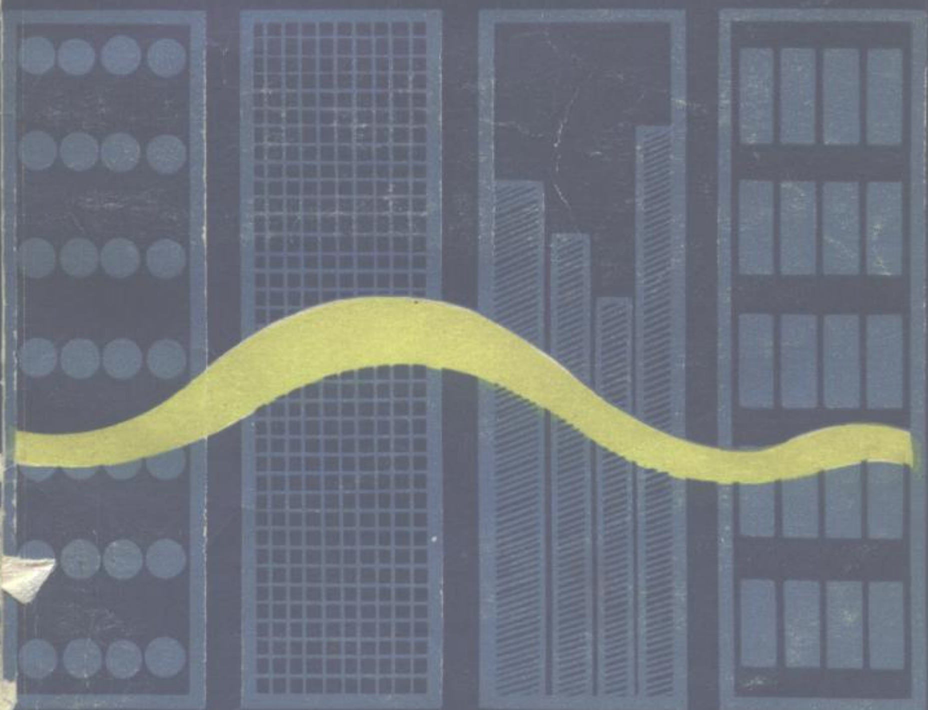
信号分析

〔美〕A. 帕普里斯 著



科学出版社

信号分析

〔美〕A. 帕普里斯 著

毛培法 译

科学出版社

1981

内容简介

本书是为无线电专业研究生写的有关信号分析理论的教材．全书共有十二章，分三部分．第一部分（包括一至五章）介绍信号、系统及变换等方面的基础知识，内容有导论、离散系统、傅里叶分析、连续系统及模拟信号的数字处理等．第二部分（包括六至八章）是选题，内容有带限函数、因式分解、窗、希尔伯特变换、频率调制、不定性及模糊函数等．第三部分（包括九至十二章）介绍噪声干扰下的信号检测和估值问题，内容有随机过程、数据平滑、各态历经性、相关估值、随机信号的傅氏变换及频谱估值等．

读者对象为通讯、雷达、自控、计算机、电子对抗等专业的研究生、大专院校教师及科研人员．

A. Papoulis

SIGNAL ANALYSIS

McGraw-Hill, 1977

信 号 分 析

〔美〕A. 帕普里斯 著

毛培法 译

*

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

*

1981年2月第一版　开本：850×1168 1/32

1981年2月第一次印刷　印张：15 3/4

印数：0001—6,840　字数：412,000

统一书号：15031·330

本社书号：2037·15—7

定价：2.90元

译 者 序

我们周围的一切都处在不停的运动之中，一切运动或状态的变化，广义地说都是一种信号，它们传递着各种不同的信息．人类认识和改造自然就是从获取信号开始，经过去伪存真、去粗取精、由表及里、由此及彼的分析处理才达到最终目的．例如，哥白尼通过对天体运动的观察和分析才建立起太阳中心说．人类在认识和改造自然的过程中还学会了用信号传递信息，这一方面我们已经很熟识．信息科学与人类的关系如此密切，它在我们认识和改造自然的斗争中如此重要，所以人们称它为现代科学的三大支柱之一，并把未来的社会称为信息社会．

