



现代电信理论与系统

[美] H. 斯塔克 F.B. 屠特尔 著

郭庆勋 等译

上

人民教育出版社

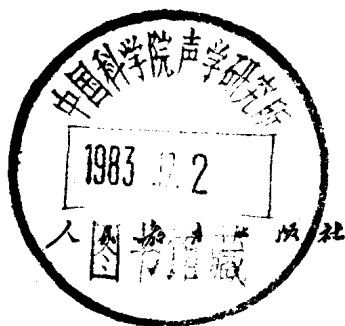
73.412
659

D667/11

现代电信理论与系统

上 册

〔美〕H. 斯塔克 F. B. 屠特尔 著
郭庆勋 等译



4012717

本书是美国七十年代无线电类研究生和大学生用的无线电系统方面的教科书。它紧凑地概括了傅里叶分析、线性系统理论与概率论等基本理论与通信、电视、雷达、图象处理等领域的基本课题。

全书共十三章,中译本分为上、下两册出版。上册包括导言、傅里叶方法、线性电路和滤波器、取样和脉冲调制、离散系统理论、幅度调制系统和电视、角度调制;下册包括概率初步、随机变量、随机过程、信号处理、雷达和声纳、图象处理系统和二维变换。书中着重基本概念和数学分析。系统用方框图、波形图和频谱图等说明,不涉及具体电路和设备。分析精炼概括,对于已成熟的系统的性能作了分析归纳,还介绍了VCO、锁相、有源滤波器及数字技术、信号处理、图象处理和二维变换等新兴技术。全书配备大量习题,作者把一些公式的推导留给读者作为练习,使全书内容虽然领域宽广但却很精炼。

本书可供无线电类研究生作一个学期或大学本科生作一学年选用的教材,也可供科技人员作为了解现代无线电通信系统方面的参考书。

MODERN ELECTRICAL COMMUNICATIONS

Theory and Systems

Henry Stark/Franz B. Tuteur

Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1979.

责任编辑 李永和

现代电信理论与系统

上 册

[美] H. 斯塔克 F.B. 屠特尔 著

郭庆勋 等译

*

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民邮电出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 字数 330,000

1982年5月第1版 1983年6月第1次印刷

印数 00,001—8,500

书号 15012·0409 定价 1.80 元

译者的话

在传统的通信技术成熟的基础上,广泛地使用了新器件、新技术和新原理而形成了今日的现代通信。在现代通信中遂出现了一系列的新领域,诸如信号的最佳检测、数字通信、信号和图象的处理、统计通信理论以及计算机在通信中的运用等。从事无线电通信的工程技术人员或大学的无线电通信的教学人员迫切希望能有概括阐述现代无线电通信系统以及关于这些系统的基础理论的参考书或教材。H. 斯塔克和 F. B. 屠特尔的《现代电信理论及系统》正是适应这种要求而涌现出来的这些著作中比较新颖和比较优秀的一本。全书共十三章,其主要特点是以并不庞大的篇幅既概括了傅里叶分析、线性系统理论与概率统计原理等基本理论及分析方法,又概括了通信、雷达、电视、声纳等领域的基本课题,也介绍了近年来新兴的信号处理、图象处理和二维变换。在介绍基础理论中着重基本概念和数学分析;在介绍各种系统时则着重于方框图、波形图和频谱图,而不涉及到具体的电路和设备;对于一些推导过程和结论,则注意利用习题让读者自行推导。

原书是作者总结了在耶鲁大学为研究生和高年级大学生讲授多年的经验而编成的教材,出版于1979年。这本书内容新颖,理论与实践结合得相当好,广泛而精辟地介绍了现代无线电系统的基本理论和各个实践领域。

我们认为本书对于我国无线电通信专业的技术人员或高校的学生都是很有益处的,是有助于当前四化建设的需要的,为此我们翻译了这本书。

本书可供国内无线电系研究生及本科学生用作无线电系统课程的教材,亦可作为有关科技人员的参考书。

参加本书翻译的有林万晖(第一、二章,序及附录)、刘逢强(第三、四章)、李伟钊(第五、十一、十三章)、邵美辰(第六章)、郭庆勋(第七、十二章)、邓鲁阳(第八、九、十章)等同志。全书由郭庆勋同志负责统一校订定稿。邓鲁阳同志曾协助校阅了部分译稿。人民教育出版社李永和同志亦对本书部分译稿作了校阅,特此致谢。

原著中一些错漏之处,我们已尽可能予以订正。由于我们水平有限,错误之处在所难免,敬希广大读者指正。

译 者

1982.3.

