

西电学术文库图书



西安电子科技大学研究生精品教材

Data, Models and Decisions

信号检测与 估值理论及应用

张建龙 赵树杰 王 斌 主编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

西电学术文库图书

西安电子科技大学研究生精品教材

信号检测与估值理论及应用

张建龙 赵树杰 王 斌 主 编



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

信号检测与估值是随机信号统计处理的重要基础理论,也是随机信号分析的应用之一。本书扼要介绍了统计信号处理的基本概念和发展历史,回顾了随机信号分析的基本概念,论述了信号统计检测的基本理论、实际噪声中信号的波形检测和信号参量的统计估计理论,并介绍了信号检测与估值理论在遥感图像变化检测、人脸识别和雷达信号处理方面的应用。

本书可作为电子信息专业研究生的教材,也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号检测与估值理论及应用(研究生)/张建龙,赵树杰,王斌主编. —西安:

西安电子科技大学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-5606-4506-3

I. ① 信… II. ① 张… ② 赵… ③ 王… III. ① 信号检测
② 参数估计 IV. ① TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 102332 号

策 划 高 樱

责任编辑 唐小玉 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2017年9月第1版 2017年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 14

字 数 329千字

印 数 1~3000册

定 价 35.00元

ISBN 978-7-5606-4506-3/TN

XDUP 4798001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前言

随着现代通信理论、信息理论、计算机科学与技术及微电子技术等的飞速发展,随机信号统计处理理论和技术也在朝着技术指标要求更高、干扰环境及信号形式多样化的方向发展,并且已经广泛应用于电子信息系统、生物医学工程、航空航天系统工程、模式识别、自动控制等领域。随机信号统计处理的基础理论是信号检测与估值理论。学习信号检测与估值理论将为进一步学习、研究随机信号统计处理打下扎实的理论基础,同时其基本概念、基本理论和分析问题的基本方法也可为解决实际应用,如图像信号处理、音频信号处理、雷达信号处理等打下良好基础。

本书是作者在西安电子科技大学“统计信号处理”课程所用教材(赵树杰主编,已于2013年9月出版)的基础之上,总结多年教学经验,参考国内外文献资料,并吸取了部分科学研究成果编写而成的。本书着重加强了对知识的系统性描述,增加和修改了对部分内容的描述方式,尽量用更为通俗易懂的方式,例如图示法、前后对比等多种方式,从多个角度描述问题,从而找到解决问题的思路。在内容上,本书增加了统计信号处理理论的建立和发展过程,介绍了每个发展阶段的代表性人物以及他们的重要贡献,介绍了推动随机信号检测与估值理论应用的雷达系统的产生和发展过程,提高了全书的可读性和趣味性。除此之外,本书在第4章增加了匹配滤波器的应用部分,同时增加了基于时域投影方法的高斯白噪声条件下信号波形检测的推导过程,并将其与正交级数分解方法相对比;在第5章增加了最大熵估计方法的推导过程;在最后一章详细论述了信号检测与估值理论在遥感图像处理、人脸识别以及雷达信号处理中应用的过程。全书的数学推演基本保持在高年级本科生和研究生以及具有线性代数、矩阵论、概率论和随机过程基础知识的工程技术人员所能理解的水平上。在内容安排上,一般由约束较多的特殊情况到约束较少的一般情况,由简单问题到复杂问题,从确知到随机,从实信号到复信号,从数学理论到工程实践,这样的过程有利于读者由浅入深地进行阅读和理解。

本书第1章论述了信号的随机性及统计处理方法,介绍了信号检测与估计的基本概念,给出了本书的内容安排和阅读建议;第2章扼要复习了信号检测与估计理论的基础知识,主要包括随机变量、随机过程及其统计描述和主要统计特性,复随机过程及其统计描述,随机参量信号及其统计描述等;第3章在论述信号统计检测基本概念的基础上,讨论了确知信号的最佳检测准则、判决式和性能分析,随机参量信号的统计检测以及一般高斯信号的统计检测问题;第4章首先讨论了统计信号检测理论与噪声中信号波形检测的联系和区别及解决问题的思路方法,其次论述了匹配滤波器理论和随机过程的正交级数展开两个预备知识,最后分别讨论了基于时域投影方法和正交级数分解方法的高斯白噪声中确知信号的波形检测及基于正交级数分解的高斯有色噪声中确知信号的波形检测;第5章重点讨论了信号参量的统计估计准则、估计量的构造和性质、非随机矢量函数的估计及信号波形中参量的估计,并介绍了线性最小均方误差估计和线性最小二乘估计方法;第6章重点

介绍了信号检测与估值理论的推广应用，主要包括遥感图像变化检测中的统计判决方法和马尔科夫随机场最大后验概率判决方法，基于最大似然判决和最大后验概率判决的人脸识别方法，以及基于统计判决的最佳雷达接收机设计方法，并给出了所有应用的详细理论推导过程，供读者阅读和理解。