虽然人类利用信号获取和传递信息已有很久的历史，但信号理论的建立基本上是在第二次大战以后．信号理论涉及的面很广，内容十分丰富，从大的方面来说大致可以分为两部分：（1）信号分析，研究信号的解析表示、信号有用性质的数值特征、信号的变换及处理等；（2）信号综合，根据一定的要求设计或选择最佳的信号形式．应该说，这两方面内容虽有区别，但它们又是互有联系、相互制约的．例如，雷达脉冲压缩就同时涉及信号设计与信号处理（匹配滤波）两个互相制约的问题．

最近十多年来，由于电子计算机及数字技术的迅速发展，信号理论的研究和应用取得了很大的进展．它的应用范围已远远超过了无线电通信、雷达、控制、测量、声纳等传统的领域，并正在不断地扩大，今天大至天文、气象、海洋、地震及石油勘探，小至晶体、生物细胞及基本粒子等学科的研究，都涉及到信号理论．因此，国外的许多理工科院校都开设这方面的课程，使学生适应未来研究工作的需要．我国在这方面的研究工作也正在开展，为了便于学习国外的有益经验，我们翻译了 A. 帕普里斯教授著的《信号分析》一书．

A. 帕普里斯教授研究信号理论已多年，写过百余篇论文和四本著作，《信号分析》是他于 1977 年写成的新著. 他的书有叙述简明、推理严谨、概念清楚等特色，因此不仅美国国内有不少高等院校选它作教材或教学参考书，而且先后被译成日、俄、意、波等国文字，受到许多国家学术界的重视. 《信号分析》这本书虽然主要是为无线电类专业的研究生写的，但对从事系统工程、石油勘探、地震、射电天文学、光学、声学、力学、生物工程及核物理等领域研究工作的科技人员也有参考价值.

在这本书里，有少量较浅显的定理和公式作者未作详细推导，有的只给出结论. 我们认为，把这些问题留给读者自己证明，对启发他们主动钻研问题，锻炼分析问题的能力是有益的. 原书在这些问题的后面还加注“细推”二字，但在译文里我们把它省去了，因为读者可以根据自己的需要来决定. 事实上，我们学习各种数学分析较多的书都应多推导多思考，否则很难学好.

在本书的翻译过程中，曾得到清华大学常迵教授及西北电讯工程学院许多同事的热情帮助和指教，对此表示衷心感谢. 由于译者水平有限，书中的错误难免，敬请读者批评指正.

译 者

于1979年春节

前　言

教育家一般认为，若在大学教育中使工科学生除精通本专业外还掌握更广的知识，那就为他们适应未来的需要作了最好的准备．《信号分析》就是为此目的而设置的这类重要课程之一，它有完整的理论和广泛的应用领域．因此，本书适用于天文学、海洋学、结晶学、生物工程、天线设计、通讯技术、系统理论、计算机科学及其它许多学科．

在这个丰富多彩的主题中，我选定几个与傅里叶变换和线性系统有关的课题，简要地加以扩展，作为本书的主要内容．

书中的绝大多数结论，都是由少数基本概念经严格推导而得出的．但是，在有些场合我只给出与某些熟悉的概念有关的类似结果．这种为了简洁而牺牲一定的严格性的做法是不罕见的，即使在纯数学研究中也有这种情况，例如，约当曲线定理通常就被当作自明之理——公理来看待．

本书的材料分成既自成体系又互相联系的三部分．各部分的难度基本相同，但讨论的深度却随各部分内容的重要性或新颖与否而有所不同．在推导欠细致的地方，我在其后面括号内注有“细推”二字．

在这本书里，还列入几个应用课题，其中有些是新的．但作为一个教师，我着重考虑的还是一些重要的基本概念，而不是各种专题．

在筹划本书原稿时，我曾与许多学生和同事进行多次讨论并从中得到有益的启发．这里，我特别应当感谢 R. Haddad, A. E. Laemmel 和 D. C. Youla 几位教授．另外，我还要感谢 U.C.L.A. 的 G. Temes 教授提出的批评和建设性意见．

A. 帕普里斯

目　　录

第Ⅰ部分　信号、系统及变换

第II部分 选 题

第III部分 数据平滑和频谱估值

第Ⅰ部分　信号、系统及变换

在这一部分，我们以离散与模拟*的平行关系及数字滤波器在模拟信号处理中的作用为重点，展开对离散及连续系统理论、傅氏变换**、z 变换等课题的讨论.

