤波器设计方法有根据模拟滤波器原型进行转换设计的经典方法、直接设计法、最大平滑滤波器设计法等,表 1-7 给出了 IIR 数字滤波器的

设计函数。

表 1-7 IIR 数字滤波器设计

标准模拟 / 数字滤波器设计函数	
函数名	功能
butter	巴特沃斯滤波器设计
cheby1	切比雪夫 I 型滤波器设计
cheby2	切比雪夫 II 型滤波器设计
ellip	椭圆滤波器设计
maxflat	广义巴特沃斯低通滤波器设计
prony	时域 IIR 滤波器 prony 法
stmcb	Steiglitz-McBride 法
yulewalk	递归数字滤波器设计
IIR 滤波器阶数估计	
buttord	巴特沃斯滤波器阶数估计
cheblord	切比雪夫 I 型滤波器阶数估计
cheb2ord	切比雪夫 II 型滤波器阶数估计
ellipord	椭圆滤波器阶数估计
模拟低通原型滤波器设计	
besselap	贝塞尔模拟低通滤波器原型
buttap	巴特沃斯模拟低通滤波器原型
cheblap	切比雪夫 I 型模拟低通滤波器原型
cheb2ap	切比雪夫 II 型模拟低通滤波器原型
ellipap	椭圆模拟低通滤波器原型
频率变换	
lp2bp	模拟低通滤波器到模拟带通滤波器的转换
lp2bs	模拟低通滤波器到模拟带阻滤波器的转换
lp2hp	模拟低通滤波器到模拟高通滤波器的转换
lp2lp	模拟低通滤波器到模拟低通滤波器的转换
模拟滤波器的高散化	
bilinear	双线性变换
impinvar	冲激响应不变法