

研究生教学用书

数字信号处理技术的 算法分析与应用

祁才君 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



研究生教学用书

数字信号处理技术的 算法分析与应用

祁才君 编著



机械工业出版社

本书是作者在多年数字信号处理的教学实践和科研工作的基础上编著而成。全书按照确定性信号、随机信号和时变信号的分析逐步展开,内容包括信号采样技术、数字滤波技术、傅里叶变换和应用、功率谱估计、多采样率信号处理、短时傅里叶变换和小波变换等。本书特点是简化理论推导,从工程角度考虑读者对信号处理技术的要求,剖析数字信号处理算法在实际应用中的局限性。同时,重视 Matlab 工具在数字信号处理中的应用,通过算法的快速应用加深读者对算法的理解。

本书可以作为电类信息工程专业硕士研究生或高年级本科生的教学用书,也可作为相关专业的中、高级技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号处理技术的算法分析与应用/祁才君编著. —北京:机械工业出版社, 2005.7

研究生教学用书

ISBN 7-111-16919-0

I. 数... II. 祁... III. 数字信号—信号处理—算法分析—研究生—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 078397 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:周娟 于苏华 责任编辑:于苏华 版式设计:霍永明

责任校对:张媛 封面设计:陈沛 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2005 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·10.375 印张·401 千字

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着半导体技术,尤其是微处理芯片技术的发展,数字信号处理技术的应用已经从军事和工业领域,逐步向消费领域普及。数字信号处理已成为当今发展最快的技术之一。

数字信号处理技术可分为算法的理论研究和算法的应用实现两部分。

算法理论研究主要采用符号运算,通过严密的数学论证,从数学角度证明算法的可靠性和可实现性,是算法应用的基础。本书尽量简化算法的理论推导,侧重算法的应用实现过程。

算法的应用通常采用数值计算方法实现。应用过程中必须解决信号的采样、量化和数值计算、效率、计算复杂性和稳定性等一系列问题。算法实现的方法主要有:在通用计算机上用 Matlab 工具实现;在通用计算机上用高级语言实现;应用通用 DSP 处理器构成的硬件系统实现;应用 FPGA/CPLD 构成的硬件系统实现;或设计专用 ASIC 芯片实现。其中,通过计算机实现数字信号处理算法是基础,也是其他实现方法的必经之路。本书十分重视通过计算机仿真(尤其是应用 Matlab 工具)检验算法的有效性,并由此引导读者对算法的深刻理解。

掌握数字信号处理算法是应用数字信号处理技术的前提之一,除此之外,还必须掌握算法应用的背景技术。只有将两种技术相结合,才能真正使数字信号处理技术得到实际应用。作为数字信号处理的基础类书籍,本书虽然并不针对某个特定领域,但十分重视基础算法和应用背景之间的联系。

本书主要研究一维数字信号处理的算法实现,并按确定性信号、随机信号和时变信号的分析逐步展开。信号的分类不但与信号本身的特性相关,而且与分析要求密切相关。正确的信号分类对信号的采样方式、确定具体算法具有十分重要的意义,本书也十分重视信号分类和算法应用之间的关系。

全书共分 12 章。第 1 章数字信号处理基础。主要介绍数字信号处理系统的硬件构成,信号采样技术,信号重建技术,分析信号的截断和扩展,以及信号分类和算法之间的关系等。第 2~4 章介绍数字滤波器的设计,其中,第 2 章讨论数字滤波器的设计分类,经典数字滤波器的数学模型、性能指标和实现结构;第 3 章介绍了典型模拟低通滤波器,模拟滤波器转换成数字滤波器的方法,二阶 IIR 型数字滤波器和高阶 IIR 型数字滤波器的传统设计法,高阶 IIR 型数字滤波器的计算机优化设计法;第 4 章介绍了 FIR 线性相位数字滤波器的增益特性和相频特性, FIR 型数字滤波器的窗函数设计法、频率采样设计法和计算机优化设