我们把系统定义为由集合 F（输入）至集合 G（输出）的映射（变换）. 若元 F 及 G 都是变量的连续函数，则系统是连续的或模拟的. 若元 F 及 G 都是数字序列，则系统是离散的或数字的. 这里，我们将分别从傅氏变换和 z 变换两个不同的角度导出系统的本征值(系统函数).

这部分材料是纽约工艺学院低年级研究生一学期的课程内容. 要求学生具备普通微积分及电路理论方面的基础知识.

第一章　引　　论

在这一章，我们简要介绍离散系统和连续系统理论的基本概念.

1-1 节，介绍离散系统的线性定义，建立线性系统的端点特性***与卷积之间的关系,并引入 z 变换情况下的系统函数[1]. 1-2 节再讨论连续系统和傅氏变换[2]. 1-3 节阐明用数字系统模仿****模拟系统的原理.

---

* 模拟信号(系统)与连续信号(系统)同义，前者多见于电路技术书上，后者多见于数学书上,本书两者兼有.——译者注

** 全名为傅里叶变换 (Fourier transform). 在本书中，除章、节、目的标题用全名傅里叶变换外,为了叙述方便,正文里简称其为傅氏变换.——译者注

*** 这里所说的端点特性是指输入输出关系,有的书上称其为端口特性.——译者注

**** Simulation 可以译为模仿或模拟，为了区别于 analog（模拟)，以免出现将 Simulation of analog systems 译为“模拟系统的模拟”这种含义不清的概念，今将 Simulation 译为模仿.——译者注

上述内容，在以后的有关章节中我们还要进一步阐述。

1-1　离散信号及系统

符号 $f[n]$ 表示一个对每个**整数** n 定义的实数（或复数）序列。如果 n 表示离散时间，那我们就把序列 $f[n]$ 称为**离散信号**或**数字信号**。

下面是两个常用的特殊序列（图 1-1）：

阶跃序列　　　$U[n]=\begin{cases}1, & n\geqslant 0,\\ 0, & n<0.\end{cases}$

δ-序列　　　$\delta[n]=\begin{cases}1, & n=0,\\ 0, & n\neq 0.\end{cases}$

顺便指出，当 $n=3$ 时 $\delta[n-3]=1$；当 $n\neq 3$ 时 $\delta[n-3]=0$。对于任意的 k，有

$$\delta[n-k]=\begin{cases}1, & n=k,\\ 0, & n\neq k.\end{cases}\qquad (1\text{-}1)$$

和前面一样，这里的 n 为离散时间，k 为常数。

由式(1-1)可知，任何序列 $f[n]$ 都可以写成加权的 δ-序列之和：

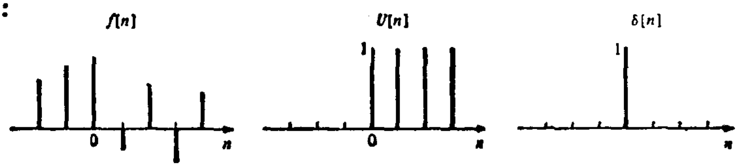


图　1-1

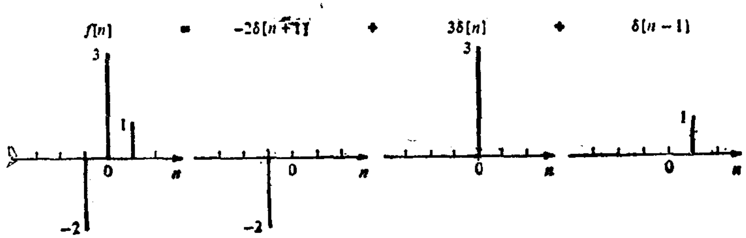


图　1-2

$$f[n]=\sum_{k=-\infty}^{\infty} f[k]\delta[n-k], \qquad (1\text{-}2)$$

图 1-2 说明上述关系。

离散系统

离散系统起到使序列 $f[n]$ 转化为序列 $g[n]$ 的作用． 因此，从数学观点来看，离散系统是序列 $f[n]$ 至序列 $g[n]$ 的映射（变换）．我们用符号

