



国防特色规划教材·信息与通信技术

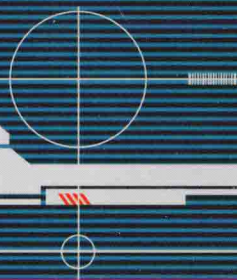
TEXTBOOK  
National Defense



# 信号检测与估计

XINHAO JIANCE YU GUJI

羊彦 景占荣 高田 著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防特色教材·信息与通信技术

# 信号检测与估计

羊彦 景占荣 高田 著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

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,重点研究了信号检测与估计共同涉及的基础理论,讨论了检测和估计的基本原理,以及随机信号处理技术在通信、雷达领域的应用方法。

本书每章后面都备有充足的习题。在部分章节后面增加了必要的附加内容,作为本章节内容的完善。附加内容包括公式推导、缺省内容的补充和延伸等。另外,还以附录的形式给出了“符号对照表”和“常用解题公式”。

本书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。

### 图书在版编目(CIP)数据

信号检测与估计/羊彦,景占荣,高田著. —西安:西北工业大学出版社,2014.1  
国防特色教材·信息与通信技术  
ISBN 978-7-5612-3898-1

I. ①信… II. ①羊… ②景… ③高… III. ①信号检测—高等学校—教材 ②参数估计—高等学校—教材 IV. ①TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 008304 号

## 信号检测与估计

羊彦 景占荣 高田 著  
责任编辑 孙倩

\*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwpu.com>

陕西向阳印务有限公司 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:21.25 字数:453 千字

2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷 印数:2000 册

ISBN 978-7-5612-3898-1 定价:45.00 元

# 前 言

信号与信息处理学科是信息科学的重要组成部分,该学科水平的高低反映了一个国家的科技发展水平。检测估计理论是该学科的核心部分,广泛地应用于通信、导航、雷达、声呐等国防科学技术的各个支柱领域。

近年来随着微电子技术和计算技术的飞速发展,为该领域的进一步研究提供了物质条件。一些新的实现方法与算法层出不穷,优化、自适应能力大大提高,使人们有能力展开对非平稳、非高斯以及时变、非因果、非线性问题进行研究和处理,亦有能力超越理想模型、定性描述的束缚,进行鲁棒性、综合统计性的研究和评价。目前该领域研究的一个显著特色是理论与实际应用研究同步进行,理论成果可以在高速数字处理平台上得以实现,直接服务于工程应用。可以预期,检测估计理论与技术将越来越得到广泛的应用,届时信息科学将产生新的飞跃。

为了适应电子信息处理技术的同步发展,加强电子信息工程学科检测估计理论的本科教学势在必行。鉴于目前使用的《信号检测与估计》大都源于20世纪80年代的素材,存在着内容陈旧,未反映该学科领域最新进展,其列举的工程背景和习题已缺乏指导意义等缺陷,亟须编写一本能体现信息时代特色的新教材。鉴于此目的,西北工业大学电子信息学院雷达信号处理教研室信号检测与估计教学组于2003年编写了《信号检测与估计》教材,发行5000册,经过三年多的教学实践及反馈意见,认为该教材在突出国防特色、工程背景选材以及数字化手段等诸方面尚存在不足之处,有必要进行修订。

根据原国防科工委下达的《信号检测与估计》教材编写指南,本课程是信息与通信工程领域的一门本科专业课,目的在于使学生掌握从噪声中检测与估计信号的基本概念、基本原理和基本方法。这就要求修订教材在内容上必须立足于基础理论,同时还应该能充分反映近年来随机理论的新发展和新成果,体现“教育超前”的思想。本着这个指导思想,修订后的教材内容将更系统、全面和新颖,课程知识体系更加科学,内容和其他教材衔接更加合理,在内容组织和编排上更具有适合于作为教材的特点。

本书修订的指导思想有两点:

1. 修订教材将紧密围绕指南要求,对基础理论部分进行认真编排,突出主干

内容,提高基础理论的起点。由于教材是针对信息与通信领域本科生和研究生编写的,其内容更应具有针对性,尽量避免大纲规定内不同教材间的重复,提高该课授课信息量;同时,将理论推导和实例阐述相结合,使抽象理论具体化,以便于学生理解和接受。