原 序

本书是根据两门课程的讲稿编写成的：一门是为高年级大学生开设的两学期的电信系统课程，另一门是为研究生开设的一学期的统计通信和信号处理课程。在耶鲁大学讲授大学的通信课程的近五年中，我们的共同经验是：由于新学科和学生们的兴趣同时剧增，不能指望学生们凭着传统的课程知识就能去解决那些相当成熟的专业性很强的通信工程课题。为此，我们不得不开设一门比较完整和独立的课程。

我们必须去讲述诸如傅里叶方法及线性系统理论等的基本课题。但我们也感觉到，以尽可能的深度向学生们讲授有关统计通信理论、信号处理、电视、雷达及声纳等之类的高级课题，是理所当然的。我们也感到，尽管一定要彻底地讲清理论，但起码也必须指明理论在几种近代实际装备上的具体应用。总之，我们试图使我们的课程能够广泛而系统地研究电信工程整个领域。

我们相信，我们对自己所教的学生的经验决非只适用于我们的学生。近几十年来，电工领域已经有了巨大变化，有这么多课题需要现在的学生懂得，而那些向来是传统的电工课程，有许多部分已不复存在。甚至，那些设有较多传统的电工课程的学校，扩大了选课范围，并让学生有更大的自由以超越各种课程间的界限。由于电工这一传统课程体系十分松散，我们认为应有一本用几章先概述基本通信理论基础、然后再论述更高深课题的教科书，以满足普遍的要求。这就是我们为什么要编写这本书的理由。

我们在给一年级的研究生讲课时发现，如果说学生们在预习情况、成熟程度及兴趣上存在着差别的话，则研究生更甚于大学

生。某些来自象计算科学或物理学等有关领域的研究生，甚至不曾主修电工课；其他来自那些相对地缺乏系统课程设置的大学的学生，则往往缺乏理解电工基础概念的能力。在许多情况下，学生在线性系统、随机过程及基本通信系统等方面基础知识准备不足。我们在给基础不同的学生授课时发现最好有这么一本书，它不仅讨论信号处理和统计通信理论的主题思想，而且包括必要的基础教材，使学生们在自学时间内能“赶上去”。

根据我们对课程的经验，我们力图把对读者的必要知识的要求降到最低限度。基本上，我们仅要求具有大专院校水平的微积分和运用拉普拉斯变换的线性系统理论初步等基础。除此之外，我们试图把我们的解说和推导尽可能地完善和自成系统。数学论证极为有用，从而我们还把读者不能以课本提供的资料来推出的一些结论、曲线和表格也都放到数学论证中去了。在某些章节中，我们已经应用了复变量理论的基本概念，但是对不熟悉这方面理论的读者来说，在连贯性或实质性上无疑是有小小的损失的。

正如所期望的那样，本书所包括的材料要比大学的课程还要多。比如在介绍关于傅里叶方法的一章中，我们的教材收进了收敛、信号向量表示以及诸如内积和射影等的概念。我们这样作的理由，一方面是为了完整性，另一方面是这些概念在以后几章中都需要用到。本书还概述了线性系统和有源滤波器，这些知识远远超出我们应在本课程中讨论的范围。我们还感到，今天很多信号处理都已是数字化了，若我们对数字系统和滤波器不给予一定深度的讨论，那将是一个错误。因此，我们增加了数字滤波器一章，它包括离散傅里叶变换(DFT)及快速傅里叶变换(FFT)。数字方法也收集在其它几章里，而把信号处理突出自成一章。

若把本书用于大学课程，作为基础部分的前半部(即第一章至第七章)能够构成一学期的课程(一学期十六周)，按正常课时每周

上三节课。与看来盛行的做法相反, 我们已经把概率论统计概念从调制、滤波及检波实践中独立出来。尽管这意味着, 基于信噪比分析的各种调制方案的比较要放到本书下半部, 但我们发觉这样做, 对于在一个学期内全部结束调幅、调频及脉冲调制实为有利。

若在一个学期内学完第一至第七章显得负担太重的话, 则可以省去第二章的较深部分、第三章关于有源滤波器及频率变换的大部分、第五章(关于数字系统)以及第七章论述调频波干扰一节等篇幅, 也不至严重地失去连贯性。

第八章至第十三章自然地构成了课程顺序的后半部。与开始部分相比, 这部分要求学生具备更高深的数学基础, 若缺乏这些基础, 就难以掌握它的内容。若要删去这几章的某些篇幅, 我们建议这样做: 对于没有学过概率论预备课程的学生, 仔细地学习第八、九及第十章, 接着学第十一章的一部分及第十二章或第十三章。对于概率论方面已有了基础的学生, 我们建议删去第八章及第九章, 直接进入第十章, 接着进入第十一、十二及第十三章。

本书可给那些已具有傅里叶方法、线性系统及一些概率论基础的学生作为一个学期的大学课程使用。这一门课将第一、四、六、七章的全章以及第五、十和十一章的一部分作为基本内容。

本书也可作研究生一年级的一个学期的基础课程, 这时本课程要求学生已经掌握了傅里叶理论、线性系统及概率论的基础知识。因此, 本课程将以仔细学习第十、十一、十二章和有关编码及信息论的补充材料为基本内容。第十三章则要视学生对两维系统及图象处理的兴趣而选读。

.....

