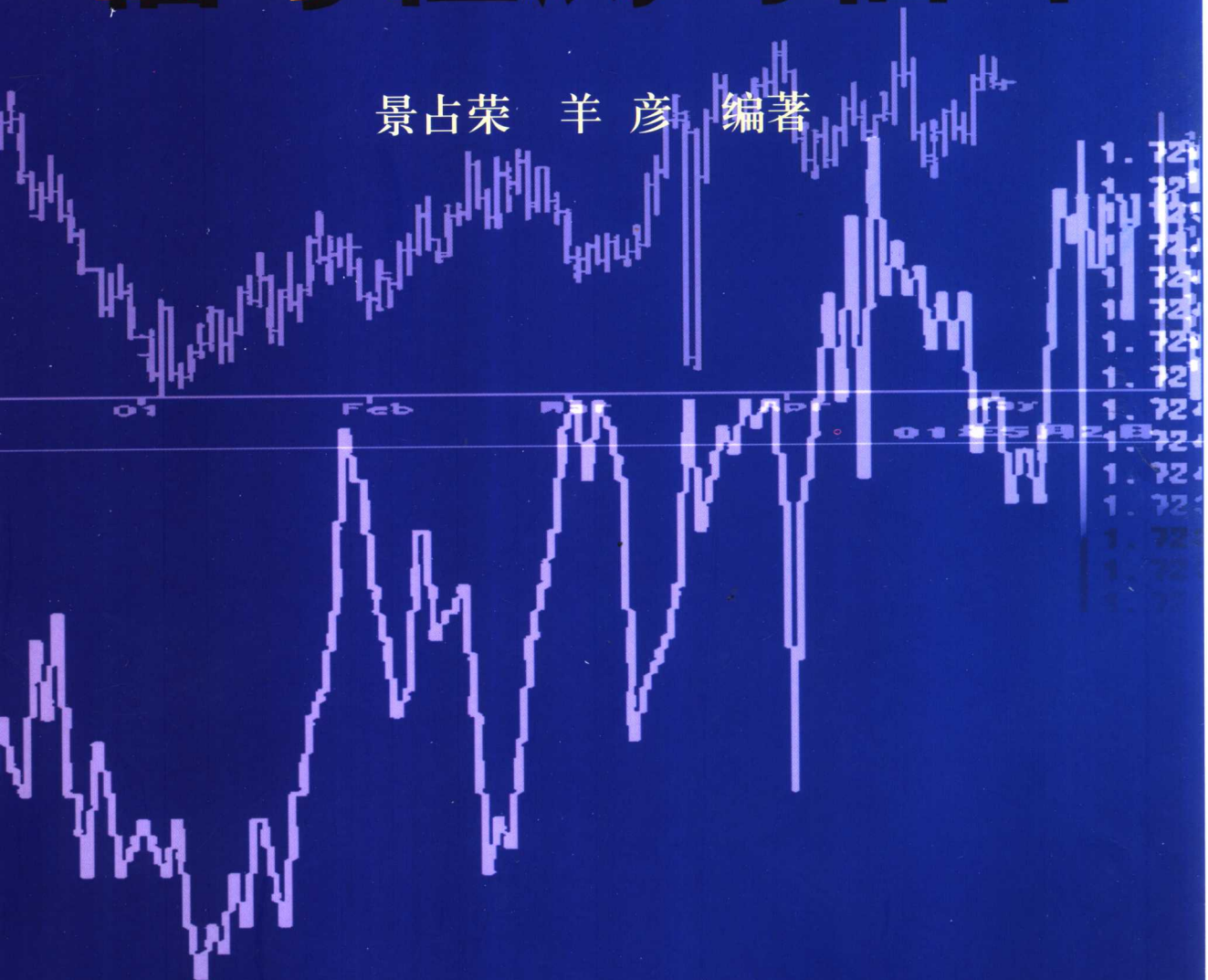


高 等 学 校 教 材

信号检测与估计

景占荣 羊彦 编著



化学工业出版社
教材出版中心

ISBN 7-5025-5782-2



9 787502 557829 >

ISBN 7-5025-5782-2/G · 1552 定价：36.00元

高等学校教材

信号检测与估计

景占荣 羊彦 编著



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

信号检测与估计/景占荣,羊彦编著. —北京:化学工业出版社, 2004.8
高等学校教材
ISBN 7-5025-5782-2

I. 信… II. ①景…②羊… III. ①信号检测-高等学校-教材②参数估计-高等学校-教材 IV. TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 073623 号

高等学校教材

信号检测与估计

景占荣 羊彦 编著

责任编辑:唐旭华

文字编辑:吴开亮 丁建华

责任校对:洪雅妹

封面设计:于剑凝

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 23½ 字数 579 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5782-2/G·1552

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

近年来,随着现代科学技术的发展,电子信息技术的应用领域越来越广泛。除了在通信、导航、雷达等方面的应用外,电子信息技术已经扩展至声呐、地震勘探、生物医学、医疗仪器、气象科学、振动工程和射电天文等领域。同时,研究的内容由几年前还局限于较简单的线性、因果、最小相位系统,已拓展至现在广泛涉及的非线性、非因果、非最小相位等热点问题。特别在随机信号处理方面,已经由经典的加性平稳、正态白噪声模型扩展至非平稳、非正态、有色噪声模型的研究。在高分辨率谱分析方面,已经由原来的二阶矩、功率谱的研究延伸至高阶累积量、高阶谱的研究。在随机信号处理方法上,除了进行经典参量化(确知参量和随机参量)处理之外,非参量随机信号处理也成为研究的新动向。另外,随着被研究对象的复杂性、瞬变性,随机信号处理的自适应性和鲁棒性也受到人们的重视。