本书中“估值”与“估计”涵义相同，书中统一采用“估计”一词。

本书是为研究生“统计信号处理”课程编写的教材，全书内容知识体系完整，可读性和趣味性强，书中的理论应用实践部分可加深读者对信号检测与估计理论的实际应用的认识，提高读者理论联系实际的能力和解决问题的能力。作为 46 课时的研究生教材，建议讲授第 1 章、第 2 章的全部内容和第 3 章至第 6 章的主要内容。此外，书中带 * 号的章节可作为选学内容。

本书在编写过程中得到了西安电子科技大学教材建设项目的资助。在内容的编写上，西安电子科技大学的张建龙老师撰写了第 1 章、第 3 章、第 4 章和第 6 章，赵树杰老师撰写了第 2 章和第 5 章，王斌老师对全书内容进行了校验和修订。此外，高新波老师和李洁老师给出了宝贵的修改意见和建议，研究生魏耀同学、王亚南同学翻译了部分外文资料，在此也对他们表示感谢。同时，还要向所有参考文献的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在欠妥之处，我们殷切希望广大读者批评指正。

作者
于西安电子科技大学
2017 年 2 月

目 录

第 1 章 信号检测与估计概论	1
1.1 引言	1
1.2 信号的随机性及其统计处理方法	1
1.2.1 信号的随机性	2
1.2.2 随机信号统计处理的理论和方法	3
1.3 信号检测与估计理论概述	4
1.4 统计信号处理发展简史	6
1.4.1 统计理论的发展	6
1.4.2 应用技术的发展	8
第 2 章 信号检测与估计理论的基础知识	11
2.1 引言	11
2.2 离散随机信号的统计特性描述	11
2.2.1 离散随机信号的概率密度函数	11
2.2.2 离散随机信号的统计平均量	12
2.2.3 离散随机信号矢量的联合概率密度函数	12
2.2.4 离散随机信号矢量的统计平均量	12
2.2.5 离散随机信号矢量各分量之间的互不相关性和相互统计独立性	13
2.2.6 高斯离散随机信号矢量的统计特性	13
2.2.7 离散随机信号的函数	16
* 2.2.8 离散随机信号的特征函数	19
2.3 连续随机信号的统计特性描述	21
2.3.1 连续随机信号的概率密度函数	21
2.3.2 连续随机信号的统计平均量	21
2.3.3 连续随机信号的平稳性	23
2.3.4 平稳连续随机信号的各态历经性	24
2.3.5 连续随机信号的正交性、互不相关性和相互统计独立性	25
2.3.6 平稳连续随机信号的功率谱密度	26
2.3.7 高斯连续随机信号	27
2.3.8 常用随机信号	28
* 2.4 复随机信号的统计特性描述	30

2.4.1	复随机信号	30
2.4.2	复离散随机信号的统计特性描述	30
2.4.3	复连续随机信号的统计特性描述	31
2.4.4	广义平稳的复连续随机信号	32
2.4.5	复高斯连续随机信号	34
2.5	线性时不变系统对平稳连续随机信号的响应	35
2.5.1	平稳连续随机信号 $y(t)$ 的平稳性	36
2.5.2	平稳连续随机信号 $y(t)$ 的主要统计平均量	36
2.6	噪声及其统计特性描述	37
2.7	信号及其统计特性描述	40
第3章	信号状态的统计检测理论	43
3.1	引言	43
3.2	信号状态统计检测理论的概念	44
3.2.1	二元信号状态的统计检测	44
3.2.2	M 元信号状态的统计检测	50
3.3	二元信号的贝叶斯检测准则	51
3.3.1	平均代价与贝叶斯检测准则的概念	51
3.3.2	最佳判决式	52
3.3.3	检测性能分析	53
3.4	二元信号的派生贝叶斯检测准则	58
3.4.1	最小平均错误概率检测准则	59
3.4.2	最大后验概率检测准则	62
3.4.3	极小化极大检测准则	64
3.4.4	奈曼-皮尔逊检测准则	67
3.5	高斯观测信号时二元信号状态的统计检测	71
3.5.1	信号检测的最佳判决式	71
3.5.2	不等均值矢量、等协方差矩阵条件下的信号检测	72
* 3.5.3	等均值矢量、不等协方差矩阵时信号的检测	75
3.6	M 元信号状态的统计检测	80
3.6.1	M 元信号的贝叶斯检测准则	81
3.6.2	M 元信号的最小平均错误概率检测准则	81
第4章	信号波形的检测	84
4.1	引言	84
4.2	匹配滤波器理论	86
4.2.1	匹配滤波器的概念	86
4.2.2	匹配滤波器的设计	86
4.2.3	匹配滤波器的特性	88

