

高等院校信息与通信工程系列教材

信号检测与估计理论

赵树杰 赵建勋 编著

清华大学出版社



高等院校信息与通信工程系列教材

信号检测与估计理论

赵树杰 赵建勋 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

信号检测与估计理论是随机信号统计处理的基础。本书在扼要复习信号检测与估计理论基础知识后,首先论述信号的统计检测理论和信号波形的检测,介绍了基于简单假设检验的确知信号最佳检测的概念、理论、技术和性能以及基于复合假设检验的随机参量信号的最佳检测问题;然后论述信号参量的统计估计理论和信号波形的滤波理论,讨论了在贝叶斯估计等各种估计准则下估计量的构造和性质,介绍了维纳滤波器的设计方法,导出了卡尔曼滤波的递推算法,并研究了它们的性质;最后介绍噪声或杂波干扰环境中的恒虚警率检测技术和性能,简要讨论了信号的非参量检测和稳健性检测的理论和方法。

本书取材注意结构的完整性和内容的系统性;重视理论联系实际及物理概念与含义的阐述,注意对新概念、新理论的介绍;内容的编排由简单到复杂,由需要较多的先验知识到逐步减少先验知识,由约束条件较严格到逐步放宽约束,便于读者阅读和理解。第2章~第7章提供有大量习题,供读者练习,以巩固基本概念和理论,拓宽知识面,掌握基本的运算技能。

本书可供信号与信息处理、通信与信息系统、电路与系统等电子信息类学科的研究生和高年级本科生作教材使用,也可供从事电子信息系统、信号处理研究与设计的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

信号检测与估计理论/赵树杰,赵建勋编著. —北京:清华大学出版社,2005.11

(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 7-302-11520-6

I. 信… II. ①赵…②赵… 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(2005)第 088310 号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编:100084
社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:陈国新

文稿编辑:魏艳春

印刷者:北京市清华园胶印厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:33.25 字数:834千字

版 次:2005年11月第1版 2005年11月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11520-6/TN·269

印 数:1~3000

定 价:46.00元

出版说明

信息与通信工程学科是信息科学与技术的重要组成部分。改革开放以来,我国在发展通信系统与信息系统方面取得了长足的进步,形成了巨大的产业与市场,如我国的电话网络规模已占世界首位,同时该领域的一些分支学科出现了为国际认可的技术创新,得到了迅猛的发展。为满足国家对高层次人才的迫切需求,当前国内大量高等学校设有信息与通信工程学科的院系或专业,培养大量的本科生与研究生。为适应学科知识不断更新的发展态势,他们迫切需要内容新颖又符合教改要求的教材和教学参考书。此外,大量的科研人员与工程技术人员也迫切需要学习、了解、掌握信息与通信工程学科领域的基础理论与较为系统的前沿专业知识。为了满足这些读者对高质量图书的渴求,清华大学出版社组织国内信息与通信工程国家级重点学科的教学与科研骨干以及本领域的一些知名学者、学术带头人编写了这套高等院校信息与通信工程系列教材。

该套教材以本科电子信息工程、通信工程专业的专业必修课程教材为主,同时包含一些反映学科发展前沿的本科选修课程教材和研究生教学用书。为了保证教材的出版质量,清华大学出版社不仅约请国内一流专家参与了丛书的选题规划,而且每本书在出版前都组织全国重点高校的骨干教师对作者的编写大纲和书稿进行了认真审核。

祝愿《高等院校信息与通信工程系列教材》为我国培养与造就信息与通信工程领域的高素质科技人才,推动信息科学的发展与进步做出贡献。

北京邮电大学

陈俊亮

2004年9月

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,随机信号统计处理的理论和技术也在向干扰环境更复杂、信号形式多样化、技术指标要求更高、应用范围越来越广的方向发展,并已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的检测理论与估计理论。所以,学习信号检测与估计理论,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,它的基本概念、基本理论和分析问题的基本方法也为解决实际应用,如信号处理系统设计等问题打下良好的基础。这是我们编写本书的目的。