2. 把本学科领域的最新学术成果、最新技术引入教学内容,使课程的内容具有前沿性,充分反映科技的发展水平。信号检测与估计课程承接的专业面较广,涉及通信、导航、雷达、声呐、地震探测、生物医学和射电天文等多个专业,必须留有一定的弹性空间,适应较宽专业口径需要。修订教材吸收了国内外知名大学同类教材的新内容,特别是能反映以现代军事电子为背景的大批量、低信噪比、高精度的随机信号分析与处理的新理论与技术,还增加了一些选学、自学内容,使得教材更加完整,更便于教学,既突出基础培养,又符合科技现代化和国防现代化的需要。

全书共分为6章,第1章为本书的概论,介绍了随机信号的特点,在工程应用中可能的信号形式以及基于统计学意义的处理方法等。第2章、第3章重点论述了信号的统计检测理论和技术,包括信号模型的建立、最佳检测准则、检测系统的结构、检测性能分析以及最佳波形设计等内容。第4章、第5章主要讨论了信号的最佳估计理论和算法,如估计量的构造、估计的性质、最佳估计准则,信号波型估计的概念及准则,维纳滤波和卡尔曼滤波算法等内容。第6章介绍了功率谱估计的相关内容。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。每章后面都备有充足的习题。在部分章节后面增加了必要的附加内容,作为本章节内容的完善。附加内容包括公式推导、缺省内容的补充和延伸等。另外,还以附录的形式给出了“符号对照表”和“常用解题公式”。为了便于教学,还将编写《信号检测与估计习题集》,并单独出版。

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,需要具备概率论、随机信号分析、信号与系统、矩阵论等基础知识。

在本书编写过程中,参考了大量相关的参考文献,为此,我们向所有参考文献的作者表示感谢!另外,李晓玲、孙文婷、燕希等参加了本书的文稿整理和制图工作,特此表示感谢!最后,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!

由于水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2013年5月

# 目 录

第 1 章 概论	1
1.1 概述	1
1.2 检测与估计涉及的信号形式	7
本章习题	20
第 2 章 检测基本理论	22
2.1 引言	22
2.2 假设检测的基本概念	23
2.3 判决准则	29
2.4 假设检验的性能——接收机的工作特性	44
2.5 $M$ 择一假设检验	49
2.6 序列检测——瓦尔德检验	54
2.7 匹配滤波器	59
2.8 高斯白噪声中信号的检测	70
2.9 高斯有色噪声中确知信号的检测	98
2.10 利用蒙特卡洛方法对检测性能评估	102
附 2.1 随机信号的正交展开	104
附 2.2 蒙特卡洛实验实例	108
本章习题	110
第 3 章 噪声中的信号检测技术	118
3.1 概述	118
3.2 随机参量信号检测	118
3.3 脉冲串信号的检测	142
3.4 恒虚警处理	151
3.5 非参量检测	164
3.6 鲁棒检测简介	172
3.7 信号检测技术小结	188
附 3.1 关于似然函数 $p_0(z)$ , $p_1(z)$ 的推导	188
附 3.2 随机变量及其分布	190

本章习题·····	193
<b>第 4 章 估计的基本理论</b> ·····	201
4.1 引言·····	201
4.2 随机参数的贝叶斯估计·····	203
4.3 最大似然估计·····	210
4.4 估计量的性质·····	211
4.5 伪贝叶斯估计·····	217
4.6 线性均方估计·····	220
4.7 最小二乘估计·····	230
4.8 利用蒙特卡洛方法对随机变量数字特征的估计·····	235
附 4.1 最佳估计量的不变性·····	237
本章习题·····	241
<b>第 5 章 信号波形估计</b> ·····	247
5.1 引言·····	247
5.2 平稳过程的估计——维纳滤波·····	249
5.3 离散时间系统的维纳滤波·····	258
5.4 离散线性系统的数学模型·····	263
5.5 正交投影·····	265
5.6 卡尔曼滤波方程·····	269
5.7 卡尔曼滤波的推广·····	279
5.8 卡尔曼滤波的发散现象分析·····	282
本章习题·····	285
<b>第 6 章 功率谱估计</b> ·····	289
6.1 引言·····	289
6.2 功率谱估计的一般方法·····	289
6.3 随机信号的双谱估计·····	309
6.4 自适应滤波·····	323
本章习题·····	325
<b>附录</b> ·····	326
附录 1 符号对照表·····	326
附录 2 常用解题公式·····	329
<b>参考文献</b> ·····	333



