

现代数字与模拟通信系统

Modern Digital and Analog Communication Systems

【美】B·P·拉西编著 雷震洲 译



现代数字与模拟通信系统

【美】 B.P. 西 编著

雷震洲 译

人民邮电出版社

0033/18
Modern Digital and Analog
Communication Systems

B.P.LATHI

Holt, Rinehart and Winston, 1983

内 容 提 要

本书用与传统方法完全不同的结构方法,论述了通信系统两个方面的主要问题:通信系统是怎样工作的,在噪声存在情况下通信系统的性能如何。第1-4章使读者对通信系统有基本的了解,产生浓厚兴趣。在此基础上,第5章讲述概率论知识,第6章进而比较各种通信系统。第7章是最佳信号检测,第8章引入信息论,第9章论述纠错码。全书以数字系统为主,书中多实例,多习题,内容丰富,讲解细致。

读者对象:通信院校教师、本科生或研究生,从事通信工作的科研和工程技术人员。

现代数字与模拟通信系统

[美]B·P·拉西 编著

雷震洲 译

责任编辑 邵明达 郑文进

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32

印张: 27 页数: 432

字数: 719千字

1983年2月 第一版

1988年2月 河北第一次印刷

印数: 1-2 200册

ISBN7115—03404-4/TN

定价: 6.00元

译者序

在迎接信息时代到来的今天，通信的地位变得日益重要，它赋予人类的经济效益和社会效益越来越明显。在发展国民经济中，它与能源、交通、材料一同起着支柱的作用。

本书所阐述的通信系统就是完成信息传递这一重要环节的工具，凡是从事通信工作的科技人员和通信院校学生都有必要从理论和技术上掌握这一工具，即需要知道通信系统是怎样工作的，在复杂的噪声环境中又是如何完成其使命的。尤其在目前，通信系统正大踏步地由模拟系统走向数字系统，不论是电缆系统、微波系统、卫星系统，还是光纤系统，无一不向数字系统发展。因此，我们必须加紧掌握有关数字通信的新的理论、分析方法和应用技术。例如，模/数变换、数字信号分析与处理、数字调制技术、数字信号检测、差错控制编码以及数字通信系统的性能分析等都是数字通信中特有的问题。任何数字通信系统都离不开这些基本知识。

论述通信系统的著作有不少，各有各的特点。但本书的特色确如作者自己所说，全书是用诱导的手法写成。作者根据自己多年的教学经验以及对学心理的充分了解，不是采取先讲理论，后讲技术和系统的常规写法，而是先用通信系统概貌来引起读者兴趣，然后再逐步深入展开，使读者不断发生兴趣，有进一步往下学的欲望。作者尽量把比较枯燥难学的通信理论，如概率论、随机过程、信息论、编码理论等都放在靠后的位置，使读者不致一开始就陷于迷惑困窘的境地。尤其是配合抽象的理论，作者还列举了大量实例，避免了纯理论的乏味之感。

本书虽然名曰《现代数字与模拟通信系统》，但重点放在数字系统，是符合时代潮流的，同时又不失为一本经典著作。国外不少

大学把它选为本科学生或研究生教材，或作为重点参考书之一。

鉴于上述原因，译者萌动了翻译本书，把它奉献给我国广大读者之念。在人民邮电出版社的大力支持下，终于实现了我的愿望，在此深表感谢。但是由于本人学识水平有限，错误不妥之处难免，望读者批评指正。

雷震洲

1986年4月

序 言

通信系统的学习可以分为两大方面：

1. 通信系统是如何工作的。
2. 在存在噪声的情况下通信系统又是如何工作的。

这两方面的学习分别需要一些特殊的工具。要学习第一方面，学生必须熟知信号分析理论（傅里叶技术）；要学习第二方面，则需基本掌握概率论。

为了对各种不同的通信系统作出有意义的比较，必须对第二方面有所了解。因此，大多数教师认为如果不把这两大方面都包括进去，通信系统的学习将是不完整的。正如我的一位同事所说：“如果不讲存在噪声情况下通信系统的状态，我简直难以想象如何讲授通信系统。”我们大多数人都会同意这一说法。然而，这使我们面临一个严重问题：要包括的材料太庞杂了，这两大方面，连同学习它们所必需的工具都十分重要，但是在一门课程中很难以一定的深度包括这么多内容。