本书是在作者为研究生和高年级本科生讲授“信号检测与估计理论”、“统计信号处理”课程所用教材的基础上,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。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、矩阵理论、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。在内容的安排上,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;还有的内容是从确知信号再到随机参量信号,从实信号再到复信号,或者是从线性问题再到非线性问题。我们认为,这样的数学推演和内容安排,便于读者阅读和理解。

本书第1章,重点论述了信号的随机性及统计处理方法;概述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,即随机变量、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,以及一般高斯信号和复信号的统计检测问题。第4章在研究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后,讨论了高斯白噪声中确知信号波形的检测、高斯有色噪声中确知信号波形的检测及高斯白噪声中随机参量信号波形的检测;还讨论了复信号波形的检测问题。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;对线性最小均方误差估计和线性最小二乘估计导出了它们的递推算法公式,并简要讨论了非线性最小二乘估计问题。第6章是信号波形的估计问题,重点讨论了连续、离散维纳滤波器的设计,均方误差的计算,离散卡尔曼滤波的信号模型,利用正交投影及其引理导出的离散卡尔曼滤波递推算法公式、含义、递推计算方法、特点和性质及其扩展;还简要讨论了非线性离散状态估计问题。第7章论述的

噪声、杂波环境中信号的恒虚警率检测,可看作是信号检测与参量估计相结合的具体应用;本章还简要讨论了信号的非参量检测和稳健性检测的基本理论和方法。

本书是为研究生的“信号检测与估计理论”课程编写的教材,但内容略有扩充,基本内容也适用于高年级本科生。作为46学时的研究生教材,建议讲授第1章、第2章(扼要)的全部内容,第3章~第6章的大部分主要内容,第7章的内容作为机动内容。作为46学时高年级本科生教材,建议讲授第1章~第6章的基本内容,而且,根据不同专业,可对检测理论、估计理论和滤波理论等内容有所侧重。作为工程技术人员的参考书,根据需要可选看有关部分内容。

本书在编写过程中,得到了西安电子科技大学研究生院和电子工程学院的大力支持。杨万海教授审阅了全稿,并提出了很宝贵的意见,作者对他表示衷心的感谢,并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,书中难免存在一些缺点或错误,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

2005年4月

目 录

第 1 章 信号检测与估计概论	1
1.1 引言	1
1.2 信号处理发展概况	1
1.3 信号的随机性及其统计处理方法	2
1.4 信号检测与估计理论概述	4
1.5 内容编排和建议	6
第 2 章 信号检测与估计理论的基础知识	8
2.1 引言	8
2.2 随机变量、随机矢量及其统计描述.....	8
2.2.1 随机变量的基本概念.....	8
2.2.2 随机变量的概率密度函数.....	9
2.2.3 随机变量的统计平均量	10
2.2.4 一些常用的随机变量	12
2.2.5 随机矢量及其统计描述	17
2.2.6 随机变量的函数	20
2.2.7 随机变量的特征函数	21
2.2.8 随机矢量的联合特征函数	27
2.2.9 χ 和 χ^2 统计量的统计特性	28
2.3 随机过程及其统计描述.....	30
2.3.1 随机过程的概念和定义	30
2.3.2 随机过程的统计描述	30
2.3.3 随机过程的统计平均量	32
2.3.4 随机过程的平稳性	33
2.3.5 随机过程的遍历性	35
2.3.6 随机过程的正交性、不相关性和统计独立性.....	36
2.3.7 平稳随机过程的功率谱密度	38
2.4 复随机过程及其统计描述.....	40
2.4.1 复随机过程的概率密度函数	40
2.4.2 复随机过程的二阶统计平均量	40
2.4.3 复随机过程的正交性、不相关性和统计独立性.....	41