$$g[n]=L\{f[n]\}$$

来表示这个映射． 序列 $f[n]$ 称为输入；序列 $g[n]$ 称为输出或响应(图 1-3)。

图 1-3

在一般情况下，要决定某指定 n 所对应的输出 $g[n]$，必须已知输入 $f[n]$ 对每个 n (过去及未来)的值.然而，我们以后将阐明，在某些情况下这个要求可以省去.

例 1-1

(a) $g[n]=f^2[n]$． 这是一个非线性系统，其输出的当前值 $g[n]$ 只决定于 $f[n]$ (无记忆)．

(b) $g[n]=nf[n]$． 这是一个线性、无记忆、变参数系统．

(c) $g[n]=2f[n]+3f[n-1]$． 其输出的当前值 $g[n]$ 决定于 $f[n]$及前面的值$f[n-1]$． 这是有一定记忆的系统．

例 1-1 都是非递归系统，其输出 $g[n]$ 直接用输入 $f[n]$ 表示．

例 1-2

$$g[n]+2g[n-1]=f[n].$$

在这个例子中，要求出 $g[n]$ 不仅需要知道 $f[n]$，还需要知道 $g[n-1]$． 所以，必须解递归方程才能求出 $g[n]$． 因为对每个 n 就有一个方程，n 又是无限的，于是，我们遇到了有关解无穷个方

程组的问题．以后将证明，在某些条件（因果关系）下，这个方程有唯一的解，因此，它们定义一个系统（递归系统）．

下面是两个常用的简单系统：

迟延元件　　$g[n]=f[n-1]$,

乘法器　　$g[n]=af[n]$,

这两个系统可以用图 1-4 的方框图来表示．其中三角形内的字母 a 表示乘法器的增益．迟延元件方框内的符号 z^{-1}（系统函数）的含义，下面即将加以说明．

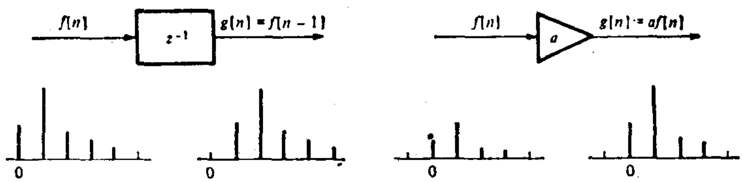


图 1-4

以后，我们将证明，任何线性系统都可以用迟延元件和乘法器组成． 为了说明这个问题，图 1-5 提供了实现 $g[n]=2f[n]+3f[n-1]$的组成方框图．

线性　若系统 L 对任意 a_1, a_2, $f_1[n]$ 及 $f_2[n]$ 有以下性质：

$$L\{a_1f_1[n]+a_2f_2[n]\}=a_1L\{f_1[n]\}+a_2L\{f_2[n]\},\quad (1\text{-}3)$$

则称其为线性系统．

由上述定义可知，线性系统对 $af[n]$ 的响应为 $ag[n]$． 并且，若 $g_1[n]$ 和 $g_2[n]$ 分别为对 $f_1[n]$ 和 $f_2[n]$ 的响应，则系统对$f_1[n]+f_2[n]$ 的响应为 $g_1[n]+g_2[n]$．