为了适应信息科学技术新发展的需要,根据电子信息类专业教学大纲的要求,我们重新编写了《信号检测与估计》教材。新教材体现如下几个特点:①既考虑了随机信号分析、处理的完整性,又体现该学科领域的新发展,使教材留有选学的余地,便于师生使用;②使抽象概念物理化,并列举了大量例题、习题,便于学生学习、巩固和提高。

该教材适合于信号与信息处理、通信与电子系统、电路与系统、自动控制等学科高年级本科生和研究生使用,也适合于类似专业工程硕士研究生、工程技术人员进修班作为教材使用。

本书共分三部分,第1部分“随机信号分析”,包括第1章“随机信号处理基础”,第2章“随机信号分析”;第2部分“信号检测”,包括第3章“信号检测的基本理论”,第4章“确知信号的检测”,第5章“随机参量信号的检测”,第6章“脉冲串信号的检测”,第7章“恒虚警处理”,第8章“非参量检测”和第9章“鲁棒检测简介”;第3部分“信号估计”,包括第10章“估计的基本理论——参数估计”,第11章“信号波形估计”,第12章“功率谱估计”和第13章“随机信号的双谱估计”。本书每章都附有一定数量的习题。各部分、各章节具有一定的独立性,可以根据需要选学其中部分章节。例如:作为高年级本科教学时,可选用前4章,约60学时的教学内容;作为硕士研究生教材使用时,可选学第5章~第13章相关内容,需要40学时;或者选学第3章~第13章相关内容,需要60学时。同时,该教材亦可作为其他相近专业研究生使用。本教材注重物理概念的分析和理解,并列举了大量例题和工程实例,因此也适合于相关领域工程技术人员自学使用。

信号检测与估计主要研究统计信号处理的基础理论和方法,因此在学习本书前,需要概率论、随机过程、信号与系统、矩阵论等基础知识。

本书在编写过程中,参考了大量有关文献,为此,编者向所有参考文献的作者表示感谢!另外,吴雪梅、江亮、马玲、郭俊杰、王会龙、宗凡、段芳芳等参加了本书的文稿整理

和制图工作，特此表示感谢！最后，编者也对所有支持、关心本书编写工作的各位老师和同学表示感谢！

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2004年6月于西北工业大学

内 容 提 要

本书系统、深入地介绍了信号检测与估计的基本理论和技术。全书共分为13章，主要内容包括随机信号分析、信号检测和信号估计三部分。对随机信号的分析 and 处理不但具有系统性、完整性，而且充分注意到了该领域的新进展，增加了相关的新理论、新技术，如高阶累积量、高阶谱分析，以及非参量、非线性、非高斯随机信号的处理方法等，以便使学生能跟踪现代随机信号处理学科的发展。