计法。第5、6章讨论了离散傅里叶变换。第5章讨论了不同类型信号的傅里叶分析方法，着重讨论了适合数值计算的离散傅里叶变换(DFT)，通过加窗算法减少应用DFT变换分析非周期信号时的频谱泄漏，通过同步采样技术或插值DFT变换精确分析周期信号的频谱；第6章主要讨论了DFT变换的快速算法——FFT算法和IFFT算法，以及FFT算法在线性卷积和线性相关中的应用。同时讨论了线性调频(CZT)变换和其他离散正交变换。第7、8章涉及随机信号的分析。第7章讨论了随机信号的描述方法和随机信号分类，内容包括一维数字特征(均值、均方差等)，二维数字特征(功率谱和自相关)和多维数字特征(高阶谱)，着重讨论了随机信号的数字特征——功率谱密度和相关的定义、经典估计方法和估计质量的评价。第9章讨论多采样率数字信号处理，目的是为后面的小波变换作准备，内容涉及升采样和内插，降采样和抽取。内插和抽取数字滤波器的设计和实现结构，序列的子带分解和综合，双通道滤波器组的精确重建等。第10章信号时频分析，讨论了时频分析中的基本概念，如分析窗的局域化指标，不确定性原理，瞬时频率和解析信号，短时相关和时变谱等，着重讨论了经典时变信号的分析方法——短时傅里叶变换，以及戈勃(Gabor)变换和二次型时频分布等；第11、12章涉及小波变换。第11章讨论了分析窗的伸缩和平移特性，并由此引出连续小波变换的定义，着重分析连续小波变换的物理意义、性质和数值计算方法，并给出连续小波变换的简单应用；第12章讨论了尺度和位移的离散化方法，引出了框架理论，小波分类——小波级数和二进小波。另外，从信号的空间分解角度，引出多分辨率分析和Mallat算法，并从双通道滤波器组和正交小波之间的关系，提出正交小波的寻找和设计方法，最后讨论了离散小波包变换，正交小波变换和正交小波变换的简单应用。

在本书的编写过程中，得到浙江大学电气工程学院王小海教授以及本人家属的大力支持，在此表示深切感谢。

全书由北京交通大学吴湘淇教授审阅。吴教授提出了许多宝贵意见，他严谨、踏实的科学态度给作者留下了深刻印象，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，本书的编写和编排肯定存在不足。限于水平，书中错误及不妥之处在所难免，敬请读者批评指正，提出宝贵意见。如读者需要本书例题的Matlab源程序，可与作者联系。联系方式：E-mail: qcj@zju.edu.cn。

祁才君

2005年6月于浙江大学

本书常用符号说明

常用变量

t	连续时间
t_p	采样时域长度
T_s	采样周期
f, ω	模拟频率和模拟角频率
Ω	数字角频率
f_s, ω_s	采样频率和采样角频率
α_p, α_s	通带和阻带纹波系数
δ_p, δ_s	通带和阻带衰减 (dB)
B	信号带宽
W_N	DFT 变换核 $e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$
常用信号	
$\delta(t)$	单位冲激
$\delta(n)$	单位脉冲(样本)
$u(t)$	阶跃信号
$u(n)$	单位阶跃序列
$x(t)$	时域连续信号
$\tilde{x}_N(n)$	长度等于 N 周期序列
$X(z)$	序列 z 变换
$X(j\omega), \hat{x}(j\omega)$	信号 $x(t)$ 的连续傅里叶变换
$h(t)$	系统脉冲响应
$h(n)$	系统冲激响应
$H(z)$	z 域(离散域)系统函数
$H(s)$	s 域(复频域)系统函数
$H(f)$	关于模拟频率的频域系统函数
$H(j\omega)$	关于模拟角频率的频域系统函数
$X(j\Omega), X(e^{j\Omega})$	序列傅里叶变换 (DFTT)
$ X(j\Omega) $	数字幅频特性
$\varphi(\Omega)$	数字相频特性
$X(\Omega)$	数字增益特性
$\tau(\Omega)$	群延时特性
$X(k)$	序列的 DFT 变换