恒参数系统　若系统 L 对任意 k 有以下性质：

$$L\{f[n-k]\}=g[n-k],\quad (1\text{-}4)$$

则称其为恒参数系统． 用话来说就是：对于恒参数系统，输入有一位移必使输出有同一位移．

例 1-3

(a)　$g[n]=|f[n]|$是一个非线性恒参数系统．

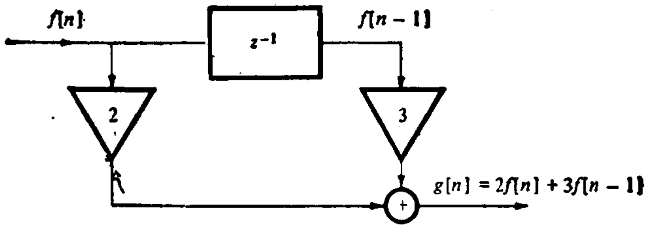


图 1-5

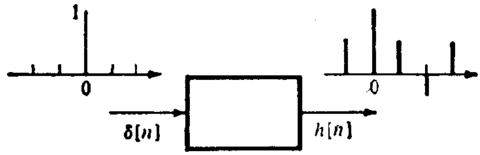


图 1-6

(b) $g[n]=nf[n]$ 是线性变参数系统，因为它对 $f[n-k]$ 的响应是 $nf[n-k]$，而不是 $g[n-k]=(n-k)f[n-k]$.

(c) $g[n]=2f[n]+3f[n-1]$ 是一个线性恒参数系统.

我们约定，以后凡提到"线性系统"或简称"系统"时，都是指线性恒参数系统.

系统的 δ-响应 我们用 $h[n]$ 表示系统对 δ-序列 $\delta[n]$ 的响应(图 1-6):

$$L\{\delta[n]\}=h[n]. \tag{1-5}$$

应当指出，我们并不要求 $n<0$ 时序列 $h[n]$ 一定是零. 然而，如果 $n<0$ 时，

$$h[n]=0, \tag{1-6}$$

那我们就称它为**因果系统**.

例 1-4

$$g[n]=2f[n]+3f[n-1].$$

在本例中，$g[n]$ 直接用 $f[n]$ 表示，这是一个非递归系统. 所以，令 $f[n]=\delta[n]$，我们就可求出它的 δ-响应 $h[n]$:

$$h[n]=2\delta[n]+3\delta[n-1].$$

例 1-5

$$g[n]=f[n]+\frac{1}{2}f[n-1]+\cdots+\left(\frac{1}{2}\right)^k f[n-k]+\cdots. \qquad (1\text{-}7)$$

仿照例 1-4，我们得

$$h[n]=\delta[n]+\frac{1}{2}\delta[n-1]+\cdots+\left(\frac{1}{2}\right)^k\delta[n-k]+\cdots$$

$$=\begin{cases}\left(\frac{1}{2}\right)^n, & n\geqslant 0,\\ 0, & n<0.\end{cases}$$

即

$$h[n]=\left(\frac{1}{2}\right)^n U[n].$$

例 1-6 求下列因果系统

$$g[n]-\frac{1}{2}g[n-1]=f[n] \qquad (1\text{-}8)$$

的 δ-响应 $h[n]$。

由式(1-5)及式(1-6)得

$$h[n]-\frac{1}{2}h[n-1]=\delta[n], \quad n \text{ 为所有的值,}$$

及

$$h[n]=0, \quad n<0.$$

令 $n=0,1,\cdots$，并注意到 $h[-1]=0$，我们得

$n=0$： $h[0]=1$，

$n=1$： $h[1]-\frac{1}{2}h[0]=0$，$h[1]=\frac{1}{2}$，

$n=2$： $h[2]-\frac{1}{2}h[1]=0$，$h[2]=\left(\frac{1}{2}\right)^2$.

在一般情况下，当 $n>0$ 时 $h[n]=\frac{1}{2}h[n-1]$. 经过简单的归纳，我们得

$$h[n]=\left(\frac{1}{2}\right)^n U[n]. \qquad (1\text{-}9)$$

在第二章，我们将介绍决定 $h[n]$的简易方法. 图 1-7 表示实现上述系统的方框图.

我们注意，式(1-7)和式(1-8)两系统的 δ-响应 $h[n]$ 是相同的；因此它们是相互等效的. 这就是说，对同一输入它们产生相同

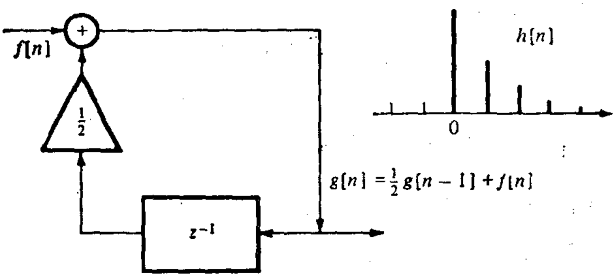


图 1-7

的响应[见式(1-11)]. 式(1-7)是一个非递归系统,要实现这个系统需用无限个迟延元件. 式(1-8)是一个递归系统,实现这个系统只要用一个迟延元件就可以了.

