

信号 图象 数字处理

〔日〕有本卓 著

历森梁 译



电子工业出版社

信号·图象数字处理

有本卓 著 厉森梁 译

電子工業出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了信号、图象数字处理的基本原理与技术,着重讨论了图象数字处理,也介绍了数字处理技术在声学、医学以及探矿中的应用。内容包括:信号、图象分析基础、离散数据变换、数字变换、FFT、数字滤波器、快速谱估计、误差分析以及数字处理的实际应用等。综观全书,概念清晰,论述严谨,全书构成一个整体。

本书可供从事数字信号、图象处理的科技工作者、高校教师,以及研究生、高年级学生阅读参考。

0023/28

信号·图象数字处理

有本卓 著 厉森梁 译

责任编辑:梁祥丰

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

山东电子工业印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.25 字数: 305.7 千字

1987年1月第1版 1987年1月第1次印刷

印数: 4500册 定价: 2.90元

统一书号: 15290·80

译 者 的 话

近几年来,随着计算机技术的提高,信号、图象数字处理科学和技术也得到了飞速发展。由于数字处理具有数据便于保存、计算误差可以取得任意小、灵活等优点,因而数字处理在信号、图象处理中占主要地位。

信号、图象数字处理的应用范围极其广泛。其中有医疗用的 x 射线照片的分析处理,例如:脑电图、心电图分析,CT照片的分析处理等,还有从资源卫星来的遥感图象的分析处理,深空探测器接收到的信号的处理,雷达、声纳等信号处理,设计图处理,印刷图象的修补以及石油勘探、地震测量、核试验监测等信号、图象的分析处理,等等。因此,可以说:数字处理科学已成了现代科学技术所不可缺少的重要学科。

日本大阪大学教授有本卓先生在总结多年从事信息数字处理的教学和科研的基础上编写了这本书。其特点是:对快速谱估计、预测理论与误差分析、数论FFT、二维数字信号处理、滤波器的设计与实现等方面都作了精辟的分析;全书结构严密,论述深入浅出,系统而有条理。在介绍基础理论中着重基本概念与数学分析,在介绍各种数字系统时着重设计步骤、方框图和频谱图。对容易混淆的地方都作了特别详细的说明。此外,每章后都列有文献索引,便于读者查阅。

本书对从事信号、图象数字处理的科技工作者以及高校师生、研究生都将有所裨益。但由于本人能力所限,难免会有漏误之处,恳切希望读者批评指正。

最后,感谢陈宗骞、何振亚教授以及出席全国第一届图象处理讨论会的同志们的关心和帮助;感谢对本书作了校阅与许多帮助的华玉玲、胡亚若、苗楠、王革、林英、程山大等同志。

一九八四年三月 北京

作者原序

本书作者着眼于把《数字信号处理》这门新兴的科学技术写成一个较完整的体系。众所周知,《信号处理》起源于实际应用科学,其中主要有:石油资源探测中应用的地震探矿法,语音信号的传输、合成与识别, x 射线与其他射线的断层摄影(或叫层析照相,简称CT)等三种数字处理技术。若细分的话,还可分为声纳和雷达信号处理,遥感图象处理等等。由于《信号处理技术》应用的广泛性与重要性,我们可以断言,作为现代科学所必不可少的数字处理技术,其应用领域必将愈来愈广泛。

《数字信号处理》之所以能形成一个真正独立的体系,其原因有两方面:其一,库雷(Cooley)和图基(Tukey)在1965年提出了离散快速傅里叶变换(FFT);其二,自维纳(Wiener)以来就形成了独立科学领域的信号谱估计和预测理论,影响最大的是根据莱维逊(Levinson)快速算法的自回归模型谱估计。这两个方面也就是数字处理中快速算法的两大支柱。另外,在数字信号处理的基本理论中,引进了自动控制工程中的取样数据控制系统,实际上 Z 变换就是为了阐述取样数据控制系统的输入输出特性而提出的。本书用 Z 变换对连续时间信号频域到离散信号频域的变换作了重新分析,并完成了从模拟滤波器到数字滤波器的变换。与此同时,找到了有限连续时间冲击响应数字滤波器的独特设计方法。至此,数字滤波技术体系的骨架就完整了。