该书系统性比较强，知识结构完整，并附有大量例题、习题和典型工程实例，不但可以作为电子信息、通信和自动控制等专业本科生、研究生教材，也可以作为同类专业工程技术人员、工程硕士教材。

目 录

第 1 部分 随机信号分析

1 随机信号处理基础	1
1.1 信号处理概述	1
1.1.1 信号的分类	1
1.1.2 信号的频谱分析	4
1.1.3 高频限带信号与窄带信号	5
1.1.4 零中频处理技术	6
1.1.5 实信号的复数表示	6
1.2 随机变量与特征函数	14
1.2.1 随机变量	14
1.2.2 随机变量的数字特征	18
1.2.3 随机变量的变换	21
1.2.4 随机变量的特征函数	25
1.3 信号处理新方法简介	30
1.3.1 信号的时-频域分析	30
1.3.2 小波分析	33
习题	36
2 随机信号分析	39
2.1 随机过程	39
2.1.1 随机过程的定义及其统计特性	39
2.1.2 随机过程的数字特征	42
2.1.3 随机过程的特征函数	43
2.1.4 平稳随机过程	44
2.1.5 各态历经过程	49
2.1.6 平稳随机过程的相关函数	50
2.1.7 互相关函数及其性质	54
2.1.8 平稳随机过程的功率谱密度	58
2.1.9 复随机过程	62
2.1.10 窄带正态过程包络和相位的概率分布	69
2.1.11 窄带随机过程包络平方的概率分布	76
2.2 随机信号通过线性系统	81
2.2.1 线性时不变系统	81
2.2.2 平稳随机过程通过连续时间 LTI 系统	83

2.3 随机过程通过非线性系统.....	90
2.3.1 引言.....	90
2.3.2 直接积分法.....	91
2.3.3 级数展开法.....	93
2.3.4 三阶多项式表示法.....	93
2.3.5 厄密 (Hermite) 多项式表示法	94
2.4 随机信号的高阶谱.....	98
2.4.1 引言.....	98
2.4.2 高阶累积量与高阶谱.....	99
2.4.3 累积量与双谱的性质	101
2.4.4 线性系统分析	104
习题.....	109

第 2 部分 信号检测

3 信号检测的基本理论	115
3.1 引言	115
3.2 假设检测的基本概念	115
3.2.1 基本检测模型	115
3.2.2 假设检验	117
3.3 判决准则	118
3.3.1 贝叶斯准则	118
3.3.2 贝叶斯准则的几种派生准则	123
3.4 假设检验的性能——接收机的工作特性	129
3.5 M 择一假设检验	132
3.5.1 贝叶斯准则	132
3.5.2 最小总错误概率准则	134
3.6 序列检测-瓦尔德检验	136
3.6.1 序列检测的一般叙述	136
3.6.2 序列检测在修正的奈曼-皮尔逊准则下的应用——瓦尔德序列检验	137
习题.....	140
4 确知信号的检测	143
4.1 引言	143
4.2 匹配滤波器	144
4.2.1 线性滤波器输出端信噪比的定义	144
4.2.2 匹配滤波器的传输函数和冲激响应	145
4.2.3 匹配滤波器的性质	146
4.2.4 匹配滤波器与相关接收	148
4.3 卡享南-洛维展开	150
4.3.1 信号的正交级数表示	150
4.3.2 白噪声的正交展开	152