$r_{xy}(t), r_{xy}(n)$	信号或序列相关
常用变换	
$\text{int}[\cdot]$	取最近整数
$*$	线性卷积, 例 $y(n) = x(n) * h(n)$
$*$	共轭算子, 例 $x(n)$ 的共轭等于 $x^*(n)$
\otimes	循环卷积, 例 $y(n) = x(n) \otimes h(n)$
$\text{Im}[\cdot]$	取信号虚部
$\text{Re}[\cdot]$	取信号实部
$z[\cdot]$	序列 z 变换
$\text{FT}[\cdot], \text{IFT}[\cdot]$	连续傅里叶(逆)变换
$\text{FS}[\cdot], \text{IFS}[\cdot]$	连续傅里叶(逆)级数
$\text{DTFT}[\cdot]$	离散时间序列傅里叶变换
$\text{DFS}[\cdot], \text{IDFS}[\cdot]$	离散傅里叶(逆)级数
$\text{DFT}[\cdot], \text{IDFT}[\cdot]$	离散傅里叶(逆)变换
$\text{FFT}[\cdot], \text{IFFT}[\cdot]$	快速傅里叶(逆)变换
$\text{DCT}[\cdot]$	离散余弦变换
$\text{WHT}[\cdot]$	Walsh-Hadamard 变换
$\text{DHT}[\cdot]$	离散 Hartley 变换
$\text{KLT}[\cdot]$	KLT 变换
随机信号处理	
$X(n), \{X(n)\}$	随机过程或随机信号
R_x	自相关阵
$\hat{x}(n)$	序列 $x(n)$ 的估计
$p(x)$	概率密度
$p(x_1, x_2, \dots, n_1, n_2, \dots)$	联合概率密度
$u(n)$	统计均值 $u(n) = E[x(n)]$
$\sigma^2(n)$	统计方差
$D_x(n)$	统计均方差
$r_x(n_1, n_2), r_{xy}(n_1, n_2)$	相关或互相关
$c_x(n_1, n_2), c_{xy}(n_1, n_2)$	协方差或互协方差

$\Phi(v)$	第一特征函数	$\uparrow L$	L 倍升采样
$\Psi(v)$	第二特征函数	$\downarrow M$	M 倍降采样
$H(X)$	随机信号 $X(n)$ 的熵	STFT[·]	短时傅里叶(逆)变换
$S_x(j\Omega), S_x(e^{j\Omega}), S_x(k)$	功率谱密度	WT[·]	连续小波变换
$B_x(\Omega_1, \Omega_2)$	三阶功率谱	DWT[·]	离散小波变换
$T_x(\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)$	四阶功率谱	其他	
$N(0, \sigma^2)$	零均值、方差 σ^2 的高斯白噪声	R, R^+	实数(大于零)空间
$\overline{x(t)}$	信号时间平均	Z	整数空间
$\langle x(t), y(t) \rangle$	信号内积	L_1	满足 $\int_{-\infty}^{\infty} x(t) dt < \infty$ 的函数空间
Bias[·]	估计偏差	$L^2(R)$	满足 $\int_{-\infty}^{\infty} x(t) ^2 dt < \infty$ 的函数空间
Var[·]	估计方差	\in	属于
Cov[·]	协方差	V_j, W_j	j 尺度空间和小波空间
时变信号处理		\cup, \cap	空间或和空间与
$\psi(t), \psi_{a,r}(t)$	小波函数和小波伸缩 平移	$W_1 \oplus W_2$	空间直和运算
$\phi(t), \phi_{a,r}(t)$	尺度函数和尺度伸缩 平移	$W_1 \perp W_2$	两个空间正交