如何讲授通信系统，目前流行的作法是，在开头几章先学习必要的工具，接着再学习通信系统的两大方面。由于开始时学习这些工具要花费很多时间（而学习动力并不太大），所以留给学习通信系统两大方面的时间就少了。因此很难讲好通信系统这门课。通信理论的第二方面（统计学方面）要比第一方面难，学生只有将第一方面融会贯通之后，才能较好地理解第二方面。由于我们试图同时包括这两个方面，因此，学生一方面不得不设法学好统计学，另一方面又要掌握通信系统是如何工作的。从教学法来看，这种作法是没有根据的，因为它违背了一个基本事实，这就是一人要会跑就得先学会走。理想的解决方法是顺次开两门课程。前一课程是关于通信系统如何工作的，后一课程则涉及统计学方面和噪声问题。但

是在目前的课程表中，有那么多的重要课程，以至很难在通信系统方面插入两门基础课。

但是，摆脱这一困难的办法还是有的。仔细考查表明，为了研究存在噪声情况下通信系统的相应性能，实际上不必深入到概率论中去（至少在初始课程中）。在模拟通信系统中，噪声可以作为干扰来处理，⁷⁾利用瑞利模型把噪声表示为许多正弦波之和，然后根据这些正弦干扰波就可求出噪声输出。这种模型对噪声采用了频域描述（功率谱密度）法，因此我们可以推导出噪声输出功率与信噪比，不用对噪声进行统计描述即可讨论各种系统的相对性能。这一方法的另一好处是，在这里，一个信号的功率是时间平均值而不是系综（ensemble）平均值。时间平均值简单明了，在一门初开的课程中学生是比较容易接受的。系综平均值的概念对初学者来说相当费解。要理解它需要相当的水平。对刚开始学习通信系统课程的普通大学生来讲，期望他们达到这一水平是不合情理的。另外，在数字通信系统中，如果我们考虑门限检测，则误差概率只取决于待判决之脉冲的强弱，故确定各种方案（如开一关、极性、双极性等）的相对性能很容易。例如，当抗扰度相同（即误差概率相同）时，不必依靠任何统计概念，即可证明开一关或双极性方案要求两倍于极性方案的功率。甚至在决定差错率时，也只需要对概率密度的分布略作讨论，因为决定差错率也就相当于决定噪声幅度超过某值的概率。因此，研究各种通信系统（数字和模拟）在存在噪声情况下的相对性能，基本上可以不用统计和系综平均值的概念。我发现这是解决前述困难最适当的办法。

本书的前四章就是完全按照这一想法写的。这几章较深入地阐述了数字和模拟通信系统是如何工作的，还以上面所说的那种方法阐述了在存在噪声情况下通信系统如何工作。因此，它们构成了一部完整无缺的通信系统概论，而且其深度是一般大学生力所能及的，其内容可以在三至四学期的时间内讲完。一旦学生掌握了这前四章的内容，他们就可着手深入学习通信理论中的统计概念。第五

章至第九章便是阐述这方面内容的，它们适合于高年级学生或研究生阅读。

第一章向学生介绍通信系统的全貌，以启发式的方法定性解说了所有有关通信理论的重要概念，以使学生发生浓厚兴趣，渴望深入往下学习。因而他们将乐于学习第二章中信号分析这一工具。这一章中还将讨论因各种类型的信道缺陷而造成的信号失真。第三章论述数字通信系统，包括模拟信号的数字传输（PCM和DM）。第四章讨论模拟信号与数字信号对载波的线性调制和指数（或角度）调制。第五章比较深入地论述了概率论和随机过程，这是学习通信系统所需的另一工具。我们通过列举它们在通信中的应用，尽力激发学生的兴趣，并使他们自始至终保持学习这章的兴趣。第六章讨论在存在噪声情况下通信系统的性能，在此，我们使用了系综平均值这一概念。第七章讨论最佳信号检测，第八章介绍信息论。最后在第九章中，我们讨论差错控制编码。

