

现代电子工程

第二册

《国防电子工程》编辑部 编

科学出版社

1981

内 容 简 介

《现代电子工程》是一套电子工程的中级科普读物，全面系统地介绍现代电子工程各个领域的基本知识，深入浅出，通俗易懂。本书为第二册，包括第十章至第十七章，即信息论；电波传播；天线；半导体分立器件与集成电路；红外技术；激光技术；频率标准与时间系统；低温、超导及其应用。

本书适于具有高中文化程度的电子工程爱好者、科技工作者、技术管理人员和大专院校师生阅读。

现 代 电 子 工 程

第 二 册

《国防电子工程》编辑部 编

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 1 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1981 年 1 月第一次印刷 印张：16 5/8

印数：0001—10,370 字数：381,000

统一书号：15031·322

本社书号：1984·15—7

定 价：1.70 元

目 录

第十章 信息论·····	梁传甲 (1)
§ 10-1 概述·····	1
§ 10-2 随机信号与噪声理论·····	2
一、随机信号·····	3
二、噪声理论·····	4
§ 10-3 最佳接收理论·····	9
§ 10-4 信息论基础·····	13
一、信息量·····	14
二、信道编码·····	16
三、信源编码·····	18
四、多端信道的信息论·····	22
五、信息论与保密通信·····	23
第十一章 电波传播·····	沙 踪 傅耀宗 (25)
§ 11-1 概述·····	25
§ 11-2 电波的一般特性·····	31
§ 11-3 对流层传播·····	37
一、对流层的折射指数·····	37
二、对流层折射效应及其修正·····	44
三、直视传播·····	48
四、对流层散射传播·····	53
五、山峰绕射传播·····	55
§ 11-4 电离层传播·····	58
一、电离层·····	58
二、电离大气中的传播·····	61
三、电离层的探测·····	66

四、电离层斜向传播	74
五、电离层斜向返回传播	80
§ 11-5 长波传播	83
一、概述	83
二、低电离层	85
三、低频传播	89
四、甚低频传播	91
五、极低频传播	97
六、哨声	99
七、雷电辐射和核电磁脉冲	100
八、地下和水下传播	102
§ 11-6 其他电波传播问题	105
一、导弹喷焰对电波传播的影响	106
二、核爆炸对电波传播的影响	109
三、噪声和干扰	111
§ 11-7 电波传播的研究特点与规律	114
第十二章 天线.....金元松 陈明英 (118)	
§ 12-1 概述	118
§ 12-2 天线的基本辐射单元	125
一、电基本偶极子和磁基本偶极子	125
二、天线上的电流	129
§ 12-3 接收天线	130
一、收发天线的互易性	131
二、接收天线的有效面积	132
三、干扰及天线噪声	133
§ 12-4 常用的线天线	134
一、振子类天线	134
二、长导线天线	142
§ 12-5 环境对天线的影响	146
一、大地对天线的影响	146

二、有耗媒质中的天线	151
§ 12-6 口面天线	152
一、喇叭天线	154
二、抛物面天线	156
§ 12-7 天线阵	160
§ 12-8 天线的发展趋向	165
一、天线小型化	165
二、电子计算机在天线中的应用	167
第十三章 半导体分立器件和集成电路	吴新仁 (169)
§ 13-1 概述	169
一、半导体技术发展简史	169
二、半导体基本知识	172
§ 13-2 半导体材料	177
一、半导体材料的类别	177
二、半导体器件对半导体材料性能的要求	180
§ 13-3 半导体分立器件	182
一、半导体二极管	182
二、晶体管	185
三、微波半导体器件	194
四、特种半导体器件	205
§ 13-4 半导体集成电路	211
一、半导体集成电路的分类	212
二、半导体集成电路的制造	214
三、数字集成电路	221
四、模拟集成电路	233
五、超大规模集成电路	237
第十四章 红外技术	袁健畴 (249)
§ 14-1 红外线的发现及其发展	249
一、什么叫红外线?	249
二、红外线的发展过程	249

§ 14-2 红外线的产生、频谱及其性质	252
一、红外线的产生	252
二、红外线波谱	253
三、红外线的性质	255
§ 14-3 红外线辐射源	255
一、热辐射源	256
二、气体放电源	256
三、混合型辐射源	257
§ 14-4 红外线的大气传输	258
一、大气成份	258
二、大气吸收	259
三、大气散射	260
§ 14-5 红外线探测器	261
一、热探测器	261
二、光探测器	264
三、三元系和掺杂型探测器的现状	267
四、红外电荷耦合器件	269
五、红外摄像管	270
§ 14-6 致冷	271
一、致冷原理	271
二、红外探测器用的致冷器	272
§ 14-7 红外线在军事技术中的应用	284
一、红外线通信	284
二、红外线制导与跟踪	288
三、红外对抗	299
四、红外线在空间技术中的应用	301
五、红外成像技术及其在军事上的应用	308
六、一般的红外线摄影	319
第十五章 激光技术	黄怀诚 (323)
§ 15-1 概述	323