目 录

前言

本书常用符号说明

第 1 章 数字信号处理基础	1
1.1 模拟信号的采样	3
1.1.1 采样定理	4
1.1.2 带通信号的采样	7
1.2 抗混叠模拟滤波器	9
1.3 模拟信号的恢复与抗镜像模拟滤波	11
1.4 分析信号的截取与扩展	15
1.4.1 分析信号的截取	15
1.4.2 分析信号的扩展	16
1.4.3 时变信号窗函数的滑动	17
1.5 信号的分类与数字信号处理算法之间的关系	18
1.6 数字信号处理的学科范畴与典型应用	19
习题	21
第 2 章 数字滤波器概述	24
2.1 数字滤波器的设计分类	24
2.1.1 频域数字滤波设计	24
2.1.2 时域数字滤波设计	25
2.1.3 同态数字滤波设计	26
2.2 经典数字滤波器的数学模型和性能指标	26
2.2.1 数字滤波器的数学模型	26
2.2.2 数字滤波器的性能指标	27
2.3 经典数字滤波器的实现结构	31
2.3.1 IIR 型数字滤波器的实现结构	32
2.3.2 FIR 型数字滤波器的实现结构	34
2.3.3 数字滤波器的格形结构	37
2.3.4 应用 Matlab 函数实现数字滤波器结构转换	38
习题	40
第 3 章 IIR 型数字滤波器的设计	41
3.1 典型模拟低通滤波器	41
3.1.1 巴特沃思模拟低通滤波器	41

3.1.2	切比雪夫 I 型模拟低通滤波器	44
3.1.3	其他类型模拟低通滤波器	46
3.2	模拟滤波器至数字滤波器的变换	47
3.2.1	响应匹配法	47
3.2.2	双线性变换	50
3.2.3	其他变换	53
3.3	IIR 型数字滤波器的设计过程和频率变换	55
3.3.1	IIR 型数字滤波器的设计过程	55
3.3.2	频率变换	56
3.3.3	二阶 IIR 型数字陷波器和数字谐振器的设计	59
3.3.4	高阶 IIR 型数字滤波器设计	61
3.4	基于函数逼近理论的计算机优化设计法	62
3.4.1	IIR 型数字滤波器的频域优化设计	63
3.4.2	IIR 型数字滤波器的时域优化设计	65
	习题	65
第 4 章	FIR 型数字滤波器设计	69
4.1	线性相位 FIR 型数字滤波器的频率特性	70
4.2	FIR 型数字滤波器的窗函数设计法	73
4.2.1	理想数字滤波器及其单位脉冲响应	73
4.2.2	FIR 型数字滤波器的矩形窗设计法	76
4.2.3	常用窗函数及窗函数设计法	80
4.3	FIR 型数字滤波器的频率采样设计法	88
4.3.1	$ H_d(e^{j\Omega}) $ 至 $H_d(e^{j\Omega})$ 的转换	88
4.3.2	频率采样法	89
4.3.3	频率采样法的改进	91
4.4	FIR 型数字滤波器的优化设计	93
4.4.1	FIR 型数字滤波器的数学模型	93
4.4.2	切比雪夫 (等纹波) 逼近法	94
4.4.3	最小二乘滤波算法	96
	习题	97
第 5 章	离散傅里叶变换	100
5.1	信号的傅里叶分析	100
5.2	有限长序列的离散傅里叶变换 (DFT)	102
5.2.1	频域采样定理	102
5.2.2	DFT 变换	104
5.3	DFT 性质	106
5.4	应用 DFT 变换分析连续非周期信号频谱	107
5.4.1	采样频率和采样长度的选择	108