# 第1章 概 论

## 1.1 概 述

信号可以分为确定信号和随机信号。若信号的数学表达式为一确定的时间函数,称为确定信号,而赋予统计结构的信号称为随机信号。随着科学技术的发展,信号理论得到了长足的发展,不但确定信号处理的研究日趋完善,而且随机信号处理的研究也有了很大的进展。随机信号的处理采用统计的方法,其数学基础是统计学的判决理论和统计估计理论。

信号处理的目的是从各种实际信号中提取有用信号,随机信号处理的过程是从受干扰和噪声污染的信号中提取有用信号的过程。这些信号包括电信号、光信号、声信号以及振动信号等,表现为一个或多个物理量,它们随着另外一些物理量(诸如时间、空间或频率等)的变化而变化。因此,随机信号处理在各个领域有着广泛的应用,诸如探测、通信、控制、水声与地震信号处理、地球物理、生物医学、模式识别、系统识别、语音处理及图像处理等方面。

本书系统地介绍了随机信号处理所共同需要的基础理论,以及随机信号处理在通信、雷达领域的应用方法;重点讨论了检测和估计理论的基本原理,为电子系统工程、信号与信息处理等专业本科生及研究生学习后续专业课程奠定基础。

### 1.1.1 信息科学的概念

#### 1. 消息、信号与信息

在通信理论中,消息(message)、信号(signal)与信息(information)各有不同的意义,不能互相取代。

消息是指通信系统传送的对象,如语言、文字、图像、数据等。在雷达、通信与自动控制系统中,关键的问题是消息的传输和处理。

信号是指由消息变换而来的反映消息的电的信号、光的信号等,信号是消息的载荷者,如声音转换而成的电的音频信号,反映图像的电的视频信号,以及各种编码信号(如“1”“0”脉冲码)等。为使消息能远距离传输,将其变换、编码并调制成相应的无线电信号,再借助于发射天线辐射到空间,经电磁波传播抵达接收天线。接收系统将接收到的信号进行处理(放大、解调等)后还原为所需要的消息,送入接收系统终端或使用者,从而完成信息传输任务。

从通信理论的角度,信息则是消息的量度,是以某消息出现的概率的大小来度量其信息量



的,它是信息论中要讨论的主要问题之一。从广义来讲,信息并非事物与过程的本身,而是表征事物并由事物发出的消息(情报、指令和数据等)所包含的内容,这就是人类感官所能直接或间接感知的一切有意义的东西。换句话说,信息是自然界、人类社会和人类思维活动中普遍存在的一切物质和事物的属性。而人们所谈论的信息是人类特有的信息,即知识。这种特定的人类信息,是整个信息的一部分。在一定条件下,人类通过有区别、有选择的信息,对自然界、人类社会、思维方法和运动规律进行认识与掌握,并通过大脑的思维,使信息系统化而形成所说的知识。因此,知识是存在于一个个体中的有用信息。人类社会的进步,就是人们根据获取的信息认识世界、改造世界,也就是创造知识、利用知识、积累知识和发展知识的过程。信息已作为现代科学技术的支柱被应用到各个领域。除通信以外,遗传密码是一种生物信息,计算机程序是一种技术信息,市场是一种社会信息,等等。既然信息在现代科学技术中起着愈来愈重要的作用,它的特征也就愈加明显地被揭示出来。信息依物质、能量而存在,是客观事物互相关联的一种普遍的形式。这里主要从通信理论的角度,提出信息的含义。本书所讨论的不是信息的社会含义与哲学含义,而是信息的科学含义,也就是从信息科学的角度来讨论信息。

## 2. 信息科学与信息工程

信息科学研究信息的性质、获取、传输、检测、存储、处理和控制的基本原理和方法。它是一门涉及面极广的新兴科学。信息工程则是指有关信息变换、传输、处理、识别与利用的工程实践与技术。