一、激光的产生及特点	324
二、激光器的一般结构及其参数	331
§ 15-2 激光器	335
一、激光器的类型	335
二、各种激光器的结构、性能及其目前水平	336
§ 15-3 激光应用技术	351
一、激光通信	351
二、激光电视显示	362
三、激光测距与雷达	369
四、激光陀螺	380
五、激光侦察与监视	386
六、激光制导武器及其照明器	389
七、激光武器	394
八、激光可控热核聚变	399
§ 15-4 激光对抗	404
一、概述	404
二、激光对抗的某些方法	405
三、激光反干扰	408

第十六章 频率标准与时间系统.....睦法川等 (410)

§ 16-1 概述	410
§ 16-2 频率标准在科学研究和军事工程中的应用	412
一、频率标准在科学领域中的应用	413
二、频率标准在军事上的应用	418
§ 16-3 原子频率标准发展史	427
§ 16-4 时间频率标准装置的种类、工作原理及组成	430
一、石英钟的组成及基本工作原理	430
二、原子频率标准的种类及基本工作原理	432
三、激光频率标准的组成及基本工作原理	435
§ 16-5 常用的几种原子频率标准装置	439
一、铯束频率标准装置	439

二、光抽运铷气室频率标准装置	444
三、氢原子频率标准装置	446
§ 16-6 原子频率标准的发展趋势	448
第十七章 低温、超导及其应用	
.....施 锦 胥景芝 侯锡卿 张信远 赵 生 (456)	
§ 17-1 低温技术及其应用	456
一、概述	456
二、获得低温的方法	458
三、几种典型的致冷循环	461
四、低温的测量	474
五、低温技术的应用	477
§ 17-2 低温绝热	485
一、概述	485
二、低温绝热中的热传递	486
三、低温绝热方式	488
§ 17-3 约瑟夫逊效应及其在微波技术中的应用	492
一、概述	492
二、约瑟夫逊效应	493
三、约氏结的几种形式	499
四、约氏效应在微波技术中的应用	502
§ 17-4 微波量子放大器	508
一、概述	508
二、量子放大器的工作原理	510
三、量子放大器的结构	515
四、量子放大器的发展趋向	519

第十章 信 息 论

§ 10-1 概 述

信息论作为通信、雷达、导航、遥控、遥测及遥感等技术的共同理论基础,大约是在四十年代形成和发展起来的.第二次世界大战前后,通信等技术的发展已有几十年的历史.通信手段的多样化,各种调制制度及信号形式的出现,都迫切需要从其共性来认识信息传输的本质规律,建立一些更合理的标准或准则,以便比较现有各种制度的优劣和进一步寻找更好的方式.

我们知道,无论是通信中消息的传送,雷达中回波的接收,或者导航信号的收发等都有共同的本质和特点.它们都可以大体上概括成下面的模型(图 10-1):从消息源(电报中的符号或文字,电话中的话音,传真或电视中的图象,导航中的

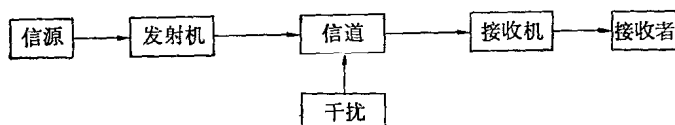


图 10-1 信息收发模型框图

定位信号等)来的信号,由发射机送出;发射机的作用在于将消息变换或调制成最适宜于信道或媒质传输的信号;变换或调制后的信号经信道或媒质到达接收点;信道或媒质可以是明线、电缆、光缆,短波、散射、微波信道等等;接收机将收到的

信号变成所需要的形式送给接收者。传输过程中会有各种干扰，我们不妨认为干扰是在信道中加入的。传输消息的上述过程表明，无论是通信、雷达、导航还是遥控、遥测或遥感等，从传输消息的角度来说，都是研究消息的产生、处理、传输及接收。信息论就是研究信息的产生、处理、传输及接收的一门科学。它对无线电电子学的发展起着重要的指导作用。