诸如PAM、PPM和PWM之类的模拟脉冲调制系统由于在通信中很少应用，相比之下它们就不如数字方案（PCM和DM）重要。数字方案目前得到了广泛使用，而且在今后将得到更广泛的应用。单音调制的FM（调频）由于某种原因也显得不太重要了。由于角度调制是非线性的，因此不能把从单音调制推得的结论盲目地应用于其它基带信号的调制。事实上，在许多情况下，这些结论会把人引入歧途。例如，在有的文献著作中，PM（相位调制）被认为不如FM而受到了冷落，但这是基于单音调制分析而得到的一个结论*。第四和第六章将表明，在所有实际情况中（包括话音），PM优于FM。由于这个缘故，单音调制FM的重要性受到削弱，人们更多地注意PM以及FM与PM的比较了。

在我的前两本书（《信号、系统和通信》，Wiley，1965；《通信系统》，Wiley，1968）中，我在信号矢量类比方面花费了

*认为PM不好的另一个理由是，相位偏移必须限制在 π 值之内。在第四章中，我们将说明，对于限带模拟信号来讲，情况并不完全如此。

很大篇幅和力气。不管信号矢量类比的效力如何，它所花的时间实在是太多了，由于通信系统新增添了几方面内容，现在再不能在信号矢量类比方面花费那么多时间了。而且，它无必要地拖延了关于工具（信号分析）的学习，因而分散了整个课程。为此，在本书中，我们省略了信号矢量这一内容，而信号空间的内容则推迟到第七章去学。

第二、四、五和六章各有两个部分。虽然其中每一章都可以方便地分成独立的两章，但是由于某种充分的理由，我们避免采取这种做法。如果把一个论题分为太多的章节，则从表面上看好象有许多个分散的没完没了的题目，因而初学的学生就会感到迷惑混乱，看不到各章之间的相互联系。但是，如果把一个论题（作为一章）分为较少几个明确定义的部分，学生就容易看到一个整体。这种情形类似于参观一幢大楼。当参观者看到许多房间时，就会感到迷惑、无头绪，看不到大楼的整体性。但是，如果一个向导仔细地把大楼划分为几个明确定义的区域，例如起居区、卧室区、娱乐区等等，那么参观者就很容易了解每一房间的用途以及它与整个建筑的关系。

编写本书的目的之一是使学生比较乐意学习，至少不是硬着头皮去学，因此我们用清晰、易懂、逻辑条理性强的方式来阐述每一论题。另外，象进行启发式解释那样，我们尽力对一些理论结果进行深入（不光是理解）的解释。为了进一步说明抽象的理论结果，书中还给出了许多实例。如果上述目的能达到，那怕是部分地达到，我的全部辛劳也将是值得的。

B. P. Lathi

目 录

序言	(1)
第一章 绪论	(1)
1.1 通信系统	(1)
1.2 模拟和数字消息	(4)
1.3 信噪比、信道带宽和通信速率	(10)
1.4 调制	(13)
1.5 随机性、冗余度和编码	(16)
第二章 信号分析和信号传输	(18)
第一部分 信号分析	(18)
2.1 周期信号的傅里叶级数表示	(18)
2.2 非周期信号的指数表示：傅里叶变换	(33)
2.3 傅里叶变换的一些性质	(47)
2.4 取样定理	(73)
第二部分 信号传输	(85)
2.5 通过线性系统的无失真传输	(85)
2.6 信号通过信道时的失真	(97)
2.7 脉冲传输的带宽和速率	(104)
2.8 能量谱密度	(110)
2.9 功率谱密度	(117)
2.10 噪声的功率谱密度	(128)
参考文献	(131)
习题	(132)