信息的性质,指的应是消息的性质。消息的随机性是消息本身具有信息价值的根本原因。如果随机性很差,例如一个智力有缺陷的儿童的语言所含内容贫乏,就只能表达有限的信息。人类语言是一个十分复杂的随机事件,它包含有很大的信息量,除了声音这一形式外,还有书面语言——文字。每一个文字以及由文字组成的语句,出现的概率各不相同,而且存在着很强的相关性。因此,当进行语音处理、识别或理解时,面对着的是一个复杂的随机事件。要进行语音处理,就需要研究语音的特征、统计特性与描述。这是信息(信源)本身的随机性。由于信号在传输过程中不可避免地要受到外来干扰与设备内部噪声的影响,因而使接收端收到的信号具有随机性。

干扰与噪声可分为系统内部干扰、内部噪声与外部干扰、外部噪声。一般来说,干扰主要来自外部,噪声主要来自内部。来自外部的干扰主要有天电干扰、工业干扰和人为干扰等。来自内部的干扰主要有信道之间的交叉调制和设备的某些不完善所引起的干扰。外部噪声主要是指自然界其他物体的辐射噪声,例如各种天体都在向外辐射电磁波。内部噪声主要指热噪声。热噪声是由电子或其他带电粒子不规则的热运动引起的。

从噪声与信号之间的关系来分,又可将噪声分为加性噪声与乘性噪声。加性噪声与信号相互独立。热噪声是一种加性噪声,可以用加法运算来说明它对信号的影响,如

$$x(t) = s(t) + n(t)$$

式中,  $s(t)$  表示信源信号;  $n(t)$  表示噪声;  $x(t)$  则表示混入了噪声之后的信号。显然,  $x(t)$  为一个随机信号。

乘性噪声又称相关噪声, 信号存在时它存在, 信号消失后它也消失。例如, 电磁波通过大气折射, 产生多路径效应, 由多路径效应引起信号的衰落, 这种衰落对信号传输造成的影响, 就可看成是乘性噪声。本书主要讨论加性噪声的影响。

### 1.1.2 随机理论的发展历程

统计判决理论起源是很古老的。在统计理论的发展中, 基本的数学抽象原理和计算由亚里士多德(Aristotle)于公元前 384—前 322 年提出。它与现代统计决策理论更具体的联系, 可在高斯(C. F. Gauss)1777—1855 年和普安卡雷(H. Poincare)1854—1912 年的著作中找到。普安卡雷递推定理是由维特纳(Wintner)于 1941 年提出的, 它提供了研究遍历理论的开端, 并扩展用到了判决规则的推导。

20 世纪可以认为是统计判决理论的黄金时代。这个世纪的早些时候, 提出和分析了一些最优判决理论形式化, 并且研究了数据分析方法。1920 年菲希尔(Fisher)研究了在观测中确定可信度的方法; 奈曼(Neyman)在 1935 年、1952 年以及奈曼与皮尔逊(Pearson)在 1933 年、1936 年、1938 年研究了关于假设检验的充分统计量、统计效率和统计偏; 1946 年克拉默(Cramer)提出了几个统计问题精确的最优的形式化; 1947 年沃尔德(Wald)以及 1948 年沃尔德与沃尔福奥威茨(Wolfowitz)提出和分析了序列假设检验的最优形式化; 1947 年布莱维尔(Blackwell)和索瓦热(Savage)研究了序列和无偏参量估计; 1939 年皮特曼(Pitman)和 1945 年拉奥(Rao)研究了局部参量估计的方法并分析了导出的性能; 1948 年哈尔莫斯(Halmos)和萨维奇(Savage)研究了关于朗东-尼柯季于梅(Randon-Nikodym)定理的充分统计量; 1949 年阿罗(Arrow)等研究了贝叶斯和最大最小形式化序列假设检验, 1949 年菲克思(Fix)提出了非中心  $\chi^2$  分布表; 1947 年冯·米塞斯(Von Mises)研究了某些统计函数的对称分布; 1949 年赫尔(Hoel)等研究了最优分类问题。