4.4	高斯白噪声中信号的检测	152
4.4.1	简单二元检测	152
4.4.2	一般二元检测	159
4.4.3	高斯噪声中的 M 元检测	167
	习题	174
5	随机参量信号的检测	178
5.1	复合假设检验	178
5.2	随机相位信号的非相参检测	182
5.3	最优接收机的构成	184
5.4	接收机的工作特性	184
5.5	随机相位和振幅信号的检测	187
5.6	随机频率信号的检测	189
5.6.1	振幅具有瑞利衰落的情况	190
5.6.2	处理随机频率的另一种方法	192
5.7	随机到达时间信号的检测	193
5.8	随机频率和随机到达时间信号的检测	194
5.9	相参检测与非相参检测的比较	195
	附录 [5.1] 关于似然函数 $p_0(\mathbf{z})$ 、 $p_1(\mathbf{z})$ 的推导	196
	习题	197
6	脉冲串信号的检测	201
6.1	确知脉冲串的检测	201
6.1.1	问题的提出	201
6.1.2	似然比和最优处理器	201
6.1.3	检测性能	202
6.2	随机参数脉冲串的检测	202
6.2.1	振幅已知且相等而相位随机的情况	202
6.2.2	小信噪比下最优处理器的性能	204
6.2.3	非起伏的非相干检测器的积累损失	207
6.2.4	线性检波与平方律检波的比较	207
6.2.5	振幅已知但不相等的情况 (初相随机)	208
6.3	分集技术简介	208
	习题	209
7	恒虚警处理	210
7.1	引言	210
7.1.1	恒虚警率处理的必要性	210
7.1.2	恒虚警率处理器的质量指标	211
7.1.3	恒虚警率处理的分类	211
7.2	瑞利噪声中的恒虚警处理	211
7.2.1	取样滤波器电路	212
7.2.2	邻近单元平均恒虚警电路	213

7.3	平稳瑞利杂波中的恒虚警性能	214
7.4	恒虚警损失	215
7.5	非平稳杂波中的恒虚警处理	216
7.6	地物杂波恒虚警处理	219
	习题	220
8	非参量检测	221
8.1	引言	221
8.2	非相参检测原理	221
8.2.1	连续 M 个重复周期内雷达视频信号的采集	221
8.2.2	几种非参量检测的检验统计量	222
8.2.3	非参量检验统计检测器的一般原理	223
8.3	非参量检测器的检测性能	223
8.3.1	虚警概率 P_F 的计算	223
8.3.2	检测概率 P_D 的计算	225
8.4	非参量检测器的渐进相对效率和损失	225
8.4.1	检测器的渐进效率	226
8.4.2	两个检测器的渐进相对效率	226
	习题	227
9	鲁棒检测简介	228
9.1	引言	228
9.2	混合模型的鲁棒检测	228
9.2.1	判决规则的建立	229
9.2.2	最不利分布对的选择	230
9.2.3	最不利分布的似然比检测	231
9.2.4	多次采样问题分析	232
9.2.5	序列鲁棒检验	233
9.3	偏差-不确定模型的鲁棒检测	234
9.3.1	偏差-不确定模型的最不利分布	234
9.3.2	最不利分布似然比检验	238
9.4	高斯型噪声中已知信号的鲁棒检测	238

第 3 部分 信号估计

10	估计的基本理论——参数估计	242
10.1	引言	242
10.2	随机参数的贝叶斯估计	244
10.3	最大似然估计	252
10.4	估计量的性质	253
10.4.1	估计量的主要性质	253
10.4.2	非随机参量估计的边界	254
10.4.3	随机参量估计误差方差的下界	256