4.2.4 匹配滤波器的应用	92
4.3 基于时域分解的信号波形检测	94
4.3.1 噪声中一般二元信号的波形检测	94
4.3.2 噪声中一般二元已知信号的检测	100
4.4 连续随机信号的正交级数展开	102
4.4.1 正交函数集概述	102
4.4.2 连续随机信号的正交级数展开	103
4.4.3 平稳连续随机信号的卡亨南-洛维展开	104
4.4.4 白噪声情况下正交函数集的任意性	105
4.4.5 平稳连续随机参量信号的正交级数展开	105
4.5 高斯白噪声中确知信号波形的检测	106
4.5.1 简单二元确知信号波形的检测	106
4.5.2 一般二元确知信号波形的检测	113
4.5.3 M 元确知信号波形的检测	122
4.6 高斯有色噪声中确知信号波形的检测	131
4.6.1 二元确知信号波形的检测	131
4.6.2 M 元确知信号波形的检测	138
第 5 章 信号参量的统计估计理论	139
5.1 引言	139
5.2 信号参量统计估计理论的概念	139
5.3 随机单参量的贝叶斯估计	141
5.3.1 平均代价与贝叶斯估计的概念	141
5.3.2 贝叶斯估计量的构造	142
5.4 非随机单参量的最大似然估计	147
5.4.1 最大似然估计的原理	147
5.4.2 最大似然估计量的构造	147
5.4.3 信号参量函数的最大似然估计	148
5.5 最大熵估计	149
5.6 估计量的性质	150
5.6.1 估计量的主要性质	150
5.6.2 克拉美-罗不等式和克拉美-罗下界	152
5.7 随机矢量的贝叶斯估计和非随机矢量的最大似然估计	159
5.7.1 随机矢量的贝叶斯估计	160
5.7.2 非随机矢量的最大似然估计	161
5.7.3 估计矢量的性质	161
5.7.4 非随机矢量函数的最大似然估计	164
5.7.5 非随机矢量函数估计的克拉美-罗下界	164
5.8 高斯观测信号时信号参量的统计估计	166

5.8.1	线性观测模型	166
5.8.2	高斯噪声中非随机矢量的最大似然估计	166
5.8.3	高斯噪声中高斯随机矢量的贝叶斯估计	167
5.9	线性最小均方误差估计	171
5.9.1	线性最小均方误差估计的概念	171
5.9.2	线性最小均方误差估计矢量的构造	171
5.9.3	线性最小均方误差估计矢量的性质	172
5.9.4	线性最小均方误差估计的递推算法	174
5.9.5	随机矢量函数的线性最小均方误差估计	175
5.9.6	单参量的线性最小均方误差估计	176
5.10	最小二乘估计	178
5.10.1	最小二乘估计的概念	178
5.10.2	线性最小二乘估计	179
5.10.3	线性最小二乘加权估计	181
5.10.4	线性最小二乘估计的递推算法	182
5.10.5	单参量的线性最小二乘估计	183
第 6 章	统计信号处理理论的应用	185
6.1	引言	185
6.2	遥感图像变化检测中的统计判决方法	185
6.2.1	概述	185
6.2.2	基于似然比检验的 SAR 图像变化检测	188
6.3	基于贝叶斯决策的人脸识别方法	192
6.3.1	人脸识别介绍	192
6.3.2	人脸识别的贝叶斯决策建模	193
6.4	雷达信号的信号检测理论与估值的统计判决方法	200
6.4.1	已知先验分布雷达信号的统计检测理论	200
6.4.2	未知参数雷达信号的检测原则	202
6.4.3	信号振幅和相位的估计	203
6.4.4	目标速度和距离的估计	205
附录 I	连续信号运算的有限表示	210
附录 II	雷达接收机似然比检验式	211
附录 III	最佳估计量平均风险	213
参考文献		214

第 1 章

信号检测与估计概论

1.1 引言

统计信号处理是现代智能技术的基础之一,对科学研究的整个过程正起着越来越重要的支持作用,且已在生物信息学、计算金融学、遥感信息处理、机器人、工业过程控制、信息安全等方面做出了卓越贡献。统计信号处理与概率统计密切相关,后者是前者的理论基础。统计信号处理的基本研究思想是根据观测样本来寻找无法通过原理分析得到的规律,然后利用得到的规律对未来数据或者无法观测的数据进行预测。

概率统计是描述复杂世界尤其是带有随机性质的物理世界的通用语言。随机信号在自然界中是普遍存在的,例如热噪声、地震波、电话线路上的语音信号等都是随机信号。即使是确定信号,再叠加上比较大的随机噪声后也会变成随机信号,如雷达回波信号、通信接收信号等。