第三章 数字通信系统	(151)
3.1 数字复接	(153)
3.2 线路编码	(160)
3.3 脉冲成形	(179)
3.4 扰码	(198)
3.5 再生中继器	(200)
3.6 检测差错率	(208)
3.7 M进制通信	(212)
3.8 数字载波系统	(216)
3.9 模拟信号的数字传输	(220)
附录3.1 均衡器抽头设定值计算	(248)
参考文献	(250)
习题	(251)
第四章 调制	(258)
第一部分 幅度(线性)调制	(258)
4.1 基带通信和载波通信	(258)
4.2 幅度调制: 双边带(DSB)	(259)
4.3 幅度调制(AM)	(272)
4.4 幅度调制: 单边带(SSB)	(283)
4.5 频率误差和相位误差在同步解调中的影响	(295)
4.6 幅度调制: 残留边带(VSB)	(305)
4.7 数字载波系统	(311)
4.8 AM系统中的干扰和噪声	(314)
4.9 超外差式AM接收机	(321)
4.10 电视	(324)
4.11 频分多路复用	(338)
第二部分 角度(指数)调制	(342)
4.12 广义角度和角度调制的概念	(342)

4.13	调角波的带宽	(349)
4.14	FM波的产生	(364)
4.15	FM的解调	(370)
4.16	调角系统中的干扰和噪声	(381)
4.17	FM接收机	(396)
4.18	传输媒介	(398)
4.19	光通信	(403)
附录4.1	锁相环分析	(406)
参考文献	(411)
习题	(413)
第五章	概率论和随机过程	(427)
第一部分	概率论	(427)
5.1	概率论初步	(428)
5.2	随机变量	(439)
5.3	统计平均值(均值)	(463)
5.4	中心极限定理	(475)
5.5	相关	(476)
第二部分	随机过程	(480)
5.6	从随机变量到随机过程	(480)
5.7	随机过程的功率频谱密度	(492)
5.8	多个随机过程	(509)
5.9	随机过程通过线性系统的传输	(511)
5.10	带通随机过程	(517)
5.11	最佳滤波: 威纳-霍普夫滤波器	(528)
参考文献	(532)
习题	(533)

第六章 存在噪声情况下通信系统的性能 (545)

第一部分 模拟系统 (545)

6.1 基带系统 (546)

6.2 调幅系统 (548)

6.3 调角系统 (559)

6.4 脉冲调制系统 (579)

6.5 最佳预加重-去加重系统 (592)

第二部分 数字系统 (599)

6.6 最佳门限判决：二进制情况 (600)

6.7 M 进制通信 (631)

6.8 同步 (647)

参考文献 (648)

习题 (649)

第七章 最佳信号检测 (658)

7.1 信号的几何表示法：信号空间 (658)

7.2 高斯随机过程 (667)

7.3 最佳接收机²⁻⁵ (673)

7.4 等效信号集 (704)

7.5 非白色(彩色)信道噪声 (713)

7.6 其他有用的性能标准 (713)

附录7.1 矢量集的格兰姆-施密特正交化 (719)

参考文献 (723)

习题 (724)

第八章 信息论导言 (729)

8.1 信息的度量 (730)

8.2 源编码 (736)

8.3 在有噪声信道上的无差错通信 (743)

8.4	离散无记忆信道的信道容量	(749)
8.5	连续信道的信道容量	(759)
8.6	按照香农公式建立的实际通信系统	(780)
	参考文献	(788)
	习题	(790)

第九章 纠错码

9.1	引言	(794)
9.2	线性分组码	(797)
9.3	循环码 ^{1,2}	(806)
9.4	检测和纠正突发差错码	(815)
9.5	纠正突发差错和随机差错的交错码	(816)
9.6	卷积码	(818)
9.7	编码和非编码系统的比较	(829)
	参考文献	(833)
	习题	(834)
	附录A	(838)
	补充读物	(841)

第一章 绪 论

本书探讨用电信号进行的通信。往昔，消息都是通过送信人、信鸽、击鼓和火炬传递的。这些方法只能用于那个时代的距离和“数据速率”。如今，在世界大多数地方，这些通信方式已经被电气通信系统所取代*。电气通信系统能够在很长很长的距离（甚至到遥远的行星和银河系）上，以光速来传输信号。