实际上，对于任何系统，甚至包括整个社会，信号的交换和传输都起着重要作用，信息论不但对通信、雷达等系统的信号传输有指导作用，它对其它系统的消息传输甚至生物学也有指导作用。总而言之，系统的构成有三大要素，这就是物质、能量和信息。国外有人将能源、材料和信息喻为现代化科学技术的三大支柱，并且认为随着电子技术的发展将会出现一次“信息革命”。直接以信息的产生、处理、传输及接收作为研究对象的信息论是信息科学的组成部分。现在，不但信息论本身处于蓬勃发展，并且它和计算机、控制论、仿生学、人工智能等互相影响，互相渗透，形成了一些新的学科。信息论的重要性愈来愈被人们所认识。

信息论虽以有效和可靠（抗干扰）作为其追求的主要目标。但由于其发展过程中研究对象的不同，侧重点的不同，而形成许多分支。本文主要就“随机信号与噪声理论”，“检测估值原理”和“信息论基础”等三方面作些介绍。

§ 10-2 随机信号与噪声理论

应用滤波器抑制干扰以提取信号是通信、雷达等初创时期与干扰作斗争的主要手段，且至今仍不失其意义。尽可能好地提取信号并抑制干扰，就成了这些系统的共同问题。最佳过滤正是从这一背景中逐渐发展起来的一个分支，该理论

解决的问题虽然还比较局限，但它是信息论工作的先驱。对信息论的发展起了良好的推动作用。随机信号与噪声理论正是围绕过滤问题逐渐展开的。

四十年代以来，通信理论的发展进入一个新的阶段。这一阶段的特点就是概率论、随机过程和数理统计的概念及方法广泛深入地进入通信理论的领域。四十年代前，分析信号传输时都是将信号看作是确定的函数，所用的数学工具不外乎是微积分、微分方程及傅氏分析等。但实际上无论什么时候传输的消息都是随机的，因为接收者事先不可能完全知道发来的是什么消息，否则通信就失去了其存在的意义。借助概率论、随机过程及数理统计的方法研究通信理论，给通信理论的发展以巨大的影响。

一、 随 机 信 号

客观事物的变化发展有必然的一面也有偶然的一面。掷一枚硬币可能出现正面也可能出现反面；一份电报、一篇文章或一张报纸中，各个汉字出现的百分比不一定相同；不同电报、不同文章或不同报纸中，各个汉字出现的百分比也常常不同。我们看书、读报、看电影、打电话等，消息的出现都是随机的，都是事先不可能完全知道的。但是，这些随机事件的发生并不是杂乱无章，毫无规律可言。只不过它们所遵循的是另一种客观规律罢了。这种规律我们常叫做统计规律。所谓统计规律指的是一个随机事件多次实验所表现出来的一种规律。这些规律对我们认识世界改造世界同样起着重要的作用。例如，我们大量统计电报文字可以发现： $0, 1, \dots, 9$ 各数字的出现有一定的规律。英文26个字母： $a, b, \dots, z$ 出现的相对比例也有一定的规律。为了能从数量上表征随机事件出现的机会，我们引入“概率”的概念。直观上它表示各个

随机事件多次实现时,出现的机会大小,或出现的百分数。例如英文 26 个字母出现的概率如表 10-1*所示。由表可见,字母 *e* 出现的机会最多,在每一百字母中, *e* 大约出现十次; *z* 字出现的机会最少,每一百字母仅出现约 0.05 次。

表 10-1 英文字母出现的概率

符号 概率	空	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
	0.186	0.064	0.013	0.022	0.032	0.103	0.021	0.015	0.048
符号 概率	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>o</i>	<i>p</i>	<i>q</i>
	0.058	0.001	0.005	0.032	0.020	0.057	0.063	0.015	0.001
符号 概率	<i>r</i>	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>w</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
	0.048	0.051	0.079	0.023	0.008	0.017	0.0015	0.016	0.0005

由于通信、雷达等系统中传输的信号及传输过程中的干扰本质上都是随机的。而概率论是研究随机事件的偶然性及必然性关系的一门科学。因此,应用概率论的方法研究传输问题才能最客观地反映事物的发展规律。事实也的确如此。自四十年代开始,通信理论中广泛引入概率论的方法后,为信息论的产生创造了良好的条件,使信息论得到长足的发展。现在,有关信息传输理论的许多方面,差不多都是建立在统计分析方法的基础上。“随机信号与噪声”理论就是应用概率论及随机过程等方法分析信号本身的统计特性及信号传输的规律。它既是研究一般信息论的一门基础学科,同时自身也有许多特殊的问题需要研究解决。