本书主要讨论根据观测到的随机信号对确知信号的状态进行估计,并对参数和波形进行估计和预测,这称为信号检测与估计。

信号检测与估计是统计信号处理方法的重要分支和典型应用,是从噪声背景中提取有用信息的最佳理论和方法,其基本内容包括信号检测、估计理论和最佳滤波理论及其应用。信号检测与估计理论是随机信号处理的基础理论知识之一,深入学习信号检测与估计理论有助于提高随机信号统计处理和信号处理的水平,夯实随机信号的理论基础。

本章重点讨论电子信息系统中观测(接收)到的待处理信号的随机性及其统计处理方法的含义,简述信号的检测理论、估计理论和滤波理论的基本概念,并介绍统计信号处理的发展历史。

1.2 信号的随机性及其统计处理方法

在信息系统中,信号是信息的载体。

图 1.2.1 是一个典型的无线通信系统的原理框图。众所周知,通信是为了正确传递信息。在图 1.2.1 中,信源是指信息源,其产生的携带信息的电信号经调制后变成与信道匹

配的无线电信号,进行功率放大后再由发射天线将其辐射到无线信道中;无线电信号在信道中以电磁波的形式传播到接收端,并由接收天线接收;无线电信号经接收系统放大、解调后,通过基带信号处理获取所需要的信息,然后送入信宿中。

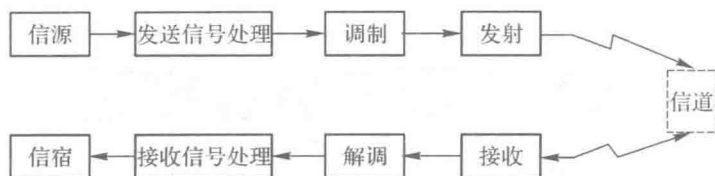


图 1.2.1 无线通信系统原理框图

图 1.2.2 是雷达的工作原理图。在雷达系统中,信源发送的确定的无线电波信号遇到目标(或其他障碍物)后会产生反射回波,这些反射回波信号中含有目标的坐标参数、运动参数、特征参数等信息;雷达接收到目标的反射回波信号后即进行信号处理;若判定目标存在,则提取目标的有关参数,建立其轨迹并进行目标的特性识别研究等。

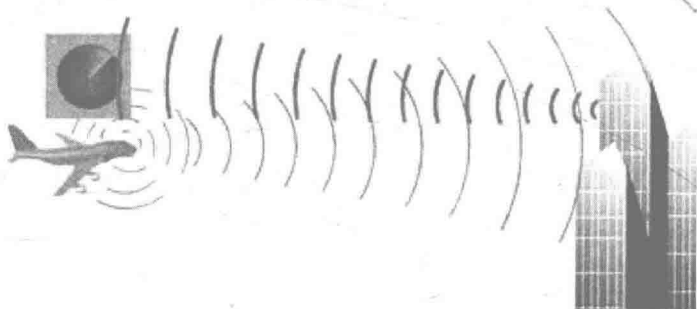


图 1.2.2 雷达工作原理图

在自动控制系统中,之前从信道采集的含有系统运行状态信息的信号,经信号处理后得到系统“最佳”运行状态的控制信号;然后通过反馈信道将这些控制信号传送给系统的执行部件,调整其运行状态或参数,构成闭环的自动控制系统。

一般地说,信号是自变量的函数。自变量可以是时间、空间、频率等变量,也可以是电信号、光信号、温度等物理量。本书的研究对象是电子信息系统中以时间为自变量的电信号。除另作说明外,本书中的各类信号(含干扰信号)均为实信号。

1.2.1 信号的随机性

在信息系统中,携带信息的信号是有用的信号。最基本的有用信号是确知信号,我们用 $s(t)$ 表示连续的确知信号。考虑到信号在产生、传输、接收和处理的过程中,其参数往往会发生变化,如信号相位的随机变化、振幅的随机起伏、频率的随机变化等;或者虽然信号参数的变化是非随机的,但变化后的参数却成了未知参量。因此,另一类有用信号是随机(或未知)参量信号,其连续信号表示为 $s(t, \theta)$, 其中 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M)^T$, 代表信号中含有 M 个随机(或未知)参量。

为了传输不同的信息,有用的信号应有两个或两个以上不同的状态。例如,在雷达系统的接收信号中,要么有目标反射回波信号(即目标存在),要么没有目标反射回波信号(即目标不存在),这是两个不同的信号状态。类似地,在 M 元通信系统中,有用的信号有 M 个不同的状态。