本书在对其他的信号、图象变换、数据压缩等基本原理与技术手法的介绍中,力求系统化的同时,注意到使全书构成一个明显的、具有有机衔接的科学体系。第八章是介绍数字处理的实际应用。在实际应用中,哪一种数字处理技术与设想更有效,本书都作了明确的回答;对于重要的应用问题,作者从原理入手,作了深入浅出的叙述。也就是说,在论述中,对各种各样的实际应

用，照顾到即使不是专家也能对应用的实质有一个清晰的了解。

由于《信号数字处理》是一门跨学科的科学，其范围涉及到不少学科领域。因此，在写本书时，作者既没有为哪一些特定读者而写的打算，也没有作为哪一个特定专业教科书的意图。也就是说，读者的广泛程度是不言而喻的。但是，作者认为，本书作为学术小组轮流讲演与共同讨论用是十分合适的。从这一点出发，作者对容易出问题的地方与结论的出处都尽可能作出明确而详细的说明，并列出了较完整的文献索引。当然，本书也可以作为大学与大学研究生院的教科书与参考书。

由于信号数字处理科学与技术日新月异的发展，加上作者本人才学浅薄，恐怕此书与作者写本书的愿望相差甚远，希望读者读后提出批评与指正，以便再版时更正。

最后，对给予本人许多宝贵指教的大阪大学副教授门田良实先生以及对本书的发行给予许多帮助的产业图书编辑部的先生们表示感谢！

1980年夏 作者

目 录

第一章 信号与图象分析基础

1.1 信号与图象的数学表示	1
1.2 信号分析基础	4
1.2.1 信号全体空间(希尔伯特空间)	4
1.2.2 傅里叶变换	10
1.2.3 取样定理	15
1.2.4 拉普拉斯变换	18
1.3 离散时间信号与 Z 变换	21
1.4 离散傅里叶变换(DFT)	25
参考文献	35

第二章 信号与图象的离散数据变换

2.1 采用取样的离散数据变换	36
2.2 采用傅里叶级数展开的离散化	41
2.3 采用正交多项式展开的离散化	46
2.4 雷德查彻-哈尔-沃尔什变换	53
2.5 图象的离散数据变换	59
2.5.1 采用取样的变换	59
2.5.2 采用正交函数展开的图象离散化	67
2.5.3 采用卡南-洛伊夫(KL)展开的图象离散化	69
2.6 图象离散化技术	76
2.6.1 平均取样法	76
2.6.2 傅里叶级数展开法	77
参考文献	80

第三章 信号与图象的数字数据变换

3.1 模/数(A/D)变换	82
----------------	----

3.1.1 脉码调制(PCM)变换	82
3.1.2 增量调制(DM)变换	87
3.1.3 差值脉码调制(DPCM)变换	89
3.1.4 最佳量化	89
3.1.5 编码	93
3.2 二维图象阵的正交变换	96
3.3 数据压缩	102
3.3.1 直线内插法	102
3.3.2 预测编码法	104
3.3.3 帧间编码方式	108
3.4 信息率失真理论	109
参考文献	117
第四章 快速傅里叶变换	120
4.1 DFT 的快速算法(FFT)	120
4.2 数论的 FFT 算法	128
4.3 卷积的快速算法	134
4.4 相关函数的快速算法	141
4.5 沃尔什-阿达玛变换(WHT)的快速算法	145
4.6 n 维 DFT 的快速算法(n 维 FFT)	148
参考文献	153
第五章 数字滤波器	157
5.1 有限冲激响应(FIR)数字滤波器的性质	158
5.2 FIR 滤波器的设计方法与实现	165
5.2.1 根据傅里叶级数展开的设计方法	166
5.2.2 根据窗函数的设计方法	168
5.2.3 根据频率取样的设计方法	171
5.2.4 FIR 滤波器的实现	174
5.3 无限冲激响应(IIR)数字滤波器的性质	178
5.4 无限冲激响应(IIR)数字滤波器的设计方法与实现	181
5.4.1 模拟滤波器	182