二、噪 声 理 论

前面已经提到,信号传输过程中不可避免地会有干扰。人们总希望接收时尽可能提取信号,抑制干扰。这叫做“过滤”

* 由于统计资料的不同,表中数据与实际情况会略有出入。

或“平滑”。干扰出现的时刻及强弱也都是随机的，我们所以能从信号中滤除干扰，主要就是利用信号和干扰间统计特性的不同。反映信号或干扰的统计特性有各种方法，有的完善，有的比较受局限。完善反映信号或干扰统计特性的是分布函数或概率密度。但用分布函数或概率密度来表征信号的统计特性，一般说来分析和实现都比较困难。如果我们只限于反映信号或干扰的某些平均特性，则分析和实现常会比较简单。现在常用的物理量有功率谱密度及相关函数。但这两个概念仅当过程从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 都存在，且统计特性和起始时刻无关，即研究所谓“平稳随机过程”时才比较有价值。

1. 功率谱密度

功率谱密度表示各个频率上单位频带内平均功率的大小。虽然它不能反映信号或干扰的相位频率特性，也不能反映不同频率上功率的统计分布特点，但功率谱密度的概念仍是相当有用的。它是确知信号分析中傅氏分析法在随机信号情况下的推广。由噪声中提取信号的方法其本质上和确知信号类似：我们让信号平均功率大而噪声功率小的频率分量多通过些，反之则少通过些。由此即可达到抑制干扰，提取信号的目的。

2. 相关函数

许多信号，如话音、文章、图象等等，它们的前后之间常有一定的联系。如出现“社会主”三个字之后，第四个字为“义”的可能性比其他字要大。反映信号间前后联系的最简单的物理量是相关函数，它定义为

$$R(t_1, t_2) = E[x(t_1)x^*(t_2)]$$

式中 E 表示对括号中的量作平均， $x^*(t_2)$ 是 $x(t_2)$ 的共轭复

数。若过程为平稳过程，即和起始时刻无关，则相关函数 $R(t_1, t_2)$ 仅和两个时刻的相对位置即差 $t_1 - t_2$ 有关。于是，对平稳过程而言，相关函数可记为

$$R(\tau) = E[x(t_1)x^*(t_1 - \tau)].$$

由于不同的信号常有不同的相关函数，而干扰的相关函数也常常不同，利用相关函数的不同由干扰中提取信号就是相关接收的基本原理。

相关处理在无线电通信、雷达信号检测、语言处理以及地震、勘探、医疗等很多方面都得到广泛应用。数字通信中的同步解调，雷达信号的累积接收等都是相关接收成功应用的例子。下面我们再介绍它在其它方面的一些应用。

相关处理在声纳噪声站中的应用也比较成功。我们将二个水声换能器安放在水中且相隔一定距离，只要间距足够大，则进入该两个水声换能器的背景噪声就可看作是不相关的。我们在二个水声换能器的输出处接上相关器就可通过测量舰船或潜艇的螺旋桨噪声相关函数来发现目标。这是因为螺旋桨噪声具有周期分量，且不同航速、不同舰艇的相关函数也不完全一样。通过分析所测得的相关函数，就有可能识别各种目标。即使水中存在许多非平稳干扰，在此场合，相关分析法提取信号仍有一定的成效。

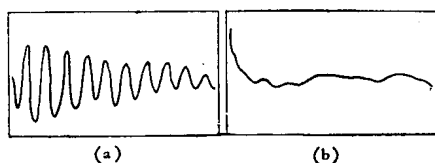


图 10-2 脑电波 α 节律图

相关处理用于脑电波分析同样可以得到有趣的结果。图 10-2 表示用相关分析处理脑电波 α 节律的情况。图 10-2(a)

表示当受试者闭目休息时 α 节律明显可测；图 10-2(b) 表示受试者眼睛张开时 α 节律不出现。 α 节律平滑说明受试者健康正常，否则健康就有一定问题。脑电波的分析还可以协助对脑肿瘤的诊断。

3. 维纳滤波

需要指出，对平稳过程而言，相关分析和功率谱法处理实际上是等价的。因为维纳-欣钦定理表明，平稳过程的相关函数及功率谱密度互成傅氏变换。实际上，平稳随机过程可以看作是电路中“稳态响应”概念的推广；而相关函数及功率谱密度的处理方法是信号分析中时域法和频域法在随机情况下的推广。这些推广不但解决了平稳过程的一些分析问题，而且为寻求“最佳”线性系统作了准备。