实际系统中,信号在产生、传输、接收和处理的过程中,不可避免地会受到系统内部和系统外部各种各样的随机干扰。其中,系统的内部干扰主要有器件热噪声、电源波动、系统特性不理想、正交双通道信号处理中正交两路信号的幅度不一致性和相位不正交性、多通道信号处理时通道之间的不平衡性、数/模变换的量化误差、运算中的有限字长效应等。此外,各种无源干扰、天电干扰、有源干扰,大气层、电离层、宇宙空间中自然界的各种电磁现象,电气设备、无线电台、电视台、通信系统等,其信号的频谱有的比较复杂,频率分量占的频带也比较宽,当这些信号的部分频率分量进入所研究的系统时,就形成了系统的外部干扰。

在通信、雷达等电子信息系统中,在信号状态检测之前,要对接收到的无源干扰、有源干扰等各种杂波进行杂波抑制处理,如自适应天线旁瓣相消(Adaptive Antenna Side Beam Cancel)、动目标显示(Moving Target Indication)、自适应动目标显示(Adaptive Moving Target Indication)、动目标检测(Moving Target Detection)和恒虚警率(Constant False Alarm Rate)处理等。抑制处理后的杂波剩余分量具有随机噪声的统计特性,因此,在研究信号的检测与估计问题时,可将随机干扰统称为噪声,记为 $n(t)$ 。

根据噪声与有用信号之间的关系,可将噪声分为加性噪声、乘性噪声和乘加噪声三类。如果噪声与有用信号之间是叠加的关系,则称为加性噪声;如果噪声是对有用信号的一种调制,则称为乘性噪声;如果噪声中既含有加性分量,又含有乘性分量,则称为乘加噪声。

在实际系统中,噪声的主要分量是加性分量,所以在电子信息系统中一般只考虑加性噪声。因此,持续时间为 $0 \leq t \leq T$ 的观测信号(接收信号) $x(t)$ 可表示为

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.2.1a)$$

或

$$x(t) = s(t; \theta) + n(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.2.1b)$$

$x(t)$ 是待处理的连续信号。因为干扰 $n(t)$ 是随机噪声,所以信号 $x(t)$ 一定是连续随机信号。

待处理信号 $x(t)$ 的离散可表示为

$$x_k = s_k + n_k \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1.2.2a)$$

或

$$x_k = s_{k|\theta} + n_k \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1.2.2b)$$

式中, $x_k (k = 1, 2, \dots, N)$ 是离散随机信号。

1.2.2 随机信号统计处理的理论和方法

前面已经讨论过了,随机噪声干扰环境中,待处理的观测信号(接收信号)是随机信

号。随机信号是具有统计特性的信号，应当用统计学中的理论和方法进行处理，这主要体现在如下三个方面：

(1) 对随机信号的特性进行统计描述，即用概率密度函数、均值、方差、相关函数、协方差函数等统计平均量及频域的功率谱密度等来描述随机信号的统计特性。

(2) 基于随机信号统计特性所提出的处理指标要求是一个统计指标，选用的处理准则是统计意义上的最佳准则，进而有诸如信号状态的判决、信号参量的估计、信号波形的滤波等相应的统计处理方法。

(3) 处理结果的评价，即用相应的统计平均量来度量性能，如判决概率、平均代价、平均错误概率、均方误差等。

所以，对随机信号的处理即为统计信号处理。我们将要研究的信号检测与估计理论，就是从上述三个方面来展开讨论的。

1.3 信号检测与估计理论概述

信号检测与估计理论是指研究信号状态最佳判决、信号参量最佳估计和信号波形最佳滤波的概念、方法和性能。

在随机噪声干扰的环境中，根据接收信号在不同信号状态下统计特性的差别，采用某种最佳信号检测准则，做出信号是属于哪个状态的判决，研究检测系统的结构，分析信号检测的性能等，就是信号状态统计检测理论研究的内容。

在随机噪声干扰的环境中，根据观测信号及其统计特性，采用某种最佳信号参量估计准则，研究估计量的构造，讨论估计量的性质，就是信号参量统计估计理论研究的内容。

如果估计的是信号的连续时间波形或离散时刻状态，就是信号的滤波。信号的滤波一般采用线性最小均方误差准则。根据观测信号、被估计信号的数学模型，估计信号当前时刻的波形或状态，称为滤波；估计信号未来某时刻的波形或状态，称为预测；估计信号过去某时刻的波形或状态，称为平滑。实际上，还可以实现信号波形或状态的其他估计。

让我们通过下面两个例子来说明信号检测与估计问题。

在雷达系统中，当没有目标反射回波信号时，接收信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = n(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.3.1a)$$

而当发射信号碰到目标产生反射回波信号 $s(t)$ 时，接收信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.3.1b)$$

根据接收信号 $x(t)$ 统计特性的差别，可以判决目标的存在与否。一旦判决目标存在，就需要确定目标的有关参数，如斜距 R 、方位 β 、高度 H 等；还需要估计目标的速度 v 、多普勒频率 f_d 等运动参数，并建立目标的航迹，预测未来某时刻目标的状态，以实现目标跟踪等功能。这就是雷达系统中信号状态的统计检测、信号参量的统计估计和信号波形或状态的滤波。图 1.3.1 所示为典型雷达系统及工作原理示意图。