H. 斯塔克/F B. 屠特尔

目 录

第一章 导言	1
1.1 定义	1
1.2 通信理论的问题	1
1.3 一般通信系统	2
1.4 调制	7
1.5 历史的回顾	10
1.6 本书介绍	17
参考文献	18
第二章 傅里叶方法	19
2.1 引言	19
2.2 叠加原理	19
2.3 线性系统的响应	22
2.4 周期性信号	23
2.5 收敛	33
2.6 正交函数展开式	39
※2.7 信号的矢量表示	45
2.8 傅里叶积分	54
2.9 傅里叶变换的基本特性	58
2.10 一些常用的傅里叶变换对	66
2.11 狄拉克 δ 函数	71
2.12 δ 函数的应用	75
2.13 具有单边频谱的时间函数	83
2.14 小结	90
习题	90
参考文献	98
第三章 线性电路和滤波器	100
3.1 引言	100
3.2 应用叠加原理由输入求输出	100

3.3	线性时不变系统的微分方程	105
3.4	传输函数	108
3.5	输入-输出	120
3.6	理想线性滤波器	127
3.7	因果滤波器	131
3.8	可实现的低通滤波器	133
3.9	有源滤波器	138
3.10	频率变换	146
3.11	小结	153
	习题	153
	参考文献	161
第四章	取样和脉冲调制	163
4.1	引言	163
4.2	频率有限的意义	165
4.3	取样的实际问题	175
4.4	时分多路选择	181
4.5	脉宽调制和脉位调制	189
4.6	脉码调制	194
4.7	小结	214
	习题	214
	参考文献	221
第五章	离散系统理论	224
5.1	引言	224
5.2	离散线性系统	224
5.3	离散傅里叶变换	231
5.4	离散傅里叶变换的特性	235
5.5	在使用离散傅里叶变换时易犯的错误	237
5.6	快速傅里叶变换	245
5.7	z 变换	249
5.8	z 反变换	254
5.9	z 变换与离散傅里叶变换的关系	258
5.10	数字滤波器	260

5.11 非递归(FIR)滤波器	267
5.12 快速卷积	274
5.13 小结	276
习题	276
参考文献	279
第六章 调幅系统与电视	282
6.1 引言	282
6.2 调幅	284
6.3 调幅器	287
6.4 调幅波的检波	298
6.5 超外差接收机	304
※6.6 频谱分析中的超外差原理	307
6.7 双边带(DSB)	310
6.8 单边带(SSB)	314
6.9 残留边带(VSB)	320
※6.10 锁相环路(PLL)	324
6.11 压控振荡器(VCO)	328
6.12 电视(TV)	330
6.13 电视系统的带宽研究	339
6.14 电视信号的频谱结构	341
6.15 彩色电视	342
6.16 频分多路选择(FDM)	357
6.17 小结	362
习题	362
参考文献	372
第七章 角度调制	374
7.1 引言	374
7.2 定义	375
7.3 角度调制波分解成正弦波	378
7.4 窄带角度调制	386
7.5 调频波的带宽研究	389
7.6 间接调频法: 阿姆斯特朗法	397

7.7 直接调频法·····	400
7.8 调频信号通过线性网络·····	404
7.9 调频信号的解调·····	408
※7.10 调频波的干扰·····	421
7.11 预加重滤波和去加重滤波(PDF)·····	424
7.12 调频接收机·····	427
7.13 小结·····	429
习题·····	430
参考文献·····	434

第一章 导 言

1.1 定义

“Communication”^①这个词正象英语一个幽默的惯用词“pressing a suit”对一位律师(意味着“办一件案件”)和对一位裁缝(意味着“熨一套衣服”)来说具有不同含义一样^[1-1],它也有着多方面的含义。从韦氏新大学辞典(Webster's New Collegiate Dictionary)中我们可摘录到以下几条解释:“……在个体之间藉助于共用系统以符号来进行信息交换的过程……”、“……一种有效地传达思想的技术……”(作为人们对“演讲”的一种改进过程)、最后“……一个调动军队、给养和车辆的指令系统……”。