10.5	多个参数的同时估计	258
10.5.1	随机参量的估计	258
10.5.2	非随机参量的估计	259
10.6	伪贝叶斯估计	259
10.6.1	被估计参量的均值, 协方差已知的情况	261
10.6.2	被估计参量的均值, 协方差未知的情况	262
10.7	线性均方估计	262
10.7.1	估计规则	263
10.7.2	估计量的计算	263
10.7.3	线性均方估计量的几点说明	264
10.7.4	单参量情况下的线性最小均方误差估计	265
10.8	最小二乘估计	270
10.8.1	最小二乘估计原理	270
10.8.2	最小二乘估计量的计算	271
10.8.3	最小二乘估计量的性质	272
10.8.4	加权最小二乘估计	272
	习题	275
11	信号波形估计	279
11.1	引言	279
11.2	平稳过程的估计——维纳滤波	281
11.2.1	积分方程的建立	281
11.2.2	非因果关系积分方程求解	282
11.2.3	因果关系积分方程求解	283
11.3	离散时间系统的维纳滤波	288
11.4	离散线性系统的数学模型	292
11.4.1	状态方程和观测方程的建立	292
11.4.2	信号模型的假设	293
11.5	正交投影	293
11.5.1	正交投影的定义	293
11.5.2	正交投影的几个重要性质	294
11.6	卡尔曼滤波方程	297
11.6.1	卡尔曼滤波方程	297
11.6.2	卡尔曼滤波的具体计算	300
11.6.3	卡尔曼滤波的特点和性质	301
11.7	信号为标量时的卡尔曼滤波	304
11.7.1	状态方程和观测方程	304
11.7.2	标量卡尔曼滤波	305
11.7.3	有关参数的特点	305
11.8	卡尔曼滤波的推广	306
11.8.1	白噪声情况下线性系统的卡尔曼滤波方程	306

11.8.2 有色噪声情况下线性系统的卡尔曼滤波方程	307
11.9 卡尔曼滤波的发散现象和克服发散的方法	308
11.10 卡尔曼滤波在雷达目标跟踪中的应用	310
11.10.1 跟踪滤波器的设计	310
11.10.2 机动目标跟踪	313
习题	320
12 功率谱估计	324
12.1 引言	324
12.2 经典谱估计方法	325
12.2.1 BT法	325
12.2.2 周期图法	327
12.3 谱估计的参数化模型	329
12.4 自回归模型方法	332
12.4.1 AR模型的Yule-Walker方法	332
12.4.2 AR模型的递推方法	333
12.4.3 AR模型阶数选择原则	333
12.5 白噪声中正弦波频率	335
12.5.1 最大似然法	335
12.5.2 Capon谱估计方法	338
习题	340
13 随机信号的双谱估计	342
13.1 引言	342
13.2 非参数双谱估计	342
13.2.1 间接估计法	342
13.2.2 直接估计法	343
13.2.3 非参数双谱估计的统计特性	344
13.3 参数化双谱估计	345
13.3.1 非高斯MA模型	345
13.3.2 AR模型	346
13.3.3 非高斯ARMA模型	349
13.4 应用实例	350
13.4.1 利用双谱提取相位信息	350
13.4.2 生物医学信号处理	351
13.4.3 利用双谱进行时延估计	352
13.4.4 噪声中信号检测	353
附录1 符号对照表	355
附录2 一些公式	359
参考文献	362

第 1 部分 随机信号分析

1 随机信号处理基础

1.1 信号处理概述

1.1.1 信号的分类

信号可分为连续信号和离散信号。连续信号可以用连续的时间函数来描述，离散信号是离散时间上的信号序列。离散信号可用连续信号的采样来得到，如果满足采样定理，连续信号可以用它的采样值来恢复。

信号也可以分成确知信号和未知参量信号两类。如果信号的所有参量都确知，则信号仅为时间的函数，这类信号称为确知信号。假如在接收端收到的是这种所有参量都事先确知的信号，那么，它除了告知信号存在以外，不会带来其他信息。

一般说来，信号总是含有未知参量的，这类信号称为未知参量信号。在未知参量信号中，若未知参量在观测时间内是不随时间变化的随机变量时，称其为随机参量信号；若信号的未知参量在观测时间内是随时间变化的随机过程时，则称其为起伏参量信号；也有的未知参量信号仅仅参量是未知的，但它本身不是随机变量。在典型的判决确知信号存在与否的检测问题中，可以把确知信号看成是振幅参量 a_s 可能取两个离散值 ($a_s=0$ ——信号不存在； $a_s=a_0 \neq 0$ ——信号存在) 的随机参量信号来处理。