2.4.4	复高斯随机过程	42
2.5	线性系统对随机过程的响应	44
2.5.1	响应的平稳性	44
2.5.2	响应的统计平均量	45
2.6	高斯噪声、白噪声和有色噪声	46
2.6.1	高斯噪声	46
2.6.2	白噪声和高斯白噪声	48
2.6.3	有色噪声	48
2.6.4	随机过程概率密度函数表示法的说明	49
2.7	信号和随机参量信号及其统计描述	49
2.7.1	信号的分类	49
2.7.2	随机参量信号的统计描述	50
2.7.3	窄带信号分析	51
2.8	窄带高斯噪声及其统计特性	52
2.8.1	窄带噪声的描述	52
2.8.2	窄带高斯噪声的统计特性	53
2.9	信号加窄带高斯噪声及其统计特性	54
2.9.1	信号加窄带噪声的描述	54
2.9.2	信号加窄带高斯噪声的统计特性	55
	习题	58
	附录 2A 高斯随机变量的特征函数	63
第 3 章	信号的统计检测理论	65
3.1	引言	65
3.2	统计检测理论的基本概念	65
3.2.1	统计检测理论的基本模型	65
3.2.2	统计检测的结果和判决概率	68
3.3	贝叶斯准则	70
3.3.1	平均代价的概念和贝叶斯准则	70
3.3.2	平均代价 C 的表示式	70
3.3.3	判决表示式	71
3.3.4	检测性能分析	73
3.4	派生贝叶斯准则	79
3.4.1	最小平均错误概率准则	79
3.4.2	最大后验概率准则	81
3.4.3	极小化极大准则	82
3.4.4	奈曼-皮尔逊准则	84
3.5	信号统计检测的性能	88

3.6	M 元信号的统计检测	93
3.6.1	M 元信号检测的贝叶斯准则	93
3.6.2	M 元信号检测的最小平均错误概率准则	95
3.7	参量信号的统计检测	98
3.7.1	参量信号统计检测的基本概念	98
3.7.2	参量信号统计检测的方法	98
3.7.3	广义似然比检验	99
3.7.4	贝叶斯方法	99
3.8	信号的序列检测	104
3.8.1	信号序列检测的基本概念	104
3.8.2	信号序列检测的平均观测次数	106
3.9	一般高斯信号的统计检测	109
3.9.1	一般高斯分布的联合概率密度函数	109
3.9.2	一般高斯二元信号的统计检测	110
3.10	复信号的统计检测	128
3.10.1	复确知二元信号的统计检测	128
3.10.2	复高斯二元随机信号的统计检测	135
	习题	139
	附录 3A 对称矩阵的正交化定理	146
第 4 章	信号波形的检测	149
4.1	引言	149
4.2	匹配滤波器理论	150
4.2.1	匹配滤波器的概念	150
4.2.2	匹配滤波器的设计	151
4.2.3	匹配滤波器的主要特性	154
4.3	随机过程的正交级数展开	157
4.3.1	完备的正交函数集及确知信号 $s(t)$ 的正交级数展开	158
4.3.2	随机过程的正交级数展开	158
4.3.3	随机过程的卡亨南-洛维展开	159
4.3.4	白噪声情况下正交函数集的任意性	160
4.3.5	参量信号时随机过程的正交级数展开	161
4.4	高斯白噪声中确知信号波形的检测	162
4.4.1	简单二元信号波形的检测	162
4.4.2	一般二元信号波形的检测	170
4.4.3	M 元信号波形的检测	184
4.5	高斯有色噪声中确知信号波形的检测	193
4.5.1	信号模型及其统计特性	193

4.5.2	信号检测的判决表示式	194
4.5.3	检测系统的结构	197
4.5.4	检测性能分析	198
4.5.5	最佳信号波形设计	200
4.6	高斯白噪声中随机参量信号波形的检测	203
4.6.1	随机相位信号波形的检测	204
4.6.2	随机振幅与随机相位信号波形的检测	219
4.6.3	随机频率信号波形的检测	226
4.6.4	随机到达时间信号波形的检测	228
4.6.5	随机频率与随机到达时间信号波形的检测	230
4.7	复信号波形的检测	231
4.7.1	复高斯白噪声中二元确知复信号波形的检测	231
4.7.2	复高斯白噪声中二元随机相位复信号波形的检测	234
4.7.3	复高斯白噪声中二元随机振幅与随机相位复信号波形的检测	239
	习题	242
附录 4A	随机相位信号检测概率的递推算法	252
附录 4B	复高斯白噪声的实部和虚部的功率谱密度	254
附录 4C	一般二元确知复信号波形检测判决式的推导	256
第 5 章	信号的统计估计理论	260
5.1	引言	260
5.1.1	信号处理中的估计问题	260
5.1.2	参量估计的数学模型和估计量的构造	261
5.1.3	估计量性能的评估	262
5.2	随机参量的贝叶斯估计	264
5.2.1	常用代价函数和贝叶斯估计的概念	264
5.2.2	贝叶斯估计量的构造	266
5.2.3	最佳估计的不变性	271
5.3	最大似然估计	272
5.3.1	最大似然估计原理	272
5.3.2	最大似然估计量的构造	273
5.3.3	最大似然估计的不变性	274
5.4	估计量的性质	275
5.4.1	估计量的主要性质	276
5.4.2	克拉美-罗不等式和克拉美-罗界	277
5.4.3	无偏有效估计量的均方误差与克拉美-罗不等式取等号成立条件式中的 $k(\theta)$ 或 k 的关系	284

