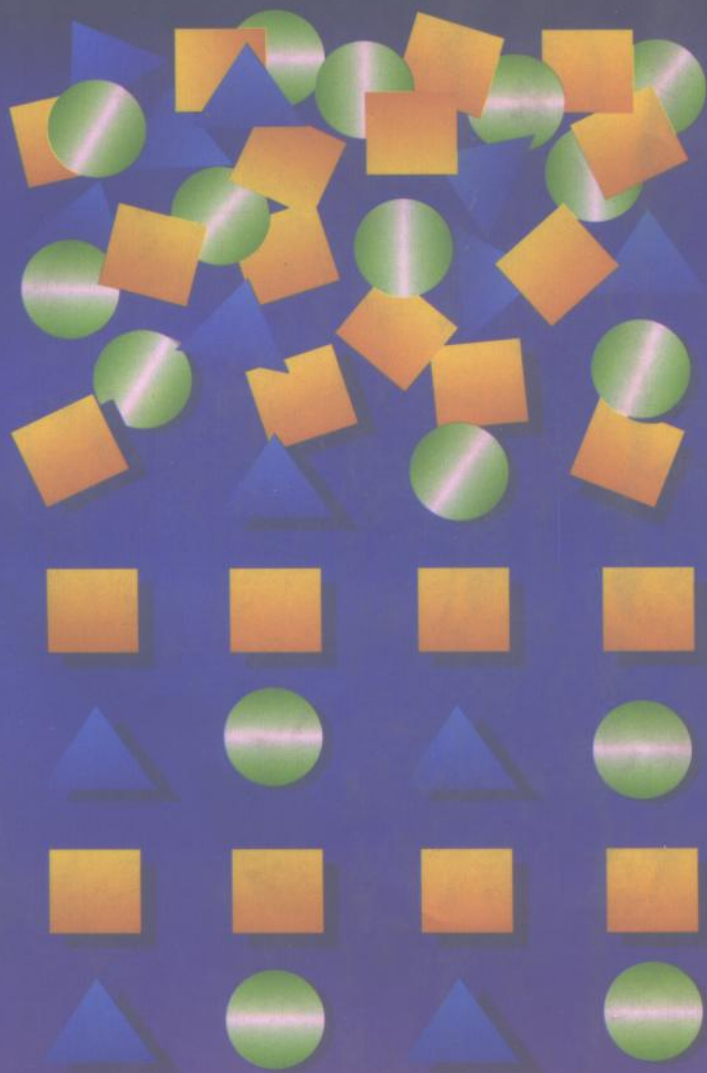


随机信号处理

SUIJI XINHAO CHULI

陈炳和 编著



73.412

609

:1

2655/25

随机信号处理

陈炳和 编著

国防工业出版社

·北京·

4015826

图书在版编目(CIP)数据

随机信号处理/陈炳和著.-北京:国防工业出版社,1996.5

ISBN 7-118-01521-0

I. 随… II. 陈… III. 随机信号-信号处理
IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 07247 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

河北三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 17 $\frac{3}{4}$ 468 千字

1996 年 5 月第 1 版 1996 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1-1000 册 定价:22.20 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

随机信号处理是整个信息科学技术中的一个组成部分,主要研究如何分析和处理随机信号的基本理论和方法。本书是为学习随机信号处理的基本理论和了解其实际应用而编著的。

本书第一章对随机信号处理发展的历史背景做了简要的回顾。第二章论述了信号模型与随机信号的表示,还简要地复习了随机过程的基本概念,讨论了产生信号用的高斯—马尔柯夫(Gauss—Markov)过程模型和限带信号的复数表示。第三章引入检测理论,介绍各种检测准则及按检测准则进行判决的规则,以及这些判决规则的性能。第四章研究信号波形的检测,着重叙述了当干扰(噪声)是加性白噪声时,得到的最优处理机是相关接收机和匹配滤波器。该章还讨论了在非白噪声中检测信号时,接收机的结构,并讨论了未知信号的检测问题。第五章论述了鲁棒检测(robust detection)。首先,介绍了鲁棒性的概念,说明一类非高斯噪声的检测问题;然后,研究鲁棒规则及平稳、无记忆过程的鲁棒检测。第六章研究非参量检测,继续讨论非高斯噪声的检测问题。首先,介绍非参量检测的概念;接着,研究符号检测、秩检测和自适应检测。由上所述,第三~第六章主要研究检测问题。第七章研究参量估计,主要研究各种估计以及估计量的性能限界,并从不同的角度讨论线性估计、非线性估计及非白噪声估计问题。第八章论述波形估计问题,主要研究最优线性估计理论,介绍维纳(Wiener)滤波和卡尔曼(Kalman)滤波,并讨论了非线性信号模型的估计问题。第九章研究功率谱估计,讨论了谱估计的非参量法与谱估计的参量法,重点讲述了现代谱估计理论,特别是最大熵方法。第十章介绍自适应信号处理,重点讨论了最小均方(LMS)算法。在自适应信号处