我们看来,第一条解释显然最切合本书的内容^②。“电信”一词中之所以要冠以“电”字,意味着本书重点不在于研究原始符号如文字、语音等,而在于研究由这原始符号变换而成的电信号的发送和接收。电通信并不全都是关于人与人之间的通信,在现代,计算机之间也进行通信。

1.2 通信理论的问题

在克劳德·香农(Claude Shannon)和华伦·魏瓦(Warren Weaver)的经典著作^[1-2]中把通信理论的问题分为如下甲、乙、丙三类:

① 本书英文书名中“Communication”一词在英语中是个多义词,作者其后叙述的意思是:在本书中这词所取的意思与中文“通信”一词相当。——译注

② 所以本书也把“Communication”译作“通信”。——译注

甲类: 能以怎么样的精确程度来传送用以传递信息的符号?

乙类: 怎样使所传送的符号精确表达预定的内容?

丙类: 怎样使所接收到的信息按预定的方式有效地去影响接收端的行动?

甲类问题基本上是个技术上的问题,它主要和电气工程师、通信工程师们有关。乙类问题本质上是语义学上的问题,它关系到收端如何正确理解符号的含义,这部分主要是牵涉到语言学家和其它跟语言的结构及理论工作有关的专家们了。最终效果(丙类)的问题,也许是更难叙述清楚,因为这里面包含美学和心理学方面的因素。但接踵而来的一个问题是:在这三类问题当中,甲类问题是否属于最肤浅的一类?香农和魏瓦认为决非如此。确实,由于乙类和丙类是涉及通信的哲理基础和行为两方面,而甲类问题(从表面上看来)解决得差不多了,因而人们往往误认为乙类和丙类比甲类更深奥一些,但香农和魏瓦强调:在甲类问题上所显现的任何制约性都必然对乙类和丙类发生影响。况且,通信的数学理论揭示了甲类对其余两类的影晌是更具有根本性的。这方面已大大出乎人们的意料。

我们不打算纠缠这些观点。不过,香农和魏瓦曾不得不暗示:对电信作工艺学方面的探讨要胜过对它的经济性、有效性和精确性(在现实生活中这些都是重要的问题)的工程研究。的确,通信工艺学的基本成果对整个通信领域的各方面都具有深远的影响。文献[1-2]详述了这些启发性的观点,我们鼓励读者去阅读这本具有划时代意义的著作。

1.3 一般通信系统

图 1.3-1 是电信系统的示意图。事实上,它是一个比电信系统更广泛的通信系统。例如,用它来模拟一个“送话者-受话者”系

统,则信源就是送话者的大脑,“消息”就是他所要表达的思想。发射机就是送话者的发音系统,它把消息编码使之适于用空间来传播。载波信号^①就是声压的变化,信道就是空间。接收机就是受话者的耳朵,它与神经相连,终端就是受话者的大脑。但是,若用图 1.3-1 来模拟一个电信系统时,则“消息” $s(t)$ 在此表示一个电

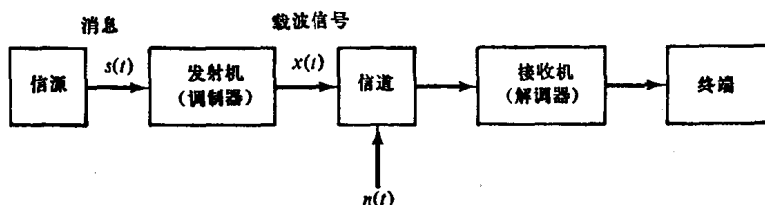


图 1.3-1 通信系统方框图

信号,而假定原始的消息如语音、文字、图象……等已事先变换为电信号 $s(t)$ 。我们认为在电信设备方面,要将原始消息变换为电信号是不成问题的。方框图中的 $s(t)$,除了代表消息外,有时也代表情报、基带信号、音频信号、包络、信息^②等等。例如, $s(t)$ 可以是从小音器输出的信号、拾音器输出的感应电压、磁带录音机磁头的感应电流、计算机的二进制电压、电视摄像机输出的视频电流以及光电二极管的输出光电流等等,不胜枚举。

通常未经处理的消息是不适宜于通过信道传输的。因为 $s(t)$ 通常是一低频波形,这意味着其波长很长。为了有效地辐射,必须满足电磁辐射的基本定律要求,辐射元——天线的尺寸应取信号波长的某一分数,以提高辐射效率,一个 1000 Hz^③ 的信号在大气中的波长为 $3 \times 10^5 \text{m}$,按四分之一波长计算,天线就有 75km 长!