电气通信造价低，可靠性高，利用信息处理能换得更为合理的能源使用，因而通信技术可以缓和能源危机。这里不妨举几个例子。比如说，目前多半在会议上面对面进行的重要会谈、经常性的出差，将会越来越多地被“会议电信”代替。类似地，通信可以提供远地购货（teleshopping）和家庭银行等业务；报纸也将由电子新闻业务取代。

1.1 通信系统

图1.1表示三个通信系统例子。一个典型的通信系统模型如图1.2所示。通信系统的构成要素包括：

信源 发出消息（message）的部分叫信源。例如，人类语音、电视图象、电传报文或数据等都是信源发出的消息。如果数据是非电气性的（人类语音、电传报文、电视图象），那么必须通过输入转换器把它变换为电波形，称之为**基带信号**或**消息信号**

发送机 它为了进行有效的传输而改变基带信号。**

*邮政服务除外。

**发送机包括一个或几个下列子系统：预加重器、取样器、量化器、编码器和调制器。类似地，接收机可以包括解调器、译码器、滤波器和去加重器。



图 1.1 通信系统举例

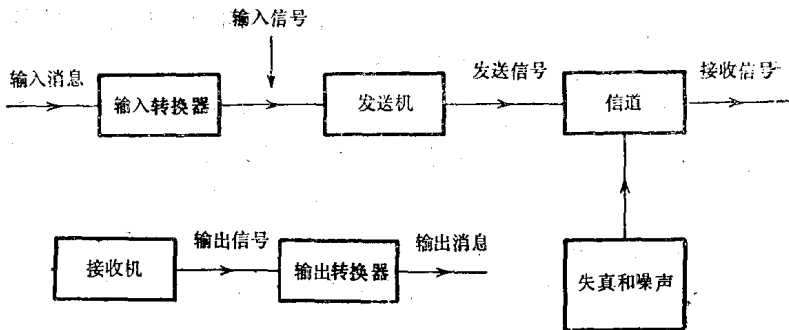


图 1.2 通信系统模型

信道 信道 (channel) 是一种媒介, 如金属线、同轴电缆、波导、光纤或无线电线路等都是信道。发送机的输出就是通过信道送出去的。

接收机 它对来自信道的信号重新进行处理, 以消除发送机和信道使信号产生的变化。接收机的输出则被送至输出转换器, 把电信号变成原来的形式——消息。

终点 终点即消息最终到达的地方。

信道在一定程度上起滤波器的作用, 它造成信号衰减, 波形失真。信道越长, 衰减越大, 其变化范围从短距离时的百分之几直到星际通信这样的数量级。波形失真的原因是由于信号的不同频率分量受到的衰减和相移在量值上不同。例如, 一个矩形脉冲经过处理可以变得圆滑或“展开”。这一类失真叫**线性失真**, 在接收机内利用均衡器可以对它进行部分校正, 因为均衡器的增益和相位特性与信道特性是相互补偿的。

由于衰减随信号幅度而变化, 信道还能造成信号的**非线性失真**。这种失真也可以利用接收机中的互补均衡器进行部分校正。

不仅信道会引起信号失真, 沿途的无用信号也会损坏信号。广义地说, 所有无用信号都可归结为**噪声**, 噪声是由外部原因或内部原因造成的不可预测的随机信号。外部噪声包括来自邻近信道的干扰信号; 由电气设备开关接触不良、汽车发火装置辐射、荧光灯等产生的人为噪声; 以及来自闪电、电暴、太阳辐射和星际辐射的天然噪声。只要适当注意, 外部噪声可以减至最小甚至消除。产生内部噪声的原因包括导体中的电子热运动、电子器件中带电载流子的随机辐射, 扩散或复合。适当注意可以减小内部噪声的效应, 但绝不可能把它消除。噪声是限制通信速率的基本因素之一。

信噪比 (SNR) 的定义是信号功率与噪声功率之比。信道使信号失真, 噪声则沿途累积。更糟的是, 信号随着发送距离增加而减弱, 而噪声却同时在增大。于是, SNR沿着信道不断减小。为了补偿衰减而对接收信号所作的放大也无济于信噪比, 因为噪声按同样