统计判决理论早期的工作, 需要用高级概率论的原理和方法, 并且判决理论、对策理论和函数识别之间有密切联系。高级概率论的基本原理是由柯尔莫哥罗夫(Kolmogorov)于 1956 年和列维(Loeve)于 1963 年提出的。除了基本原理之外, 格里默(Gramer)于 1955 年、费勒(Feller)于 1966 年、帕曾(Parzen)于 1960 年、塔克(Tucker)于 1962 年, 还涉及概率论的应用及其与数理统计之间的关系。1965 年施特拉森(Strassen)研究了给定边界概率测度的存在。函数和对策理论在几个重要问题上所起的基础作用, 在 20 世纪初就被认可。1906 年詹森(Jensem)研究了在不等式约束出现时凸函数的重要性; 1944 年冯·诺伊曼(Von Neumann)等研究了对策论在分析经济行为中的应用; 1957 年卢斯(Luce)等研究了从某些对策中演变的判决; 1959 年卡尔林(Kalin)研究了对策、规划和经济之间的关系。统计学、函数理论和对策

之间的关系首先由沃尔德(Wald)于1950年研究,他还首先研究了某些判决函数的性能,并且在1951年从对策理论的观点提出了随机统计学(Randomized Statistics)。1951年德沃列茨基(Dvoretzky)等研究了两人对策零和与消除假设检验中的随机性之间的关系;1954年布莱克维尔(Blackwell)等提出并研究了统计判决和对策理论;1954年丹尼尔斯(Daniels)研究了鞍点对策和统计近似的某些应用。

1950—1960年间得到了富有成果的统计判决理论。这里,我们仅涉及十年间的一些进展,不可能涉及所有的文献。1950—1960年,许多早期的形式化被进一步研究和发展。1951年皮尔逊(Pearson)等提出检验分析幂函数图;1959年谢夫(Scheffe)分析了方差;1959年谢努费(Chernoff)等和莱曼(Lehman)提出统计理论的综合表示;1956年克努耶(Quenouille)研究了参量估量中偏的出现;阿加瓦尔(Agarwal)于1935年、布莱斯(Blyth)于1951年、基费(Kiefer)于1957年和沃尔福奥维茨(Wolfowitz)于1950年详尽地阐述了最大最小方法;1956年卡尔林(Karlin)等和1953年勒卡姆(Le Cam)研究了贝叶斯判决规则;巴哈杜尔(Bahadur)于1954年和1958年、布莱克维尔(Blackwell)于1951年、德·格罗特(De Groot)于1959年、勒卡姆于1955年和菲克斯(Fix)等于1959年研究了各种判决规则的重要性质;1954年、1955年佩奇(Page)介绍了质量控制序列检验。但是,1950—1960年十年间最重要的进步是提出并研究了非参量检验。第一个研究文献是由赫夫定(Hoeffding)于1951年提供的。除此之外,切尔诺夫(Chernoff)等于1958年、弗雷泽(Fraser)于1957年、霍奇斯(Hodges)等于1956年、西格尔(Siegel)于1956年和斯坦(Stein)于1956年继续进行研究。

1960年统计判决理论开始了新的方向。鲁棒(Robust)统计由休伯(Huber)在1964年、1965年、1968年、1969年正式提出。休伯的鲁棒最大最小形式化是不完全的。直到20世纪70年代,才由另外的研究者继续。1971年汉佩尔(Hampel)提出了记忆和平稳过程鲁棒定性研究。拉泰尔(Later)、帕潘托尼-卡扎科斯(Papantoni-Kazakos)和格雷(Gray)于1979年扩展了汉佩尔定性鲁棒到包含带记忆的平稳过程。鲁棒统计方法某些局部的评述由安德鲁斯(Andrews)和休伯于1972年给出。统计鲁棒更完整的视野由休伯于1981年提供。此外,贝兰(Beran)1977年研究了局部参量的鲁棒估计。汉佩尔于1976年分析了这些估计的崩溃点,登普斯特(Dempster)于1975年提出了鲁棒的主观主义者(Subjectivist)的观点。类似地,从1960年以来建立的好的统计方法的研究在继续,这里仅举几例:1965年罗曼诺维斯基(Romanowski)等研究了正态分布的模型的某些应用;1967年费雷克森(Ferguson)提出数学统计学理论;1976年谢费(Shafer)提供了数学理论证据;1971年洛登(Lorden)研究和分析了佩奇的质量控制检验理论;1971年丹尼尔(Daniel)等提供了数据拟合方程的方法;1977年莫斯特勒(Mosteller)等和图基(Tukey)提出数据分析的经验方法;1975年斯通(Stone)研究了局部参量的参量自适应估计;1961年詹姆斯(James)等研究了局部参量的贝叶斯参量估计;1967年切尔诺夫(Chernoff)等和1974年贝兰(Beran)研究了秩非参量统计检验渐近的性质;1967年哈耶克(Hajek)等提出秩非参量检验的理论。在序列检验中,贝克霍尔(Burkholder)等于