根据信号所具有的时间函数特性，可以分为确定性信号与随机信号、连续信号与离散信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号，现分述如下。

1.1.1.1 确定性信号与随机信号

按确定性规律变化的信号称为确定性信号。确定性信号可以用数学解析式或确定性曲线准确地描述，在相同的条件下能够重现，因此，只要掌握了变化规律，就能准确地预测它的未来。例如正弦信号，它可以用正弦函数描述，对给定的任一时刻都对应有确定的函数值，包括未来时刻。

不遵循任何确定性规律变化的信号称为随机信号。随机信号的未来值不能用精确的时间函数描述，无法准确地预测，在相同的条件下，它也不能准确地重现。电路里的噪声、电网电压的波动量、生物电、地震波等都是随机信号。

【例 1.1.1】 正弦（型）确知信号

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1.1)$$

式中，振幅 A 、角频率 ω_0 、相位 φ_0 都是已知的常量。

每次对高频振荡器作定相激励时，其稳态部分就是这种信号。每次激励相当于一次试验，由于每次试验时，信号 $s(t)$ 都相同地随时间 t 按上式所示的确知函数而变化，因而这

种信号是确知过程。

【例 1.1.2】 正弦（型）随机初相信号

$$X(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1.1.2)$$

式中，振幅 A 、角频率 ω_0 都是常量，而相位 φ 是在区间 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机变量。

由于相位 φ 是连续随机变量，在区间 $[0, 2\pi]$ 上有无数个取值，即可取 $[0, 2\pi]$ 中的任一值 φ_i ， $0 \leq \varphi_i \leq 2\pi$ 。这时对应不同的 φ_i ， $X(t)$ 相应有不同的函数式

$$x_i(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_i), \quad \varphi_i \in [0, 2\pi]$$

可见 (1.1.2) 式实际上表示一族不同的时间函数，如图 1.1 所示（图中只画出其中的三条函数曲线），显然这种信号是随机过程。

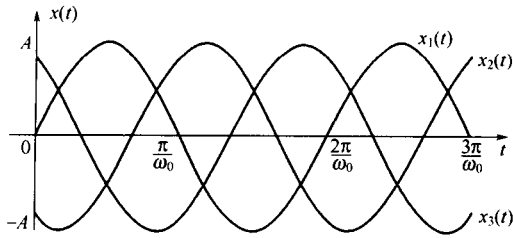


图 1.1 正弦（型）随机初相信号

对没有采用定相措施的一般高频振荡器作开机激励时，其稳态部分就是这种信号。每次开机作激励时，由于振荡器的起振相位受偶然因素影响而每次有所不同，因而高频振荡信号的相位作随机变化，这是最常遇的一种随机信号。同理，在信号