5.4.4	非随机参量函数估计的克拉美-罗界	285
5.5	矢量估计	288
5.5.1	随机矢量的贝叶斯估计	288
5.5.2	非随机矢量的最大似然估计	289
5.5.3	矢量估计量的性质	290
5.5.4	非随机矢量函数估计的克拉美-罗界	295
5.6	一般高斯信号参量的统计估计	297
5.6.1	线性观测模型	297
5.6.2	高斯噪声中非随机矢量的最大似然估计	298
5.6.3	高斯随机矢量的贝叶斯估计	299
5.6.4	随机矢量的伪贝叶斯估计	306
5.6.5	随机矢量的经验伪贝叶斯估计	306
5.7	线性最小均方误差估计	307
5.7.1	线性最小均方误差估计准则	307
5.7.2	线性最小均方误差估计矢量的构造	308
5.7.3	线性最小均方误差估计矢量的性质	309
5.7.4	线性最小均方误差递推估计	312
5.7.5	单参量的线性最小均方误差估计	315
5.7.6	观测噪声不相关时单参量的线性最小均方误差估计	316
5.7.7	观测噪声相关时单参量的线性最小均方误差估计	319
5.7.8	随机矢量函数的线性最小均方误差估计	322
5.8	最小二乘估计	323
5.8.1	最小二乘估计方法	324
5.8.2	线性最小二乘估计	324
5.8.3	线性最小二乘加权估计	327
5.8.4	线性最小二乘递推估计	329
5.8.5	单参量的线性最小二乘估计	332
5.8.6	非线性最小二乘估计	332
5.9	信号波形中参量的估计	335
5.9.1	信号振幅的估计	336
5.9.2	信号相位的估计	337
5.9.3	信号频率的估计	339
5.9.4	信号到达时间的估计	343
5.9.5	信号频率和到达时间的同时估计	348
习题	350
附录 5A	最佳估计不变性的证明	361
附录 5B	非随机参量估计的克拉美-罗界的推导	364
附录 5C	例 5.4.4 中 $\hat{\alpha}_{ml}$ 的均值式推导	366

附录 5D	非随机矢量估计的克拉美-罗界的推导	367
附录 5E	随机矢量估计的克拉美-罗界的推导	371
附录 5F	一般高斯信号参量的统计估计中 $\hat{\theta}_{\text{map}} = \hat{\theta}_{\text{mse}}$ 的推导	373
附录 5G	线性最小均方误差估计中(5.7.9)式的推导	374
附录 5H	线性最小均方误差递推估计公式的推导	375
附录 5I	似然函数 $p(\bar{x}_1 \omega)$ 式的推导	377
第 6 章	信号波形的估计	380
6.1	引言	380
6.1.1	信号波形估计的基本概念	380
6.1.2	信号波形估计的准则和方法	381
6.2	连续过程的维纳滤波	383
6.2.1	最佳线性滤波	383
6.2.2	维纳-霍夫方程	384
6.2.3	维纳滤波器的非因果解	385
6.2.4	维纳滤波器的因果解	386
6.3	离散过程的维纳滤波	394
6.3.1	离散的维纳-霍夫方程	394
6.3.2	离散维纳滤波器的 z 域解	395
6.3.3	离散维纳滤波器的时域解	396
6.4	正交投影原理	400
6.4.1	正交投影的概念	400
6.4.2	正交投影的引理	401
6.5	离散卡尔曼滤波的信号模型——离散状态方程和观测方程	404
6.5.1	离散状态方程和观测方程	404
6.5.2	离散信号模型的统计特性	407
6.6	离散卡尔曼滤波	407
6.6.1	离散卡尔曼滤波的递推公式	408
6.6.2	离散卡尔曼滤波的递推算法	412
6.6.3	离散卡尔曼滤波的特点和性质	414
6.7	状态为标量时的离散卡尔曼滤波	423
6.7.1	状态为标量的离散状态方程和观测方程	424
6.7.2	状态为标量的离散卡尔曼滤波	424
6.7.3	有关参数的特点	424
6.8	离散卡尔曼滤波的扩展	425
6.8.1	白噪声情况下一般信号模型的滤波	425
6.8.2	扰动噪声与观测噪声相关情况下的滤波	427
6.8.3	扰动噪声是有色噪声情况下的滤波	428