5.4.2 频谱泄漏和加窗算法	110
5.5 连续周期信号频谱的 DFT 分析	114
5.5.1 硬件同步采样技术	117
5.5.2 软件同步采样技术	118
5.5.3 插值 DFT 变换	119
习题	125
第 6 章 快速傅里叶变换	129
6.1 DFT 变换分析	129
6.1.1 DFT 变换的计算复杂性	129
6.1.2 DFT 变换的对称性和周期性	130
6.1.3 DFT 变换的快速算法	130
6.2 基 2 时间抽取 FFT 算法	131
6.2.1 序列的奇偶抽取	131
6.2.2 基 2 时间抽取 FFT 算法的特性	134
6.2.3 基 2 时间抽取 FFT 算法的程序实现	134
6.3 其他 Cooley-Turkey 类 FFT 算法	135
6.4 实数序列的 FFT 算法	136
6.4.1 两个 N 点实数序列的 FFT 算法	136
6.4.2 单个 $2N$ 点实数序列的 FFT 算法	136
6.5 IFFT 算法	137
6.6 快速卷积和快速相关	138
6.6.1 快速卷积算法	138
6.6.2 快速相关算法	141
6.7 线性调频 z 变换算法	142
6.7.1 DFT 和 z 变换的关系	142
6.7.2 线性调频 z 变换 (CZT) 算法	142
6.7.3 CZT 快速算法	144
6.8 其他离散正交变换	145
6.8.1 DCT 变换	145
6.8.2 DHT 变换	146
6.8.3 WHT 变换	146
6.8.4 DWT 变换和 KLT 变换	146
习题	147
第 7 章 随机信号分析基础	149
7.1 随机信号的描述	149
7.1.1 随机过程的概率密度描述	150
7.1.2 随机过程的低阶统计量描述	151
7.1.3 随机过程的高阶统计量描述	153

7.2 随机过程分类	155
7.2.1 平稳随机过程	155
7.2.2 平稳随机信号的遍历性	157
7.3 功率谱密度函数	158
7.3.1 功率谱密度函数的定义	158
7.3.2 功率谱和自相关函数的关系	159
7.3.3 随机过程的高阶功率谱	161
7.3.4 功率谱的性质和分类	161
7.4 线性系统关于随机信号的响应	162
7.5 相关分析和应用	164
7.5.1 自相关函数的估计偏差	165
7.5.2 自相关函数的估计偏差形成原因	165
7.5.3 自相关函数的估计方差	166
7.5.4 自相关函数的无偏估计定义	166
7.5.5 自相关估计的应用	167
7.6 经典功率谱估计	167
7.6.1 功率谱的周期图法估计	167
7.6.2 功率谱的 BT 法估计	172
7.6.3 周期图估计的相干平均	173
7.6.4 功率谱的多窗估计法	177
习题	179
第 8 章 参数模型功率谱估计	181
8.1 ARMA 模型	181
8.1.1 ARMA 模型功率谱的多重性	182
8.1.2 ARMA 模型的进一步分类	183
8.2 AR 模型的 Yule-Walker 方程及功率谱估计	183
8.2.1 Yule-Walker 方程	183
8.2.2 AR 模型功率谱估计	185
8.2.3 Yule-Walker 方程的 Levesion-Durbin 算法	185
8.3 基于线性预测理论的 AR 模型参数计算	189
8.3.1 线性预测和 AR 模型的关系	189
8.3.2 线性预测误差序列的估计	191
8.3.3 AR 模型参数的 Burg 算法	193
8.3.4 修正的协方差法	194
8.3.5 AR 模型的阶次选择	196
8.4 最大熵估计 ^[16]	197
8.5 谐波模型	199
8.5.1 谐波模型分析	199