$$s(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

式中，若仅振幅 A 是随机变量，则为随机振幅信号。若仅角频率 ω 是随机变量，则为随机频率信号。

【例 1.1.3】 接收机噪声

设有多部相同的接收机，输出端各接一个记录器，记录输出的电压（或电流）波形，如图 1.2 所示。

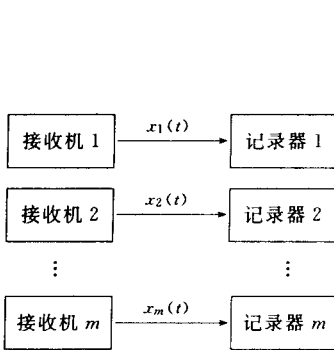


图 1.2 接收机噪声的记录

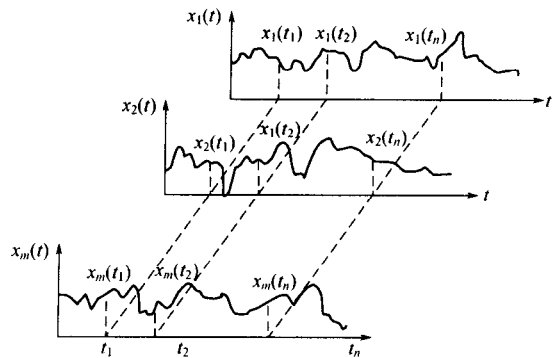


图 1.3 接收机的噪声波形

当各部接收机都不加入信号（例如将输入端短路）时，由于接收机中的元件（如电阻）和器件（如晶体管、电子管）会产生噪声，因而在放大输出端，各个记录器都会记录相应接

收机的噪声波形,如图 1.3 所示。图中表明,各个噪声波形 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 \dots 、 $x_m(t)$ 都是一个确定的时间函数。由于无法预知它,因而相互不同。可见接收机噪声也是随机过程,这种噪声会对有用信号的接收起干扰作用,是本书要着重研究的一种随机过程。

1.1.1.2 连续信号与离散信号

按自变量的取值特点可以把信号分为连续信号和离散信号。连续信号如图 1.4(a) 所示,它的描述函数的定义域是连续的,即对于任意时间值,其描述函数都有定义,有时也称为连续时间信号,用 $s(t)$ 表示。离散信号如图 1.4(b) 所示,它的描述函数的定义域是某些离散点的集合,也即其描述函数仅在规定的离散时刻有定义,有时也称为离散时间信号,用 $s(t_n)$ 表示,其中 t_n 为某特定时刻。图 1.4(b) 表示的是离散点在时间轴上均匀分布的情况,但也可以不均匀分布。均匀分布的离散信号可以表示为 $s(nT)$ 或 $s(n)$,也可称为时间序列。

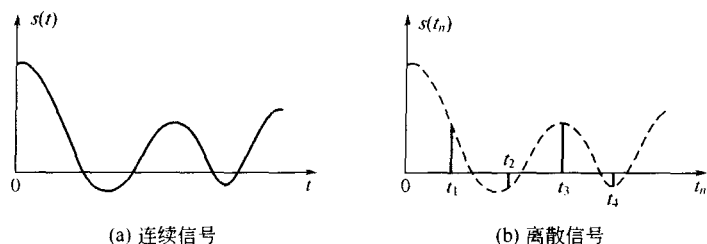


图 1.4 连续时间信号与离散时间信号

离散信号可以是连续信号的抽样信号,但不一定都是从连续信号采样得到的,有些信号确实只是在规定的离散时刻才有意义,例如人口的年平均出生率、纽约股票市场每天的道琼斯指数等。

连续信号只强调时间坐标的连续,并不强调函数幅度取值的连续,因此,一个时间坐标连续、幅度经过量化(幅度经过近似处理只取有限个离散值)的信号仍然是连续信号,而那些时间和幅度均为连续取值的信号称为模拟信号。显然,模拟信号是连续信号,而连续信号不一定是模拟信号。同理,时间和幅度均为离散取值的信号称为数字信号,数字信号是离散信号,而离散信号不一定是数字信号。

1.1.1.3 周期信号与非周期信号

周期信号是依时间周而复始变化的信号。

对于连续信号,若存在 $T > 0$, 使

$$s(t) = s(t + nT), \quad n \text{ 为整数} \quad (1.1.3)$$

对于离散信号,若存在大于零的整数 N , 使

$$s(n) = s(n + kN), \quad k \text{ 为整数} \quad (1.1.4)$$

则称 $s(t)$ 、 $s(n)$ 为周期信号, T 和 N 分别为 $s(t)$ 和 $s(n)$ 的周期。显然,知道了周期信号一个周期内的变化规律,就可以确定整个定义域的信号取值。

不具有周期变化规律的信号就是非周期信号,它们一定不满足式(1.1.3)或式(1.1.4)。非周期信号也可以看作为周期是无穷大的周期信号,只是在有限时间范围内其波形不重复出现而已。

1.1.1.4 能量型信号与功率型信号

可以从能量的观点来研究信号。把信号 $s(t)$ 看作加在 1Ω 电阻上的电流,在时间间隔