5.4.2	根据 S - Z 变换的设计方法	186
5.4.3	直接设计法	191
5.4.4	IIR 滤波器的实现	194
5.4.5	频率变换	197
5.5	二维数字滤波器	199
5.5.1	二维滤波器的性质	199
5.5.2	二维数字滤波器的设计方法	203
	参考文献	207
第六章	快速谱估计	213
6.1	时间序列信号的预测与模型化	213
6.2	AR模型的系数估计	216
6.3	AR模型系数估计的快速解法	219
6.3.1	标准方程式的快速解法	219
6.3.2	快速解法与AR模型的稳定性	223
6.4	ARMA系数的估计法(成形滤波器)	228
6.5	多变量谱估计	238
	参考文献	242
第七章	数字处理的误差分析	246
7.1	谱估计的误差分析	246
7.2	基本演算的误差	252
7.3	FFT算法的误差分析	257
7.4	数字滤波器的误差分析	264
	参考文献	270
第八章	数字处理的实际应用	273
8.1	谱估计的实际应用	274
8.1.1	数据预处理	274
8.1.2	相关函数的计算	276
8.1.3	功率谱的计算	279
8.1.4	AR模型的次数决定法	282
8.2	语音信号的数字处理	283

8.2.1 语声产生结构与模型化	283
8.2.2 线性预测模型	291
8.2.3 声音的短时间分析	294
8.3 图象再生的数字处理	297
8.3.1 拉德恩(Radon)图象 再生公式	297
8.3.2 x 射线扫描 方式	302
8.3.3 图象再生的数字算法	304
8.4 物理探矿法的数字处理	310
8.4.1 速度分析	311
8.4.2 反卷积	312
8.4.3 徙动	315
参考文献	319
附录 A 中国剩余定理(孙子定理)	327
B 欧几里得 辗转相除法	331
C 儒歇定理	333
D 随机过程	334
E 希尔伯特变换	337
索引	340

第一章 信号与图象的分析基础

为了使信号和图象能用计算机来处理，我们必须把信号与图象的物理量以数字形式表示；也就是说，将信号和图象转换成一串离散的数字量。为此，就必须进行傅里叶级数展开和正交变换。本章是进入讲信号和图象数字处理前的准备章节，以后几章将重点介绍傅里叶变换、取样定理、正交函数展开、Z变换、离散傅里叶变换等数学手段。

1.1 信号与图象的数学表示

为了能用数字计算机或数字处理机来处理信号和图象，就必须把原始的信号和图象转换成计算机硬件能处理的一串数字量。为此，首先必须给变换后的信号与图象的数字量下一数学定义。