6.8.4 观测噪声是有色噪声情况下的滤波	429
6.8.5 扰动噪声和观测噪声都是有色噪声情况下的滤波	430
6.9 卡尔曼滤波的发散现象	432
6.9.1 发散现象及原因	432
6.9.2 克服发散现象的措施和方法	434
6.10 非线性离散状态估计	435
6.10.1 随机非线性离散系统的数学描述	436
6.10.2 线性化离散卡尔曼滤波	436
6.10.3 推广的离散卡尔曼滤波	438
习题	441
附录 6A 正交投影引理 III 的证明	445
附录 6B 观测量相差法离散卡尔曼滤波递推公式的推导	448
附录 6C 扩维法与相差法相结合的离散卡尔曼滤波递推公式的推导	449
第 7 章 信号的恒虚警率检测	452
7.1 引言	452
7.2 信号的恒虚警率检测概论	452
7.2.1 信号恒虚警率检测的必要性	452
7.2.2 信号恒虚警率检测的性能	453
7.2.3 信号恒虚警率检测的分类	454
7.3 噪声环境中信号的自动门限检测	454
7.3.1 基本原理	454
7.3.2 实现技术	455
7.4 杂波环境中信号的恒虚警率检测	459
7.5 瑞利杂波的恒虚警率处理	461
7.5.1 瑞利杂波模型	461
7.5.2 瑞利杂波恒虚警率处理原理	461
7.5.3 单元平均恒虚警率处理	461
7.5.4 对数单元平均恒虚警率处理	463
7.6 非瑞利杂波的恒虚警率处理	470
7.6.1 对数-正态分布杂波模型	470
7.6.2 韦布尔分布杂波模型	471
7.6.3 对数-正态分布杂波的恒虚警率处理	473
7.6.4 韦布尔分布杂波的恒虚警率处理	474
7.7 信号的非参量检测	476
7.7.1 研究信号非参量检测的必要性	477
7.7.2 信号非参量检测的基本原理	477
7.7.3 非参量符号检测的结构和性能	478

7.7.4	秩值检验统计量的性能	480
7.7.5	非参量广义符号检测器的实现	483
7.7.6	马恩-怀特奈检验统计	485
7.8	信号的稳健性检测	485
7.8.1	稳健性检测的概念	485
7.8.2	混合模型的稳健性检测	486
7.8.3	污染的高斯噪声中确知信号的稳健性检测	493
7.8.4	稳健性信号检测的简要总结	498
7.9	三种类型信号统计检测的比较	498
	习题	499
附录 7A	单元平均恒虚警率处理的性能分析	503
附录 7B	非参量秩值检测的恒虚警率性能	506
附录 7C	非参量秩值检测的信号检测性能	507
附录 7D	(7.8.25)关系式的证明	509
参考文献		511

第 1 章 信号检测与估计概论

1.1 引言

信号检测与估计的概念、理论和方法是随机信号统计处理的理论基础。本章在扼要介绍统计信号处理发展概况的基础上,重点论述待处理信号的随机性及其统计处理方法的含义;统计信号处理的理论基础:信号的统计检测理论、估计理论和滤波理论的基本概念;本书的内容编排和几点建议。