8.5.2 基于子空间的功率谱估计	201
习题	203
第 9 章 多采样率数字信号处理	205
9.1 序列信号的采样率变换	205
9.1.1 序列信号的升采样和内插运算	205
9.1.2 序列信号的降采样与抽取运算	208
9.1.3 非整数采样率转换	211
9.2 内插和抽取滤波器的设计和实现	212
9.2.1 内插和抽取数字滤波器的设计	212
9.2.2 内插和抽取数字滤波器的实现	214
9.3 序列信号的子带分解和综合	218
9.3.1 双通道滤波器组及其精确重建	220
9.3.2 双通道 QMF 滤波器组	221
9.3.3 双通道 CQF 滤波器组	222
9.3.4 双通道滤波器组的双正交重建	223
习题	224
第 10 章 信号时频分析	226
10.1 时频分析中的基本概念	228
10.1.1 分析窗的局域化指标	228
10.1.2 不确定性原理	229
10.1.3 谱密度的非相加性	230
10.1.4 瞬时频率和复信号	230
10.1.5 短时相关和时变谱	232
10.2 连续短时傅里叶变换	233
10.2.1 连续 STFT 变换的定义	234
10.2.2 连续 STFT 变换的频域形式	235
10.2.3 连续 STFT 逆变换	236
10.2.4 连续 STFT 变换分析	236
10.3 序列信号的短时傅里叶变换	237
10.3.1 序列信号 STFT 变换的定义	237
10.3.2 序列信号的 STFT 逆变换	237
10.3.3 从滤波角度分析序列 STFT 变换	237
10.4 离散短时傅里叶变换	239
10.4.1 离散 STFT 变换的定义	239
10.4.2 分析窗长度的选择	242
10.5 其他时频分析方法	243
10.5.1 戈勃 (Gabor) 变换 ^[100]	243
10.5.2 二次型时频分布	245

习题	247
第 11 章 连续小波变换	248
11.1 分析窗的尺度伸缩和平移特性	249
11.2 连续小波变换	251
11.2.1 连续小波变换的定义	251
11.2.2 连续小波变换的逆变换	253
11.2.3 小波函数及其特性	254
11.3 连续小波变换的性质	259
11.4 连续小波变换的计算机实现	261
11.4.1 CWT 变换的数值卷积实现	261
11.4.2 应用梅林变换计算 CWT	264
习题	266
第 12 章 离散小波变换	268
12.1 尺度和位移的离散化方法	268
12.2 框架理论 ^[65]	269
12.2.1 框架定义	269
12.2.2 对偶框架和原函数的重建	270
12.2.3 小波框架	272
12.3 小波级数	275
12.3.1 小波级数定义	275
12.3.2 小波分类	276
12.4 二进小波变换	277
12.4.1 二进小波变换	277
12.4.2 二进小波的其他要求	278
12.5 信号的多分辨率分析	280
12.5.1 信号的频域二进剖分	281
12.5.2 多分辨率分析 ^[70]	281
12.6 Mallat 算法和双通道滤波器组	283
12.6.1 信号 $x(t)$ 的多分辨率分解过程	284
12.6.2 信号的重建过程	286
12.7 正交小波和小波滤波器	287
12.7.1 双通道滤波器的精确重建	288
12.7.2 MRA 分析对双通道滤波器组的约束 ^[54]	289
12.7.3 满足 MRA 分析和精确重建的双通道滤波器组的解	289
12.7.4 双正交小波	290
12.7.5 由滤波器组参数推导小波函数和尺度函数	291
12.7.6 离散小波变换的其他方面	294
12.8 离散小波变换的简单应用	294

12.9 信号的小波包分解	296
12.9.1 正交小波包变换	297
12.9.2 正交小波包变换的应用	300
习题	302
附录	304
附录 A 常用 z 变换公式	304
附录 B 教材中用到的主要 Matlab 函数	305
参考文献	312

第 1 章 数字信号处理基础

数字信号处理是当今最具活力的技术。数字信号处理技术在通信、医学、雷达和声纳、石油勘探、音频和语音处理等各方面都得到了广泛的应用。

数字信号处理技术包括硬件技术、数字信号处理算法、数学和相关应用的背景技术等方面。其中，DSP 算法是数字信号处理技术中的核心。本书主要介绍常用数字信号处理算法及其典型应用。