1963年、切尔诺夫(Chernoff)于1972年和马琴斯(Mattens)于1963年研究了最优性和准许方式;由乔(Chow)等1965年下半年研究了停止准则。由希夫定(Hoeffding)于1960年、雷(Ray)于1965年提供了采样区间的范围(为了进行判决)。哈丁(Harding)和肯得尔(Kendall)于1974年提出了随机几何理论。

由于通信技术发展的激励,统计学也有了类似惊人的进步。由亨利(J. Henry)在1832年和莫尔斯(S. F. B. Morse)在1838年电报的演示,由贝尔(A. G. Bell)在1876年取得电话的专利权和由康佩尔(G. A. Campell)在1977年发明了波形滤波器,这些初期的主要发现引起了通信技术的革命和统计通信理论形式化。理论根基可以追踪到20世纪初,由哈特雷(Hartley)在1928年首先提出信息传输原理时起,继先驱者哈特雷的文章,有赖斯(Rice)1945年噪声分析的研究。香农(Shannon)与韦费(Weaver)在1949年对信息传输理论有发展,维纳(N. Wiener)于1949年把滤波和平滑的数学形式化。1960年,统计通信理论的基本原理建立,读者可参阅科捷利尼科夫(Kotelnikov)于1959年、施瓦茨(Schwartz)于1959年、赫尔斯特朗(Helstrom)于1960年、米德尔顿(Middleton)于1960年和法诺(Fano)于1961年的著作。此后,理论进一步发展,包括信源改进、信道编码方案、信号处理的统计技术、扩谱和在计算机通信网中多用户的信息传输技术。

前面回顾了统计判决理论的历史。下面对随机信号处理的发展,沿着历史的进程作简要的概括。

归纳起来,随机信号处理的发展可分为两个阶段。

第一阶段为经典随机信号理论和技术生长、发展及成熟时期。

随机信号用统计的方法来研究是从20世纪40年代开始的。由于科学技术的发展和第二次世界大战军事技术等方面的需要,随机信号处理理论逐步形成和发展起来。整个40年代是随机信号处理理论的初创和奠基时期。由维纳和柯尔莫哥罗夫将随机过程和数理统计的观点引入通信、雷达和控制中,建立了维纳滤波理论。通过解维纳-霍夫(Wiener-Hopf)方程,在最小均方误差准则下,求得线性滤波器的最优传递函数。诺斯(D. O. North)于1946年提出匹配滤波器理论,科捷利尼柯夫(B. A. Kotelnikov)于1946年提出了理想接收机理论。1950年,在香农信息论问世不久后,伍德沃德(P. M. Woodward)提出了后验概率接收机的概念。后来,密德尔顿(D. Middleton)提出了风险理论。整个50年代,随机信号处理的主要理论基础、统计检测理论和统计估计理论发展和成熟。这个时期,随机信号处理使用的数学方法,基本上是统计学已经完成的工作。

第二阶段为现代随机信号处理理论与技术起步和大发展的时期。

现代随机信号处理的主要成就有下列8个方面。

①20世纪60年代初出现了卡尔曼(Kalman)滤波理论。这是随机信号处理中在20世纪五六十年代极为突出的成就。这一理论引进状态空间法,突破了噪声必须是平稳过程的限制。进入70年代,经过凯莱斯(T. Kailath)等的努力,在理论和算法上都向前推进了。其又与鞅过