1.2 信号处理发展概况

自 20 世纪 50 年代以来,信号处理的理论和应用有了很大的发展,主要表现在信号的检测理论、估计理论与滤波理论,多维(阵列)信号处理,自适应信号处理与自适应滤波理论等方面,并广泛应用于电子信息系统、自动化工程、模式识别、生物医学工程、航空航天工程、地球物理研究等技术领域。特别是近年来,随着现代通信系统、信息理论、微电子技术和计算机科学与技术等的飞速发展,统计信号处理的经典理论也在向现代信号处理理论演化,并取得了相当大的进展。表 1.1 是关于统计信号处理发展概况的简表,供读者参考。

表 1.1 统计信号处理发展概况简表

信号处理类别 比较项	统计信号处理基础	现代信号处理
时域背景特性	平稳随机过程、高斯分布	平稳、非平稳随机过程,高斯、非高斯分布
频域背景特性	均匀功率谱、高斯功率谱	均匀、非均匀功率谱,高斯、非高斯功率谱
信号特性	简单信号、编码信号	编码信号,扩频信号,线性、非线性调频信号
系统特性	线性时不变最小相位系统	线性时不变、时变系统,非线性时变、非最小相位系统
数学工具	随机过程、傅里叶变换	随机过程、傅里叶变换、高阶累积量、时频分析、小波变换
实现技术	采用现代模拟器件为主的模拟处理技术,采用 DSP 为核心器件的数字处理技术	

表 1.1 从统计信号处理的时域背景特性、频域背景特性、所采用的信号特性、产生和接收信号的系统特性、信号处理所用的数学工具和当前的实现技术六个方面来说明其发

展概况。这里应该说明,统计信号处理基础所研究的内容,是现代信号处理必备的理论基础知识,但二者的区分并没有严格的界限,而是在许多内容上互有交叉。例如,统计信号处理的基础理论——信号检测与估计理论中,有些内容也讨论了非平稳随机过程、有色噪声背景中信号的处理和非线性信号处理等问题;现代信号处理也需要研究一些基础方面的内容。所以,表 1.1 只是为了便于说明统计信号处理的发展概况,以及统计信号处理的基础与现代信号处理之间的主要差别而硬性加以区分的,而且所涉及的几个方面也不一定是全面的,具体内容则仅仅是有关领域中的一些主要内容。因此,表 1.1 仅为读者提供了有关统计信号处理发展概况的基本信息。

信号处理理论研究的日益进步和完善,以及信号处理技术应用领域的不断深入和扩展,使信号处理,特别是随机信号处理受到了人们十分广泛的重视。随机信号属于随机过程,所以应采用数学上的统计方法进行处理。因此,建立随机信号统计处理方法的基本概念,掌握扎实的统计信号处理的理论基础,具有用统计的方法研究分析随机信号处理问题的能力和解决工程技术问题的能力,是从事信号处理的科技工作者应有的素质。

1.3 信号的随机性及其统计处理方法

众所周知,在信息系统中,信息通常是以某种信号形式表示的;代表一种信息的信号在发射系统中产生后,一般要通过发射设备处理,再经信道进行传输;在接收系统中,对接收到的信号进行必要的处理,最终提供便于应用的接收信息。

图 1.1 是一个典型的无线通信系统的简化框图。我们知道,通信的目的是为了传递信息,信源就是信息源。我们把待传输的文字、资料、数据等统称为信息。为了能够实现远距离传输,须将信息进行变换、编码等信号处理,并调制成合适的无线电信号,借助于发射天线辐射到空间中,再以电磁波的方式传播到接收天线;接收系统将接收到的无线电信号经过放大、解调,然后对接收信号进行处理,提取出所需要的信息送给终端设备,从而完成了信息传输的任务。