4015826

理的应用方面,主要介绍了自适应干扰(噪声)对消。第十一章论述随机信号处理的理论和方法在系统辨识方面的应用。首先,介绍了系统辨识的概念;然后,讨论了最小二乘辨识、系统辨识的卡尔曼滤波方法和最大似然辨识等内容。第十二章论述随机信号处理的理论和方法在雷达方面的应用,重点研究统计检测、最大似然估计和卡尔曼滤波在雷达检测和跟踪中的应用。

第二~四、七~十章为基本内容,其他各章可根据不同需要选读或选学。

本书可供科研和工业部门的科技人员参阅,也可供高等院校相关专业的教师、研究生和高年级学生阅读。

本书除第一章外,各章末都有习题。这些习题是由北京航空航天大学博士研究生杨晨阳编写的;全书文稿和图稿由北京航空航天大学高级工程师侯木玉帮助加工和整理;本书在编写过程中,得到了肖春林教授和王春福同志的大力支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免出现疏漏和不妥之处,欢迎读者批评指正。

陈炳和

1995年4月于北京

内 容 简 介

随机信号处理是信息科学技术中的一个重要分支。本书系统地论述了分析和处理随机信号的基本理论和方法,以及随机信号处理的具体应用。

全书共分十二章,内容包括随机信号处理发展历史的回顾、随机信号、随机信号的检测与估计、随机信号的谱估计、自适应随机信号处理,以及随机信号处理在系统辨识和雷达系统方面的应用。书中除第一章外,各章都附有习题。

本书可供从事随机信号处理的科研人员和工程技术人员参考,也可供高等院校相关专业的教师、研究生和高年级学生阅读。

目 录

第一章 引论	1
1.1 概要	1
1.2 消息、信号与信息	2
1.3 信息科学与信息工程	4
1.4 历史背景	5
1.5 随机信号处理	11
第二章 随机信号的表示	12
2.1 随机过程	12
2.2 随机过程分析	32
2.3 线性系统响应	40
2.4 随机过程的表示	48
2.5 随机信号模型	60
2.6 窄带信号	64
习题	84
第三章 检测理论	88
3.1 经典检测理论	89
3.2 贝叶斯准则	92
3.3 极大极小化准则	111
3.4 聂曼—皮尔逊准则	115
3.5 复合假设检验	124
3.6 序列检测	127
3.7 一般高斯问题的二元检测	132
习题	135
第四章 噪声中信号波形的检测	142
4.1 匹配滤波器的原理	142
4.2 白色噪声中已知信号的检测:相关接收机	162

4.3 非白噪声中已知信号的检测	180
4.4 具有多余参量信号的检测	188
习题	189
第五章 鲁棒检测	196
5.1 鲁棒性的概念	196
5.2 鲁棒规则	198
5.3 对平稳和无记忆随机过程的鲁棒检测	200
习题	220
第六章 非参量检测	222
6.1 非参量检测的基本概念	222
6.2 符号检测	223
6.3 秩检测	231
6.4 自适应检测	238
习题	242
第七章 参量估计	244
7.1 估计理论	244
7.2 最大似然估计	246
7.3 估计准则	250
7.4 随机参量的贝叶斯估计	256
7.5 线性均方估计	265
7.6 最小二乘法	272
7.7 估计量的性质	276
7.8 线性估计	283
7.9 非线性估计	287
7.10 非白色噪声估计	290
习题	296
第八章 波形估计	301
8.1 线性变换与正交原理	302
8.2 平稳随机过程的估计——维纳滤波	309
8.3 非平稳随机过程的估计——卡尔曼滤波	327
8.4 卡尔曼滤波和维纳滤波之间的关系	375
8.5 非线性估计	377