如图 1.1.1 所示，我们把取实数值的时间 t 的连续函数 $x(t)$ 称为信号，并以 Δt 为取样周期，对信号 $x(t)$ 进行取样，所得的数列为

$$\cdots x(-\Delta t), x(0), x(\Delta t), x(2\Delta t), \cdots \quad (1.1.1)$$

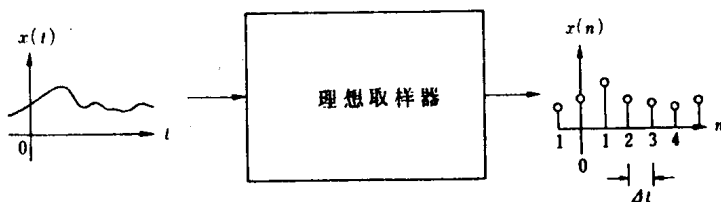


图1.1.1 理想取样器功能

我们把这种取样称为“理想取样”(参照图 1.1.1)。我们为上述数列简单起见,可简写成

$$\cdots x(-1), x(0), x(1), x(2), \cdots \quad (1.1.2)$$

或者是

$$x(n), \quad n = \cdots -1, 0, 1, 2, \cdots \quad (1.1.3)$$

我们把上面的数列称为信号 $x(t)$ 的离散时间信号(或叫取样数据信号)。

离散时间信号 $x(n)$ 是一个由连续时间信号 $x(t)$ 得出的理想化的数学表示。分析时,该形式就很方便。实际上,一般把时间序列信号(如图 1.1.2 所示)用 A/D 变换器转换成数字信号,然后再进行数据处理。这里,我们考虑的 A/D 变换器是由理想取样器和量化器组成的,并假设量化器具有这样的功能,即按一定的规则把模拟量 $x(n)$ 用数字量 $x^*(n)$ 来近似表示。而理想取样是以时间轴进行离散的,并且假设进行 A/D 变换时所产生的误差只在量化时有影响。另外,对于量化功能与误差的关系

$$e(n) = x^*(n) - x(n) \quad (1.1.4)$$

将在 3.1 节中再作详细的介绍。

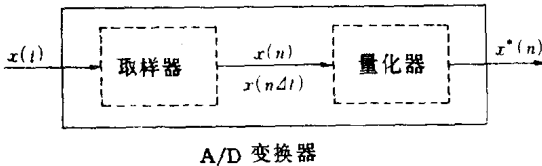


图1.1.2 A/D 变换器的功能

实际上,在计算机中的数据处理是数字量 $x^*(n)$ 。但在分析时,我们用 $x(n)$ 却方便得多。因此,对于分析与实际数据间的误差就必须由误差分析来弥补。

一个以时间 t 的连续函数为元素的矢量值信号

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{bmatrix} \quad (1.1.5)$$

如果以同一取样周期使它在整个坐标轴上离散化时，则可与标量值信号相同的处理。

图象信号和只有一个独立变量的时间序列信号不同，其特点是：它是一个以平面上的点作为独立变量的函数。例如：黑白图象与灰色图象是以浓淡变化在二维平面情况下〔这里用点 (x, y) 来表示〕的函数 $u(x, y)$ 来表示。但是，若是彩色图象时，其特点是以几种原色的明暗度的矢量值函数来表示。

$$u(x, y) = \begin{bmatrix} u_1(x, y) \\ u_2(x, y) \\ \vdots \\ u_m(x, y) \end{bmatrix} \quad (1.1.6)$$

推广到一般情况时，我们把 γ 个独立变量的 m 维矢量函数

$$u(x_1, x_2, \dots, x_r) = \begin{bmatrix} u_1(x_1, x_2, \dots, x_r) \\ u_2(x_1, x_2, \dots, x_r) \\ \vdots \\ u_m(x_1, x_2, \dots, x_r) \end{bmatrix} \quad (1.1.7)$$

称为 γ 维图象。为简单起见，我们把 $\gamma=2$ 的二维图象称为图象。在本节中，除个别容易混淆的地方特别指出外，所指的图象全是采用标量值的二维图象。

一幅图象，若经过取样、量化以后就变成由数字值组成的集。我们把由这些数字量按二维空间中的原图象对应排列成的数列称为阵。作成阵的最普通的方法，是先对二维空间中的 x 坐标和 y 坐标分别以取样间隔 Δx 、 Δy 进行取样，然后对各点的浓淡值进行量化，最后就得到了一组数字量

$$u(n, m) = u^*(n\Delta x, m\Delta y) \quad (1.1.8)$$

但是，实际上对于 $u(n, m)$ 值来讲，在大多数的情况是取点 $(n\Delta x, m\Delta y)$ 附近的浓淡值的平均数，然后再进行量化，最后得到近似

的数字值。我们把这样的 $u(n, m)$ 称为像素，而把这种二维集的阵称为图象阵。若量化级只有 0 和 1 两级时，则所得的数字图象阵是黑白的。若量化级为多级时，则为灰色的。我们把二维空间中