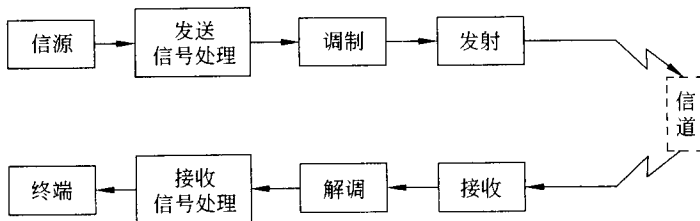


图 1.1 无线通信系统原理框图

在雷达等系统中,被观测目标的坐标、速度、航向、类型等是其所包含的信息。当目标被雷达发射的电磁波照射时,在目标的反射回波中就含有这些人们感兴趣的信息。对雷达接收目标的反射回波信号进行适当的处理,就能够提取出所需的目标信息。在自动控制系统中,通常包括两个信道,分别称为前向信道和反馈信道。从前向信道获得所需的原始信息,经过处理后得到控制信号,并由反馈信道传输这些控制信号,然后对系统的部件

或参数进行调整,从而构成闭环的自动控制系统。

从以上对几种信息系统的简要讨论中可以看出,一般来说,信息系统的主要工作是信号的产生、发射、传输、接收和处理,以实现信息传输的目的,这样的系统通常称为电子信息系统。对于电子信息系统,最主要的要求是高速率和高准确性。前者要求系统传输信息的效率尽可能高,即单位时间内传输尽可能多的信息,这主要决定于信号的波形设计和频率选择;后者则要求系统在传输信息的过程中,尽可能地少出差错,减小信号波形的失真度,这就是系统的抗干扰能力问题。在电子信息系统中,影响准确性的原因是多方面的,归纳为如下三个主要因素:信号本身的不理想性,信号在传输过程中发生畸变(失真),信号受到各种各样不可避免的外界干扰和内部干扰等。

1. 信号的随机性

根据电子信息系统的要求,我们所设计的信号与系统实际所形成的信号之间会有一定的误差,如信号频谱的纯度、相位噪声的大小、脉冲信号的宽度、顶部平坦度、前后沿时间及它们的稳定性、线性调频信号的线性度等方面的误差。相对于理想信号,这种误差可以看作是对信号的一种干扰分量。信号在信道传输过程中,会产生随机衰落,电磁波在经过大气层或电离层时,由于吸收系数或反射系数的随机性,必然会对信号的幅度、频率和相位等产生随机的影响,使信号发生畸变(失真)。大气层、电离层、宇宙空间等各种自然界的电磁过程,加上各种电气设备、无线电台、电视台、通信系统产生的电磁波,地面物体等固定杂波、气象等运动杂波和人为干扰等诸多因素,它们的频谱可能比较复杂,有的还可能较宽,这样,其中部分分量就有可能进入系统,形成对信号的外界干扰;电子信息系统本身的电源、各种电子元器件产生的热噪声、系统特性误差、正交双通道信号处理中正交变换时的幅度不一致性和相位不正交性、多通道之间的不平衡性、A/D 变换器的量化噪声、运算中的有限字长效应等,形成对信号的内部干扰。

电子信息系统中信号所受到的各种干扰均具有随机特性,以后我们一般将其统称为噪声,并用 $n(t)$ 表示,它是一随机过程。噪声 $n(t)$ 大致上可以分为两类:一类属于加性噪声,它们与信号混迭,对信号产生“污染”;另一类属于乘性噪声,它们对信号进行调制。因为在实际系统中,加性噪声是最常遇到的,也是一种最基本的干扰模型,所以我们在本书中将考虑加性噪声的情况。

在电子信息系统中,根据本书的内容要求,信号一般可分为两类:确知信号和随机参量信号。所谓确知信号,是指可以用一个确定的时间函数来表示的信号,我们用 $s(t)$ ($0 \leq t \leq T$) 表示;而随机参量信号虽然一般地也可以表示为时间的函数,但信号中含有一个或一个以上的参量是随机的,我们用 $s(t; \theta)$ ($0 \leq t \leq T$) 表示,其中 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M)^T$, 表示信号中含有 M 个随机参量。

这样,在考虑加性噪声 $n(t)$ 的情况下,我们要处理的信号 $x(t)$ ($0 \leq t \leq T$) 可以表示为

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

或

$$x(t) = s(t; \theta) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.3.2)$$

由于噪声 $n(t)$ 是具有随机特性的随机过程,所以即使信号是确知信号 $s(t)$ ($0 \leq t \leq$