习题	381
第九章 功率谱估计	386
9.1 谱估计	386
9.2 谱估计的非参量方法	387
9.3 谱估计的参量方法	406
习题	420
第十章 自适应随机信号处理	424
10.1 数字滤波器	425
10.2 自适应处理器的结构	430
10.3 搜索性能表面的最速下降法	442
10.4 最小均方算法	454
10.5 递归自适应滤波器	458
10.6 自适应噪声对消	462
10.7 自适应陷波滤波器	468
10.8 分离信号和信号的谱线增强	476
习题	478
第十一章 在系统辨识方面的应用	482
11.1 系统辨识的概念	482
11.2 最小二乘法辨识	484
11.3 广义最小二乘辨识	489
11.4 考虑噪声情况下的线性离散系统模型	494
11.5 系统辨识的卡尔曼滤波方法	497
11.6 系统辨识的广义卡尔曼滤波法	498
11.7 最大似然辨识	499
习题	501
第十二章 在雷达系统方面的应用	502
12.1 雷达检测与跟踪的基本概念	502
12.2 雷达信号的检测	503
12.3 雷达恒虚警率处理	514
12.4 雷达参量的估计	531
12.5 机动目标跟踪	541
12.6 多目标跟踪	545

习题	553
参考文献	554

第一章 引 论

1.1 概 要

随着科学技术的发展,信号理论也获得了大量研究成果。目前,不但对确定性信号处理的研究日趋完善,而且对随机信号处理的研究也有了很大的进展。

在日常生活和各项事业中,人们要把大量的消息传递出去,同时,也千方百计地去获取大量的消息。发射和接收消息要借助各种形式的信号来进行。信号是消息的表示形式,消息是信号的内容。描述信号的基本方法是数学表示式。若表达式是时间的函数,则此函数的图像称为信号波形。信号又可分为两大类:确定性信号和随机信号。若信号的数学表示式为一确定的时间函数,则称此信号为确定性信号或规则信号。而赋予统计结构的信号称为随机信号或不确定的信号。信号处理是指对信号的加工或变换。随机信号处理是指对随机信号进行加工或变换。简言之,就是用统计的方法进行信号处理,其数学基础是统计学中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的信号。随机信号处理的目的是从受到干扰和噪声污染的信号中,提取有用的信号。信号处理的主要对象是物理信号,诸如电信号、光信号、声信号及震动信号等等。这些信号表现为一个或多个物理量,它们随着另外一些变量(诸如时间、空间位置或频率等)的变化而变化。随机信号处理在各个领域有着广泛的应用,诸如通信、空间目标跟踪、控制、水声与地震信号处理、计算机辅助诊断、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。

本书系统地介绍在各个领域进行随机信号处理所共同需要的

基础理论,并讨论随机信号处理的概念和方法在各个方面的应用,重点讨论检测和估计理论的基本原理,并作为随机信号处理的基础理论。因为检测和估计两个问题的结构基本是相似的,这种相似有助于解决许多信号处理问题。

为了说明检测与估计的特点,我们以雷达信号的接收和处理为例进行讨论,如图1-1所示。雷达发射脉冲信号碰到目标后反射

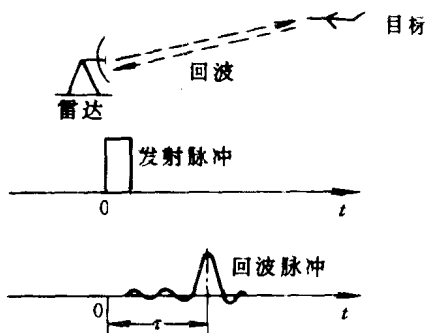


图 1-1 雷达工作示意图

回来,这个回波信号通常十分微弱,被淹没在背景噪声中,因此,需要从噪声中检测信号。在检测到信号以后,还需要估计回波相对发射脉冲的时延 τ ,因为 τ 反映了目标至发射机之间的距离。此外,还可以估计回波信号的多普勒频移,因为多普勒频移反映了目标的运动速度。检测有无目标信号这类问题是信号检测问题。估计回波信号相对发射脉冲的时延 τ 与信号的多普勒频移,这类问题是信号的参量估计问题。检测是从噪声中检测,估计是从随机变化的信号参量中估计,两者都与随机过程的基本理论及噪声统计特性密切相关。