程相结合,为非线性估计开拓了前景。

②以非参量统计推断为数学基础的非参量检测与估计。20世纪60年代和70年代发展了噪声特性基本未知情况下的随机信号处理问题。卡蓬(J. Gapon)于1959年提出了非参量检测与估计问题。汉森(V. G. Hansen)等人于70年代初提出了“广义符号检验法”。70—80年代又出了几部总结性的著作。

③鲁棒检测。鲁棒检测从20世纪60年代中期开始,到七八十年代发展起来。这是对噪声特性部分已知情况下的随机信号处理问题。在60年代中期,首先由休伯(P. J. Huber)提出。这就是所谓的鲁棒检测、鲁棒估计和鲁棒滤波。

④现代谱估计理论。经典谱估计理论实质是傅里叶分析法,是由布莱克曼-图基(Blackman - Tukey)于1958年提出的利用维纳相关法从采样数据序列的自相关函数来得到功率谱的方法,通常称为BT法。此外,由库利(Cooley)和图基于1965年提出快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),由FFT发展起来的信号谱估计法,直接对采样数据进行傅里叶变换来估计功率谱,通常称为周期图法。为了解决经典谱估计法频率分辨率低的问题,伯格(Burg)于1967年提出最大熵谱分析法,帕曾(E. Parzen)于1968年提出自回归模型谱估计方法,此后又出现了许多高分辨力的谱估计方法,诸如谐波分析法、最大似然法、自回归移动平均法等,随机信号谱估计进入了现代谱估计阶段。

⑤多维信号处理与分析。这涉及图像处理、多维变换、多维数字滤波、多维数字谱估计。20世纪70年代以来,随着大规模集成电路(LSI)技术的发展,阵处理机、专用功能部件等为信号处理提供了有利的工具。到了80年代,随着超大规模集成电路(VLSI)技术的发展,并行算法结构和流水线信号处理机以及近来出现的人工神经网络器件及其算法与网络结构等,都为各种复杂的信号处理算法提供了前提条件。

⑥非线性检测与估计问题。大多数火箭制导和控制问题的动态模型都是非线性的。频率调制和相位调制等许多调制方法,相位检波和相参积累,实际上都是非线性检测与估计问题。二维图像信道提到日程上来之后,这一领域的研究就更为迫切。

⑦自适应理论。自威德罗(B. Widrow)等1967年提出自适应滤波以来,这20多年中,自适应滤波发展很快,已广泛应用于系统模型识别、通信信道的自适应均衡、雷达和声呐的波束形成、自适应干扰对消和自适应控制等方面,并且已经研究出在某种意义上类似生命系统和生物适应过程的自适应自动机。

⑧20世纪80年代以后,光纤通信、其他激光技术的发展,量子信道、量子检测、量子估计理论也在发展。赫尔斯特朗(C. W. Heistrom)首先于1976年出版了奠基性著作《量子检测与估计理论》(*Quantum Detection and Estimation Theory*),这一领域目前正在发展的过程中。

### 1.1.3 随机信号处理

随机信号处理可以说是在概率论的基础上发展起来的。随着电子技术和通信技术的发展,在信息传输与处理领域中,概率论、数理统计和信号理论相结合,逐渐形成了一个理论分支,即随机信号的分析与处理,其包括随机过程理论、信号最优滤波、检测与估计、自适应理论以及计算技术与优化方法等。它与香农信息论、编码理论、信号理论、噪声理论、调制理论、保密学等,都是构成现代信息论的重要分支。

## 1.2 检测与估计涉及的信号形式

### 1.2.1 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,它除了告诉人们信号存在以外,不会带给人们其他任何信息。

一般来说,信号总是含有未知参量的。这类信号称为未知参量信号。携带着人们所关心的信息的参量总是未知的。在未知参量信号中,若未知参量在观测时间内是随机变量时,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。

一般地,根据信号所具有的时间函数特性,可以有如下四种分类方法:确定信号与随机信号、连续信号与离散信号、周期信号与非周期信号、能量型信号与功率型信号。下面分别予以介绍。

#### 1. 确定信号与随机信号

按确定规律变化的信号称为确定信号。确定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 正弦(型)确知信号