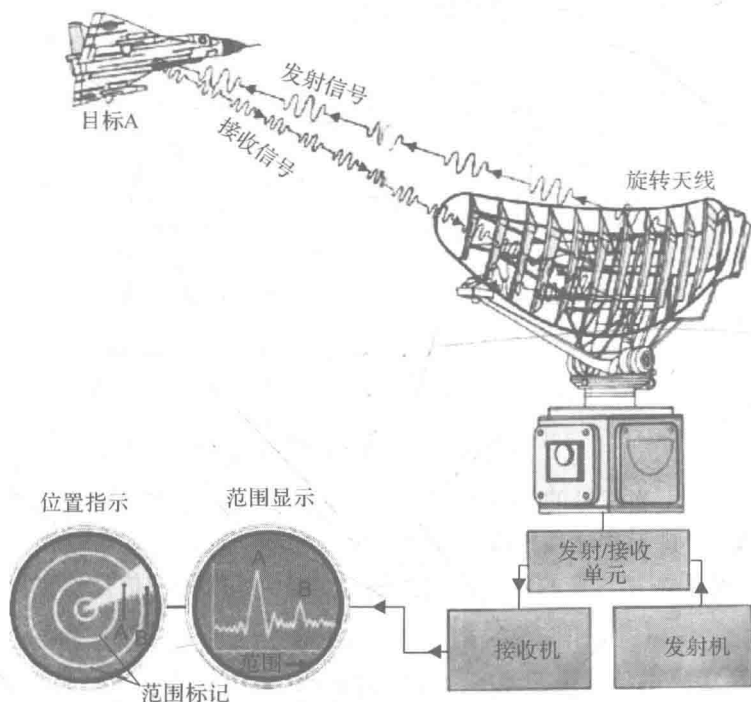


图 1.3.1 典型雷达系统及工作原理示意图

图 1.3.2 是飞机出现后雷达的回波波形，该波形中包含飞机的位置、高度、速度、方位等一系列参数信息，同时可以根据观测波形估计目标飞机的飞行轨迹。

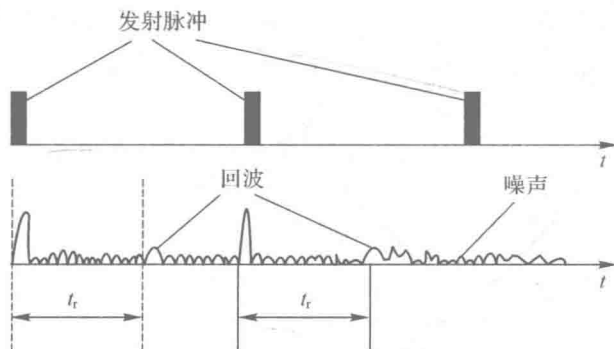


图 1.3.2 雷达参数与回波信号示意图

在通信过程中，主要传输二进制信息“0”、“1”信号。假定在传输过程中系统用 5 V 电压信号代表逻辑“1”，-5 V 电压信号代表逻辑“0”。理想传输信道条件下，发送端是 5 V 电压，接收端同样会得到 5 V 电压，发送端是 -5 V 电压，接收端同样为 -5 V 电压，这是确定性映射，如图 1.3.3(a)所示。但事实上实际信道都可以视作随机信号，由于受随机干扰的影响，发送端的 5 V 电压在接收端会变成在 2 V 上下浮动，-5 V 电压在接收端会变成在 -2 V 上下浮动，如图 1.3.3(b)所示，即确定性映射变成了随机映射。此时，如何根据接收信号有效判断发送信号的状态就成为了关键问题，也就是将接收端信号分为两类信号，分别对应逻辑“0”和逻辑“1”。从某种意义上说，统计信号处理中的信号检测也是一种

分类问题,用统计判决的方法对信号进行分类。

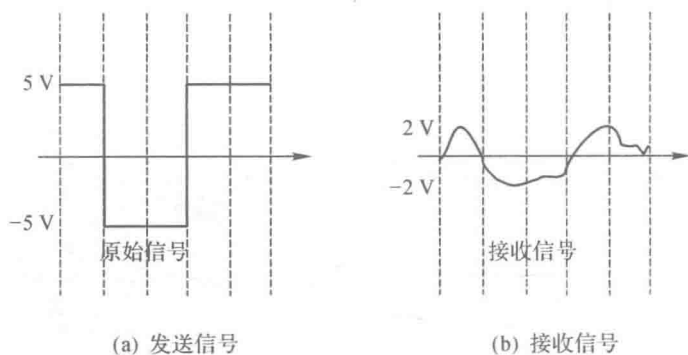


图 1.3.3 二进制通信过程中信号受噪声影响变成随机信号

在通信系统中,当信号的状态不同时,接收信号的统计特性是不一样的,据此可以判决出信号的状态,进而估计该信号的振幅、相位、频率和到达时间等参数,还可以从随机噪声的干扰背景中恢复信号的波形。这就是二元通信系统中的信号检测与估计问题。