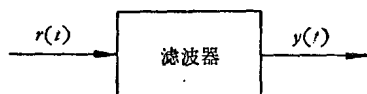


图 10-3 信号 $r(t)$ 经滤波器输出 $y(t)$

设输入信号 $r(t)$ 经过一滤波器输出为 $y(t)$ (图 10-3)。一般情况下 $y(t)$ 不可能和信号 $S(t)$ 完全一样，因为噪声通过滤波器后常常不能完全滤除。我们若令

$$\Sigma(t) = y(t) - S(t)$$

则 $\Sigma(t)$ 可以表示滤波后噪声的情况。衡量噪声大小较简单的一个物理量是噪声的平均比功率

$$E[\Sigma^2(t)] = E\{[y(t) - S(t)]^2\}$$

式中 E 也表示对括号中的量作平均。我们希望输出噪声的平均功率，即 $E[\Sigma^2(t)]$ 愈小愈好。由于上述表示式中 $y(t)$ 与系统的特性有关，不同的系统显然会有不同的噪声平均功率 $E[\Sigma^2(t)] = E\{[y(t) - S(t)]^2\}$ 。寻找一系统函数能使干扰

平均功率为最小的系统叫做维纳意义下或最小均方误差意义下的最佳线性系统。因为这一问题最早是由维纳引入和解决的,所以这样的系统有时也叫做维纳滤波。

维纳当时提出过滤问题时还包括预测或外推的情况,它要求下述物理量

$$E\{[y(t) - S(t + \tau)]^2\}$$

为最小,式中 $S(t + \tau)$ 是信号 $S(t)$ 提前 τ 时刻时的量。这对更好地估计射击运动目标时的提前量、气象和地震预报、卫星轨道测量等都有一定的作用。

维纳的平滑预测理论是应用概率论统计方法寻求最佳系统的先驱。他对以后通信、雷达、控制等的发展产生了广泛的影响。

4. 卡尔曼滤波

五十年代中期,由于电子计算机等发展的影响,贝尔曼在控制理论中重新强调“状态”概念的意义。同时由于空间技术发展的需要,至六十年代初由卡尔曼,布西,斯特拉托诺维奇(Стратонович)等发展了一套称为卡尔曼滤波的递推算法。卡尔曼滤波和维纳滤波不同,它不要求输入为平稳且也不需要无限过去的输入资料及相关函数,而只要有信号所由产生的动态随机微分方程或差分方程即可,且利用的也只是前一时刻的资料。由于卡尔曼滤波不像维纳滤波那样要用无限过去的输入资料,故存贮量要少得多,计算简单,且当过程为平稳时可得同样的结果。卡尔曼滤波还有新的理论问题,它们需要引进可控制性及可量测性论证最优滤波为稳定的条件,即初值误差、舍入误差及其它计算误差,在长时间内不发生影响的条件,这对理论的发展又是一个新的推动。

5. 匹配滤波

维纳过滤等比较适合信号形状未知, 希望输出信号和所要的输入信号尽可能一致的场合。但实际系统中, 一些传输信号的形状为已知, 且只要求输出信噪比在某一时刻为最大即可。保证某一时刻信噪比为最大的线性系统称为最大信噪比意义下的最佳线性系统。若输入噪声为白噪声, 即功率谱密度为常数时, 分析表明满足最大信噪比条件的最佳系统转移函数应与信号成共轭匹配: 它在信号频率分量大的地方让信号多通过些, 反之就少通过些; 此外, 我们还应当让系统在原信号相移大的频率分量处引起的相移小些, 反之则相移大些, 这样就可使某一时刻各频率分量的相对相移为零, 保证各频率分量为同相迭加, 最后使得该时刻的信噪比为最大。由于最大信噪比意义下的最佳系统函数与信号频谱成共轭匹配, 故它也叫做“匹配滤波器”。当输入噪声不是白噪声时, 理论上可以先接一滤波器, 使噪声通过它以后变成白噪声然后再接一匹配滤波器解决。匹配滤波器从时域的角度进行分析, 实际上就是相关装置。但实现时视具体情况不同, 二者各有利弊。

§ 10-3 最佳接收理论

最佳过滤主要着眼点是用一最佳滤波器来尽可能好地提取信号, 抑制干扰。但这样做总有一定的局限性。最佳接收理论从整个接收系统出发, 根据某种标准寻找最佳接收系统。

作为例子, 我们先看一下通常的电报信号。为了传输中文电报, 我们可以把每一个汉字用一些数字或拉丁字母(或拼