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

式中,振幅  $A$ 、角频率  $\omega_0$ 、相位  $\varphi_0$  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 1.2 正弦(型)随机初相信号

$$X(t) = A\cos(\omega_0 t + \varphi) \quad ①$$

式中,振幅  $A$ 、角频率  $\omega_0$  都是常量,而相位  $\varphi$  是在区间  $[0, 2\pi]$  上均匀分布的随机变量。

由于相位  $\varphi$  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  $\varphi_i, 0 \leq \varphi_i \leq 2\pi$ 。这时对应不同的  $\varphi_i, X(t)$  相应有不同的函数式:

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

可见式 ① 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。

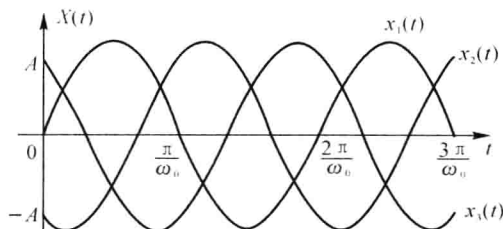


图 1.1 随机初相的正弦信号

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,这是最常遇到的一种随机信号。同理,信号

$$s(t) = A\cos(\omega t + \varphi) \quad ②$$

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  $\omega$  是随机变量,则为随机频率信号。

**例 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。



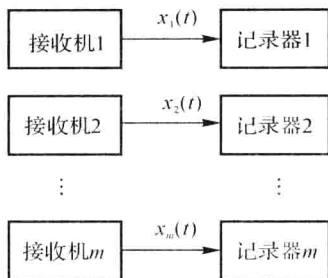


图 1.2 接收机噪声的记录

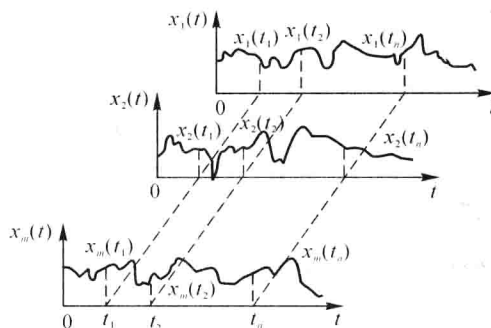


图 1.3 接收机的噪声波形

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,是要着重研究的一种随机过程。

## 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。

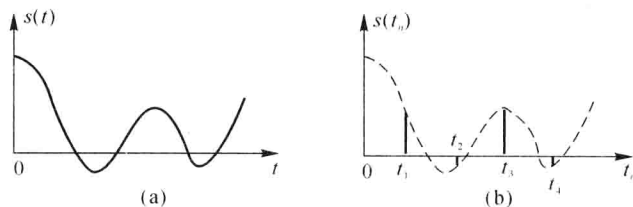


图 1.4 连续时间信号与离散时间信号

(a) 连续信号; (b) 离散信号

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 Dow -

Jones 指数等。

顺便指出,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。

### 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

$$s(t) = s(t + nT), \quad n \text{ 为整数} \quad (1.2.1)$$

对于离散信号,若存在大于零的整数  $N$ ,使

$$s(n) = s(n + kN), \quad k \text{ 为整数} \quad (1.2.2)$$

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。

### 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  $1\Omega$  电阻上的电流,在时间间隔  $-T \leq t \leq T$  内所消耗的能量为

$$W = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T s^2(t) dt \quad (1.2.3)$$

其平均功率为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T s^2(t) dt \quad (1.2.4)$$

若信号函数平方可积,则  $W$  为有限值,称为能量有限信号,简称能量型信号。根据式(1.2.4),能量信号的平均功率为零。客观存在的信号大多是持续时间有限的能量型信号。

另一种情况,若信号  $s(t)$  的  $W$  趋于无穷(相当于  $1\Omega$  电阻消耗的能量),而  $P$  为不等于零的有限值,则称为功率型信号。一个幅度有限的周期信号或随机信号的能量均无限,但其功率有限,称为功率型信号。

一个信号可以既不是能量型信号,也不是功率型信号,但不可能既是能量型信号又是功率型信号。

对于离散信号,可以得出类似的定义和结论。

**例 1.4** 判断下列信号哪些属于能量型信号,哪些属于功率型信号。

$$s_1(t) = \begin{cases} A, & 0 < t < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$