1.2 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。而我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我们所说的知识。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,是客观事物互相联系的一种普遍的形式。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。

1.3 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、处理和控制在的基本原理和方法。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,例如一个弱智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,在进行语音处理、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,故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

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (1-1)$$

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。

1.4 历史背景

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384~322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)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。菲希尔(Fisher)1920年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、1936、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;克拉默(Cramér)1946年提出几个统计问题的精确的最优的形式化;沃尔德(Wald)1947年以及沃尔德与沃尔福奥威茨(Wolfowitz)1948年提出和分析了序列假设检验的最优形式化;布莱维尔(Blackwell)1947年和索瓦热(Savage)1947年研究了序列和无偏参量估计;皮特曼(Pitman)1939年和拉奥(Rao)1945年研究了局部参量估计的方法并分析了导出的性能;哈尔莫斯(Halmos)和萨维奇(Savage)1948年研究了关于朗东·尼柯季于梅(Randon-Nikodym)定理的充分统计量;阿罗(Arrow)等1949年研究了贝叶斯和最大最小形式化序列假设检验;菲克思(Fix)1949年提出了非中心 χ^2 分布表;冯米塞斯(Von Mises)1947年研究了某些统计函数的对称分布;赫尔(Hoel)等

1949年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(Léve)于1963年提出的。除了基本原理之外,格里默(Gramér)于1955年、费勒(Feller)于1966年、帕曾(Parzen)于1960年、塔克(Tucker)于1962年,还涉及到概率论的应用及与数理统计之间的关系。施特拉森(Strassen)1965年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。詹森(Jensen)1906年研究了在不等式约束出现时,凸函数的重要性;冯·诺伊曼(Von Neumann)等1944年研究了对策论在分析经济行为中的应用;卢斯(Luce)等1957年研究了从某些对策中演变的判决;卡尔林(Kalin)1959年研究了对策、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随机统计学(randomized statistics)。德沃列茨基(Dvoretzky)等1951年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;布莱克维尔(Blackwell)等1954年提出研究关于统计判决和对策理论;丹尼尔斯(Daniels)1954年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。从1950~1960年,许多早期的形式化被进一步研究和发展。皮尔逊(Pearson)等1951年提出检验分析幂函数图;谢夫(Scheffé)1959年分析了方差;谢努费(Chernoff)等1959年和莱曼(Lehman)1959年提出统计理论的综合表示;克努耶(Quenouille)1956年研究了参量估计中偏的出现;阿加瓦尔(Agarwell)于1955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;卡尔林(Karlin)等1956年和勒卡姆(Le Cam)1953年研究了贝叶斯判决

规则；巴哈杜尔(Bahadur)于1954年和1958年、布莱克韦尔(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；佩奇(Page)1954年、1955年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70年代，由另外的研究者继续。汉佩尔(Hampel)1971年提出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)于1972年和休伯于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1976年分析了这些估计的崩溃点，登普斯特(Dempster)1975年提出鲁棒的主观主义者(Subjectivist)的观点。类似的，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：罗曼诺夫斯基(Romanowski)等1965年研究了正态分布的模型的某些应用；弗雷克森(Ferguson)1967年提出数学统计学理论；谢费(Shafer)1976年提供了数学理论证据；洛登(Lorden)1971年研究和分析了佩奇的质量控制检验理论；丹尼尔(Daniel)等1971年提供了数据拟合方程的方法；莫斯特勒(Mosteller)等1977年和图基(Tukey)提出数据分析的经验方法；斯通(Stone)1975年研究了局部参量的参量自适应估计；詹姆斯(James)等1961年研究了局部参量的贝叶斯参量估计；切尔诺夫(Chernoff)等1967年和贝兰(Beran)1974年研究了秩非参量统计