1.4 统计信号处理发展简史

统计信号处理从理论萌芽、雏形到发展成熟经历了上百年的时间,在近代尤其是第二次世界大战中伴随着雷达的出现而大放异彩。在此,我们从基础理论和和技术应用两个角度回顾统计信号处理的发展历程。

1.4.1 统计理论的发展

统计最早可追溯到公元前 1 世纪初的人口普查计算中。不过,这虽然是统计性质的工作,但还不能算是现代意义下的统计学。到了 18 世纪,由于受到概率论的影响,统计才开始向一门独立的学科发展,用于描述表征事物状态的某些特征。这一时期的代表性人物包括贝叶斯、高斯和高尔顿。

英国数学家托马斯·贝叶斯(Thomas Bayes,1701—1761 年)是概率统计理论的先驱,他首次将归纳推理法用于概率论基础理论,并创立了贝叶斯统计理论,对统计决策函数、统计推断、统计的估算等做出了重要贡献。他死后,他的朋友理查德·普莱斯(Richard Price)于 1763 年将他的著作《机会问题的解法》(An essay towards solving a problem in the doctrine of chances)寄给了英国皇家学会,这一著作对于现代概率论和数理统计产生了重要的影响。贝叶斯的另一著作《机会的学说概论》发表于 1758 年。贝叶斯理论在这个时期逐步发展成统计学中的贝叶斯学派。在此之后,德国数学家约翰·卡尔·弗里德里希·高斯(Johann Karl Friedrich Gauss)和法国数学家皮埃尔-西蒙·拉普拉斯(Pierre-Simon Laplace)用贝叶斯定理讨论了参数的估计法。那时使用的符号和术语,至今仍然沿用。

1791 年高斯(1777—1855 年)利用最小二乘法准确预测出了小行星谷神星的轨迹,这是近代数理统计学发展初期的重大事件。20 世纪初以来,最小二乘法方面的工作又经过

了一些学者的发展后,如今已成为数理统计学中的主要方法。除此之外,高斯提出的正态分布影响深远,以至在19世纪相当长的时期内,一些学者认为这个分布可用于描述几乎一切常见的数据。直到现在,有关正态分布的统计方法,仍占据着常用统计方法中很重要的一部分。

19世纪,英国生物学和统计学家法兰西斯·高尔顿(Francis Galton, 1822—1911年)在研究人类遗传问题时提出了“回归”的概念。他在遗传研究中为了弄清父子两辈特征的相关关系,揭示了统计方法在生物学研究中的应用;他引进回归直线、相关系数的概念,创建了回归分析。经过近百年的理论研究和实践发展,逻辑回归、多元回归、非线性回归等回归分析方法已经成为重要的统计分析手段。

数理统计学发展史上极重要的一个时期是从19世纪到二次大战结束。现在多数人倾向于把现代数理统计学的起点和达到成熟定为这个时期的始末。这确是数理统计学蓬勃发展的一个时期,许多重要的基本观点、方法以及统计学中主要的分支学科,都是在这个时期建立和发展起来的。

高尔顿的弟子卡尔·皮尔逊(Karl Pearson, 1857—1936年)是这一时期的代表性人物。他进一步发展了回归与相关的理论,成功地创建了生物统计学,并提出了“总体”的概念。1891年之后,皮尔逊潜心研究区分物种时用的数据分布理论,提出了“概率”和“相关”的概念,接着又提出标准差、正态曲线、平均变差、均方根误差等一系列数理统计基本术语。皮尔逊致力于大样本理论的研究,他发现不少生物方面的数据有显著的偏态,不适合用正态分布去刻画,为此他提出了后来以他的名字命名的分布族;为估计这个分布族中的参数,他提出了“矩法”;为考察实际数据与这族分布的拟合分布优劣问题,他引进了著名的“ χ^2 检验法”,并在理论上研究了其性质。这个检验法是假设检验最早、最典型的方法,他在理论分布完全给定的情况下求出了检验统计量的极限分布。1901年,他创办了《生物统计学》,使数理统计有了自己的阵地,这是20世纪初叶数学的重大收获之一。

1908年,皮尔逊的学生威廉·希利·戈塞(William Sealy Gosset, 1876—1937年)发现了正态分布的精确分布——T分布(也称为“student分布”),创始了“精确样本理论”。他署名“Student”在《生物统计学》上发表文章,改进了皮尔逊的方法。他的发现不仅不再依靠近似计算,而且能用所谓的小样本进行统计推断,并使统计学的对象由集团现象转变为随机现象。现“Student分布”已成为数理统计学中的常用工具,“Student氏”也是一个常见的术语。