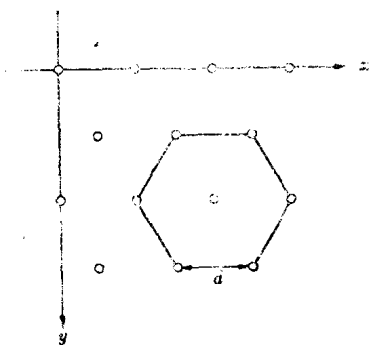


图 1.1.3 六角形阵

中各坐标进行等间隔取样所得的阵称为长方形阵。在特殊情况下，即 $\Delta x = \Delta y$ 时，我们把它称为正方形阵。若取正方形阵时，则水平方向与垂直方向的相邻两个像素的两点间距离相等，即 $d = \Delta x = \Delta y$ ；两对角线方向的相邻两个像素的两点间距离为 $d = \sqrt{2} \Delta x = \sqrt{2} \Delta y$ 。如图 1.1.3 所示，该二维阵中，其相邻像素的

两点间距离全部相等，我们把这种二维阵称为六角形阵。

1.2 信号分析基础

1.2.1 信号全体空间（希尔伯特空间）

本书要介绍的是：经过取样而离散化的模拟信号、数字信号及数字图象阵的数字处理。由于我们把这些信号及图象阵都看作是其连续时间信号或连续图象的近似，因此，我们首先要讲的是数字处理的概念。但是，在本节中我们既要避免网罗全部概念，又要对以后章节用到的必要的概念有明确的交待。所以，对于连续时间信号分析比较生疏的读者，可先跳过这一节，先读后面必要章节，回过头来，再读这一节。

上节中，我们假定信号是一个时间 t 的连续函数。假定的目的是为了在时间轴上取样时避免混乱。本节我们要讨论包括不连续信号等更广泛的函数集。

现有一个定义在时间区间 $T = (a, b)$ 的函数 $x(t)$ ，当

$$\begin{aligned}\|x\|^2 &= \int_T x^2(t) dt = \int_a^b x^2(t) dt \\ &< \infty\end{aligned}\quad (1.2.1)$$

时， $x(t)$ 在区间 T 上是平方可积的，或者说， $x(t)$ 具有有限功率。我们把 $\|x\|$ 称为 $x(t)$ 的模方。在区间 T 上的平方可积函数 $x(t)$ 的全体集合用 $L^2(T)$ 来表示。对于 $L^2(T)$ 的任意两个函数 $x(t)$ ， $y(t)$ ，则式

$$\begin{aligned}\left| \int_T x(t)y(t) dt \right| &\leq \left\{ \int_T x^2(t) dt \right\}^{1/2} \left\{ \int_T y^2(t) dt \right\}^{1/2} \\ &= \|x\| \cdot \|y\|\end{aligned}\quad (1.2.2)$$

成立。并把上式称为许瓦兹不等式。由此，对 $L^2(T)$ 的任意两个函数 $x(t)$ ， $y(t)$ 和任意两个实数 α ， β ，则有

$$\int_T |\alpha x(t) + \beta y(t)|^2 dt < \infty \quad (1.2.3)$$

即

$$\alpha x(t) + \beta y(t) \in L^2(T) \quad (1.2.4)$$

很明显， $L^2(T)$ 是线性矢量空间。因此，对于式 (1.2.1) 的模方，有下列性质：

- 1) $\|x\| \geq 0$ 。当 $\|x\| = 0$ 的话，必须 $x(t) = 0$ (处处为零)
- 2) α 为实数时， $\|\alpha x\| = |\alpha| \cdot \|x\|$
- 3) $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$

最后一个式子，称为三角不等式。由此而称 $L^2(T)$ 为线性模方空间。另外，若对于 $x(t)$ ， $y(t) \in L^2(T)$ ，定义

$$d(x, y) = \|x - y\|$$

把 $d(x, y)$ 看作函数 $x(t)$ ， $y(t)$ 之间的距离，则满足下列公理：

D_1) $0 \leq d(x, y) < \infty$ 。 $d(x, y) = 0$ 的话，则 $x = y$ (处处相等)