图 1-1 是数字信号处理系统的典型结构框图。

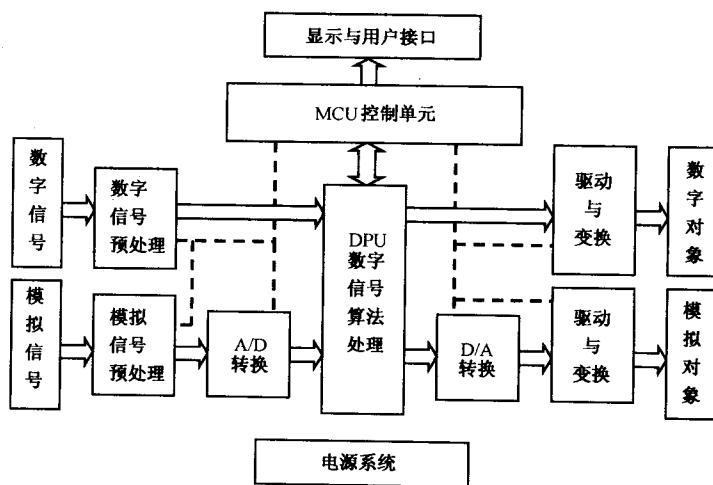


图 1-1 数字信号处理系统的典型硬件结构框图

实际数字信号经过数字信号预处理或传感器电路后，转换成满足 TTL/CMOS 电平标准的标准数字信号。来自于各种传感器输出的模拟信号经过模拟信号预处理电路后，转换成电平范围为 $\pm 5V$ 或 $0 \sim 5V$ 等的标准模拟信号，再经过模数转换器转换成标准的数字信号。信号预处理电路的功能有电平转换、功率变换、光电隔离和抗混叠滤波等。

MCU (Microprogrammed Control Unit) 处理一般由微控制器 (简称单片机)，或者嵌入式控制器 (例如 ARM 系列) 和 CPLD/FPGA 等器件组成，其主要功能是起控制作用，控制信号的采集方式、信号输出方式。另一功能是提供各种接口：用户输入/输出控制面板 (键盘输入和 LCD 显示)，RS232 控制端口，RS485、USB、IR 红外和以太网接入端口等。

DPU (Digital Processor Unit) 是数字信号处理系统的核心, 其主要功能就是按照一定的算法对信号进行快速分析和处理。

数字信号处理系统中, A/D 和 D/A 转换通常由专用集成电路芯片实现。DPU 部分一般由一片或多片专用处理器构成, 其硬件电路由处理器本身的特性决定。

数字信号处理系统中, DPU 和 MCU 部分由较为固定的典型小系统组成, 硬件电路的变化主要在信号预处理和驱动变换部分。实际应用中, 有很多通用的信号源和控制对象, 例如温度测量有专门的温度传感器, 步进马达驱动有专门的步进马达驱动器。因此, 大多数情况下, 可以直接选择专业厂家生产的专业信号预处理模块或信号驱动变换模块。

DPU 的算法处理部分是数字信号处理系统的核心。其关键是针对信号处理的不同要求, 寻找各种有效算法, 然后根据算法编写实现算法的程序代码。这部分的硬件主要是一片或多片核心芯片 (通常是微处理器) 构成, 它可以是一台带通用微处理器的 PC 机, 也可以采用专用 DSP 处理器, 或通用 DSP 处理器 (例如 TI 公司的 TMS 系列, AD 公司的 ADSP 系列等), 或通用微控制器 (例如 MCS 51 系列), 或可编程逻辑器件 FPGA/CPLD, 或设计专用集成电路 ASIC 芯片等。除采用 PC 机外, 选用其他核心芯片时, 均要设计专用硬件电路。

选择不同的核心芯片, 同一算法的实现难度有很大的区别。算法正确性的验证一般首先会在通用 PC 机上进行, 然后按实际需要将其转换成专用 DSP、通用 DSP、MCU、FPGA/CPLD 和 ASIC 芯片等实现。

本教材后续内容并不涉及数字信号处理系统的具体硬件设计, 仅讨论数字信号处理系统中的核心技术——算法, 以及各种算法在 PC 机上的实现与应用。PC 机上的算法实现是 DSP 算法设计的基础, 以后可根据实际需要 will PC 机上的算法移植到不同的 DSP 处理器或 FPGA 器件之中。