英国实验遗传学家兼统计学家罗纳德·艾尔默·费歇尔(Ronald Aylmer Fisher, 1890—1962年)是另一位代表性人物,他是将数理统计作为一门数学学科的奠基者。他开创的试验设计法,凭借随机化的手段成功地把概率模型带进了实验领域,并建立了方差分析法来分析这种模型。费歇尔的试验设计,既把实践带入理论的视野内,又促进了实践的进展,从而大量地节省了人力、物力。试验设计这个主题,后来为众多数学家所使用和发展。费歇尔还引进了显著性检验的概念,成为假设检验理论的先驱;他考察了估计的精度与样本所具有的信息之间的关系而得到信息量的概念;他对测量数据中的信息、压缩数据而不损失信息以及对一个模型的参数估计等贡献了完善的理论概念;他把一致性、有效性和充分性作为参数估计量应具备的基本性质;他还在1912年提出了极大似然法,这是应用上最广的一种估计法。他在20世纪20年代的工作,奠定了参数估计的理论基础。关于 χ^2 检验,

费歇尔于1924年解决了理论分布包含有限个参数的情况。基于此方法的列表检验,在应用上有重要意义。费歇尔在一般的统计思想方面也作出过重要贡献,他提出的“信任推断法”在统计学界引起了相当大的兴趣和争论。费歇尔给出了许多现代统计学的基础概念,思考方法十分直观。他造就了一个学派,在纯粹数学和应用数学方面都建树卓越。

这个时期作出重要贡献的统计学家中,还应提到乔治·奈曼(George Neyman, 1894—1981年)和卡尔·皮尔逊。他们在从1928年开始的一系列重要工作中,发展了假设检验的系列理论。奈曼-皮尔逊假设检验理论提出和精确化了一些重要概念,该理论对后世也产生了巨大影响,是现今统计教科书中不可缺少的一个组成部分。奈曼还创立了系统的置信区间估计理论。早在奈曼的工作之前,区间估计就已是一种常用形式。但是奈曼从1934年开始的一系列工作,把区间估计理论置于柯尔莫哥洛夫概率论公理体系的基础之上,因而奠定了严格的理论基础。他还把求区间估计的问题表达为一种数学上的最优解问题,这个理论与奈曼-皮尔逊假设检验理论,对于数理统计形成一门严格的数学分支起了重大作用。

1.4.2 应用技术的发展

信号检测与估计是统计信号处理在近代科学中的主要应用之一,该理论自20世纪40年代问世以来,得到了迅速的发展和广泛的应用,其发展历程可以大致分为3个阶段。

第一阶段:初创和奠基阶段。

信号检测与估计理论是从20世纪40年代第二次世界大战中逐步形成和发展起来的。

1864年,英国物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦建立了电磁理论的基本公式,出版了《电磁场动力学》,拉开了人类对电磁波(无线电波)认识和应用的序幕。进入20世纪,无线电波开始应用于军事领域,但是直到一战末期,其用途仍主要局限于通讯领域。不过,无线电波的应用潜力已获得了各国的广泛认同。20世纪30年代来临时,美、英、法、德以及苏联等国相继在无线电探测领域取得了突破,雷达的概念开始进入实用化阶段,并在接踵而至的第二次世界大战中粉墨登场,广泛应用于各国的防空战场。

战争的不断推进为雷达技术的发展和应用提供了平台,许多技术模型和战术战法都成为了教科书式的经典,成为军用雷达史上一块块不可磨灭的里程碑。

20世纪30年代,随着纳粹德国空军的日益壮大,隔海相望的日不落帝国感受到了明显的压力,觉得必须拿出办法来制衡这股来势汹汹的空中力量。摆在这个老牌帝国面前的有三条路:一是建立一支足够强大的轰炸机群作为威慑,一旦本土受到攻击,也能发动有效反击;二是通过签署国际武器控制协定来制约纳粹德国空军的发展;最后一种也是最直接的一种,就是发展战斗机部队和探测技术,建立直接有效的防空力量。

第一种办法受到当时英国空军部的支持,但由于军费预算的限制而无法达成,制约纳粹德国空军的外交努力也流于失败。而第三条路不仅受到当时空战理论的束缚,在技术上也存在较大的困难和瓶颈。但是,这条路得当了上层的支持,并专门成立了防空科学研究委员会在这一领域进行深入研究。研究的角度之一就是要找到一种“死亡射线”,或使飞行员失去行为能力,或使发动机停止工作,或者干脆引爆飞机。因此,委员会找到了当时在英国国家物理实验室工作的英国发明家詹姆斯·瓦特,希望从他那里得到更加专业的意见和建议。