$$D_2) \quad d(x, y) = d(y, x)$$

$$D_3) \quad d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$$

把不等式 D_3) 称为三角不等式。这样一来, 很明显, $L^2(T)$ 也存在距离空间。

对于任意 $x(t), y(t) \in L^2(T)$, 则定义其内积为

$$(x, y) = \int_T x(t)y(t)dt \quad (1.2.5)$$

右边的积分由许瓦兹不等式 (1.2.2) 可知, 是有界的, 内积也有意义。它满足下列公理:

$$I_1) \quad (x, y) = (y, x)$$

$$I_2) \quad (x + y, z) = (x, z) + (y, z)$$

$I_3)$ 若 a 为实数, 则有

$$(ax, y) = a(x, y)$$

$I_4) \quad (x, x) \geq 0$; 但是当 $(x, x) = 0$ 时, $x(t) = 0$ (处处相等)。即: $L^2(T)$ 是内积空间。

从距离空间中取无限序列 $\{x_n(t), n = 1, 2, \dots\}$ 时, 对于任意的 $\varepsilon > 0$, 总存在某个正整数 $n_0(\varepsilon)$, 对于所有的 $n, m \geq n_0(\varepsilon)$, 则不等式

$$d(x_n, x_m) < \varepsilon \quad (1.2.6)$$

成立。这时, 我们把 $\{x_n\}$ 称为柯西序列。另外, 无限序列 $\{x_n(t)\}$ 中的函数 $x(t) \in L^2(T)$, 对于任意的 $\varepsilon > 0$ 存在某个正整数 $n_0(\varepsilon)$, 对于所有的 $n \geq n_0(\varepsilon)$, 不等式

$$d(x_n, x) < \varepsilon \quad (1.2.7)$$

成立。这时则称 $x(n)$ 收敛于 x , 并写成

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n(t) = x(t) \quad (\text{a.e.}) \quad (1.2.8)$$

若 $\{x(n)\}$ 在 x 上收敛, 因为由距离公理的三角不等式可得

$$d(x_n, x_m) \leq d(x_n, x) + d(x_m, x) \quad (1.2.9)$$

所以 $\{x_n\}$ 很明显是一个柯西序列。但是，从普通的距离空间 $\mathcal{L}$ 中取柯西序列时，尽管它在某点 x 上收敛，其收敛以前的 x 未必在原空间 $\mathcal{L}$ 上。即，在该空间中，柯西序列未必是常收敛的。因而，把像柯西序列那样的全收敛的距离空间称为是完备的。对于不完备的距离空间，只要附加柯西序列的收敛点就可使其完备化，关于这方面的详细情况可参看数学书。采用函数分析表示的场合，我们已知道线性模方空间 $L^2(T)$ 是一个完备的距离空间。作为距离空间，我们把完备的内积空间称为希尔伯特空间。因而， $L^2(T)$ 是一个希尔伯特空间。

希尔伯特空间 $L^2(T)$ 的无限序列 $\{\varphi_n(t), n=1, 2, \dots\}$ 满足式

$$\int_T \varphi_n(t) \varphi_m(t) dt = \delta_{nm} \quad (1.2.10)$$

时，这就是所谓标准正交系。其中 δ_{nm} 是克罗内克符号，定义为

$$\delta_{nm} = \begin{cases} 1 & n=m \\ 0 & n \neq m \end{cases} \quad (1.2.11)$$

对于任意函数 $x(t) \in L^2(T)$ ，则称

$$a_i = (x, \varphi_i) = \int_T x(t) \varphi_i(t) dt \quad (1.2.12)$$

为 $x(t)$ 的标准正交系 $\{\varphi_n(t)\}$ 的展开系数。标准正交系的部分序列 $\{\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_n(t)\}$ 的线性结合

$$x_n(t) = \alpha_1 \varphi_1(t) + \alpha_2 \varphi_2(t) + \dots + \alpha_n \varphi_n(t) \quad (1.2.13)$$

的全体集合在 $L^2(T)$ 中构成有限维部分空间 R^n 。由所给的函数 $y(t) \in L^2(T)$ 所作成的函数

$$y_n(t) = \sum_{i=1}^n (y, \varphi_i) \cdot \varphi_i(t) \quad (1.2.14)$$