① 此处载波信号(Carrier signal)实际上是已调波。——译注

② 在后面章节中将看到,这些词义所具有的专门技术含义,只能按上下文来确定。

③ 周/每秒=1 赫兹,缩写为赫(Hz),此单位以伟大的实验家海涅·赫兹(Heinrich Hertz 1857—1894)命名,他验证了麦克斯韦理论。

对普通广播来说, 太不实用了^①。相反, 1MHz^②信号的波长为300m, 它的四分之一波长天线只有75m长。

此外, 当传输低频信号成分时, 若介质与信号之间不匹配, 同样会产生其它问题。在雷达和微波通信中, 常常需要产生窄波束, 使接收机有足够大的功率密度以抑制电噪声。然而, 电波遇到绕射就会引起波束展宽。绕射角与 λ/D 成正比, λ 为波长, D 为辐射元的直径。从而得出, 展宽的程度与频率成反比, 所以这就会导致波束强度在低频时下降太快而不满足通信要求。

还有几个重要理由, 使得 $s(t)$ 在传输之前必须加以处理。在这里仅提及一点。普通的商用无线电广播——也许是我们最熟悉的电信系统, 其大多数节目是由语音或音乐组成, 信号所覆盖的频段约从几十Hz~15kHz。若不能将信号分离, 我们怎能在一个地点选听一个以上的节目呢? 将不同的信息 $\{s(t)\}$ 调制到不同的载波上, 就避免了他们之间的重叠和干扰, 让听众们从中选择丰富多采的节目。对电视和电话也不例外。在电话中, 要求以同一通信线路, 在两个指定点之间传送大量的信息。为了防止干扰, 信号是多路选择的。所谓频分多路选择是将各个信息调制到不同的载波上, 并规定了它们在频带上不相重叠的界限, 从而把不同的信息分离开来。事实上, 电话公司的某些线路上就是同时传送着上百个甚至上千个信号的。

今后我们把为传送 $s(t)$ 而对它作的预先处理简称为调制。这个术语的确切含义将在第六章叙述。本书有相当大部分(第四、五、六、七章, 以及第十一章的一部分)专门讨论调制, 并讨论它对信号的影响和抗噪声性能。下一节我们将简单介绍某些常见的调制

① 虽然在军事上可用很大的天线作为低频的通信。

② 1兆赫=1 MHz=10⁶Hz; 1千兆赫=10⁹ Hz, 缩写为1 GHz; 1千赫=10³Hz, 缩写为1 kHz。

方案。

现在要回到图 1.3-1, 我们把发射机与接收机间的介质叫做信道。在大多数电信系统中, 其信道都是远距离的。这就意味着, 信号在传输中要受到衰减, 同时更可能被随机噪声和干扰所掩盖。外层空间探测的信道最长。在火星/海盗(Mars/Viking)号卫星的飞行中, 空间信道长达 225 百万英里, 信号约需 18 分钟才到达地面。在可能范围内, 加入若干中继站以便将整个长信道截成几个较便于控制的段落。在微波系统中, 每 25 ~ 30 英里设一中继站, 使微波波束再次放大。中继站广泛用于远距离通信。在海盗号卫星系统中就用了名为轨道飞行器的中继站。

如前所述, 载波频率必须与信道介质相匹配。同样, 对于固定载波来说, 信道介质必须与该载波匹配。普通铜线适合于传输低频信号; 但对微波信号则有过分大的衰减和辐射损耗。当波长小于 1000m 时, 用平行传输线较好, 但在高频端它的屏蔽和辐射损耗却成了严重的问题。这时还是同轴电缆较好, 因为电场实际上完全屏蔽和限制在它的内外导体之间。对于波长短于 1m 的信号来说, 用金属的波导管传送电磁波较佳。在波长为 $\mu\text{m}(10^{-6}\text{m})$ 的光波频段内, 采用光纤介质波导来传输能量。在参考文献^[1-3] p. 615 中提供了各种导线、电缆及波导损耗的比较。参考文献^[1-4] p. 10 中提供了一个按频率而择优选用传输介质的表。研究电能传送规律的物理基础, 在很多地方都可找到, 例如文献^[1-5]就是。

再回顾图 1.3-1, 我们曾硬性规定了所有的噪声都是由于信道引起的, 实际上接收机和发射机也引入了噪声。噪声一词在这里含义很广泛, 包括由其它电台产生的干扰、系统本身的非线性效应、信号衰落造成的效应、多径传播效应以及其它的问题; 最后还包括随机的“自然噪声”。后者反映出两个事实: 其一, 我们生活在一个温暖的宇宙当中(热噪声); 其二, 电磁辐射象电子一样量子