离散卷积 现在要用 $h[n]$ 和 $f[n]$ 来表示线性系统对任意输入 $f[n]$ 的响应 $g[n]$.

这里，由于 k 为任何值时系统对 $\delta[n-k]$ 的响应都等于 $h[n-k]$(根据恒参数的定义),即

$$L\{\delta[n-k]\}=h[n-k], \tag{1-10}$$

因此,系统对 $f[k]\delta[n-k]$ 的响应为 $f[k]h[n-k]$(根据线性). 由以上及式(1-2)得出

$$g[n]=L\{f[n]\}=\sum_{k=-\infty}^{\infty}f[k]L\{\delta[n-k]\}$$

$$=\sum_{k=-\infty}^{\infty}f[k]h[n-k].$$

这最后的和式就是 $f[n]$ 与 $h[n]$ 的离散卷积. 这个运算通常用 $f[n]*h[n]$ 来表示. 显然,它是满足交换律的. 于是,我们可得下列重要的关系式:

$$\begin{aligned}g[n]&=f[n]*h[n]\\&=\sum_{k=-\infty}^{\infty}f[k]h[n-k]\\&=\sum_{k=-\infty}^{\infty}f[n-k]h[k],\end{aligned} \tag{1-11}$$

例 1-7 已知

$$h[n]=\left(\frac{1}{2}\right)^{n}U[n],$$

$$f[n]=U[n]-U[n-4]=\begin{cases}1, & 0\leqslant n<4,\\ 0, & n\text{ 为其它.}\end{cases}$$

求 $g[n]=f[n]*h[n]$ 在 $n=2$ 及 $n=5$ 处的值.

为了求 $g[2]$，将 $f[k]$ 乘以 $h[2-k]$ 并对所有的 k 求和，如图 1-8(a) 所示，我们得

$$\begin{aligned}g[2]&=f[2]h[0]+f[1]h[1]+f[0]h[2]\\&=1+\frac{1}{2}+\frac{1}{4}.\end{aligned}$$

同理，

$$\begin{aligned}g[5]&=f[3]h[2]+f[2]h[3]+f[1]h[4]+f[0]h[5]\\&=\left(\frac{1}{2}\right)^{2}+\left(\frac{1}{2}\right)^{3}+\left(\frac{1}{2}\right)^{4}+\left(\frac{1}{2}\right)^{5}.\end{aligned}$$

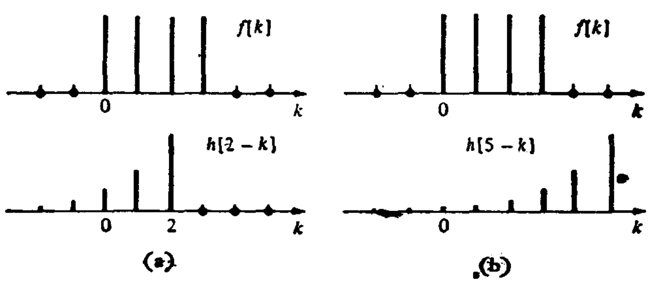


图 1-8

我们进一步注意到，若 $n<0$ 时 $h[n]=0$，则

$$g[n]=\sum_{k=-\infty}^{n}f[k]h[n-k]=\sum_{k=0}^{\infty}f[n-k]h[k].\quad(1\text{-}12)$$

还有，若 $n<0$ 时 $f[n]=0$，则 $n<0$ 时 $g[n]=0$；所以当 $n\geqslant 0$ 时，式(1-12)可以写成

$$g[n]=\sum_{k=0}^{n}f[k]h[n-k]=\sum_{k=0}^{n}f[n-k]h[k].\quad(1\text{-}13)$$