进行数字信号处理时, 首先碰到的问题是信号的采样。正确地对信号进行采样, 是信号处理的前提和基础。同一信号, 采用不同的采样技术, 即使采用相同的算法, 也可能得到截然不同的分析结果。每一种数字信号处理算法, 均对信号类型、对信号的采样方式有一定的要求。例如对于周期信号, 采用离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 进行频谱分析时, 在满足 Nyquist 采样定理的前提下, 若能保证同步采样 (采样时间长度是信号周期的整数倍), 则可以精确分析信号的频谱。相反, 若采样是非同步的, 则频谱会产生泄漏, 其分析误差与非同步度、信号的谐波分布和采样长度等均有关系。非同步采样时, 完全不能得到正确的相位特性。如果实际采样不能保证同步采样, 则要根据实际情况, 采用更先进的算法, 尽量减少非同步采样的影响。对于非周期信号的采样, 情况更加复杂, 必须根据实际要求、信号的特点, 合理地对信号进行采样。

根据信号在时域的连续性, 可将其分为模拟信号和数字信号两大类。

图 1-2 是上海证交所某天的分时走势曲线。时间方向以时间分为单位，幅度方向是成交量，单位为手（100 股/手）。横轴和纵轴都是离散量。

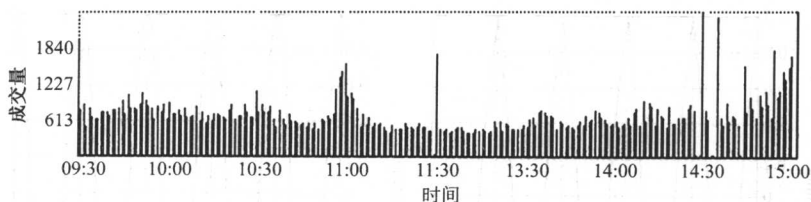


图 1-2 典型的数字信号

数字信号的采样相对简单，其重点考虑是如何选择合适的数据长度，选择典型的数据（信号的特征数据）。

图 1-3 是通过麦克风获得的一段语音信号，它属于模拟信号，其特点是时间方向和同幅度方向均连续。

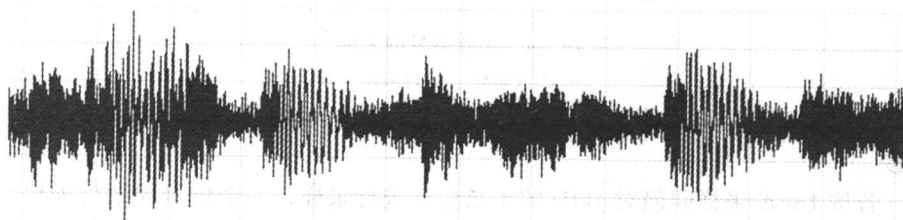


图 1-3 典型的模拟信号

模拟信号的采样相对复杂，现实中最常见的也是模拟信号。以下主要讨论模拟信号的采样技术。

1.1 模拟信号的采样

数字信号在时间方向和幅度方向都是离散的。模拟信号在幅度方向离散化（通常称为量化）时，可通过增加数字系统的字长来逼近实际模拟幅值。例如当字长增加至 64bit 时，可产生 18446744073709551616 级量化（动态范围达 385dB），基本可逼近实际模拟信号。但是，必须注意，当需要用 MCU、DSP、FPGA 等核心器件实现数字信号处理算法时，由于硬件资源的限制，当字长只有 8bit 或 16bit 时，由于字长而产生的量化误差不可忽略。本书不再详细讨论模拟信号的幅度量化误差，有关幅度量化产生的误差分析可参阅文献[29、45、52、76]。

模拟信号在时间方向的离散不但要受到数字系统最高时钟频率的制约，还要受到系统存储容量的限制。

假定系统的最高工作频率 $f_{\text{CLK}} = 1000\text{MHz}$ ，则信号周期仅为 1ns（纳秒）。若