

# 软件无线电

## Telecommunication Breakdown

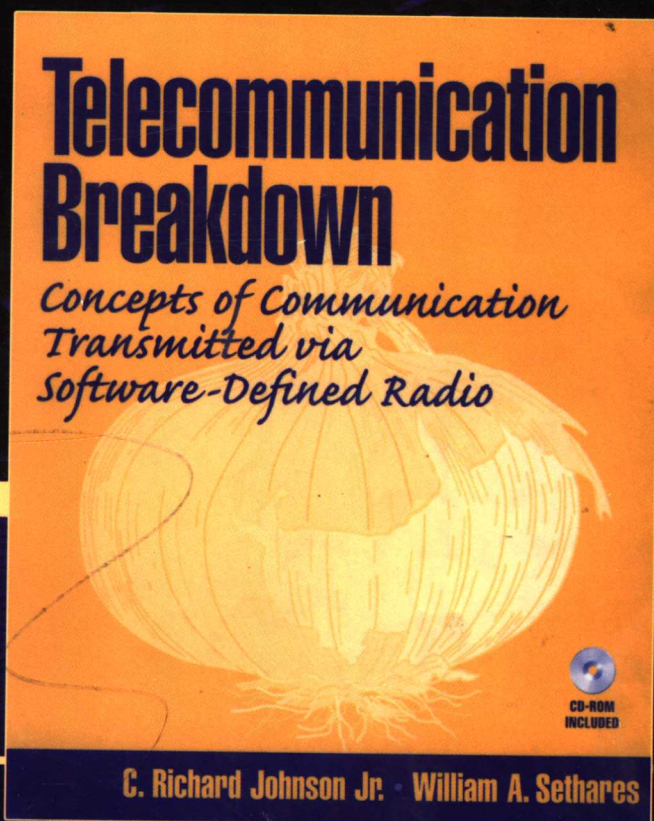
Concepts of Communication  
Transmitted via  
Software-Defined Radio

(美) C. Richard Johnson Jr. 著  
William A. Sethares

潘 甦 译



附赠光盘



电子与电气工程丛书

TN92/75D

2008

# 软件无线电

Telecommunication Breakdown  
Concepts of Communication  
Transmitted via Software-Defined Radio

(美) C.Richard Johnson Jr. 著  
William A. Sethares

潘甦译



机械工业出版社  
China Machine Press

本书主要内容有数字无线电, 通信系统, 数字无线电系统五要素, 信号失真的建模, 模拟调制和解调, 带自动增益控制的抽样数字滤波和离散傅里叶变换, 从比特到符号再到信号, 载波恢复脉冲成形和接收滤波, 同步恢复, 线性均衡, 编码Mix 'n' 匹配接收机设计。

本书可作为高等院校电子信息与电气学科本科各专业的教材和非电子电气信息类本科相关专业的选用教材, 也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

Simplified Chinese edition copyright © 2007 by Pearson Education Asia Limited and China Machine Press. Original English language title: *Telecommunications Breakdown: Concepts of Communication Transmitted via Software-Defined Radio* (ISBN 0-13-143047-5) by C. Richard Johnson Jr., William A. Sethares, Copyright © 2006.

All rights reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as PERSON PRENTICE HALL.

本书封面贴有Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号: 图字: 01-2006-6520

### 图书在版编目 (CIP) 数据

软件无线电/ (美) 约翰逊 (Johnson, C. R.) 等著; 潘甦译. —北京: 机械工业出版社, 2008.1

(电子与电气工程丛书)

书名原文: Telecommunication Breakdown: Concepts of Communication Transmitted via Software-Defined Radio

ISBN 978-7-111-22635-2

I. 软… II. ①约… ②潘… III. 计算机通信-无线电通信 IV. TN92-39

中国版本图书馆CIP数据核字 (2007) 第171858号

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王颖

三河市明辉印装有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2008年1月第1版第1次印刷

184mm × 260mm · 17.75印张

定价: 39.00元 (附光盘)

凡购本书, 如有倒页、脱页、缺页, 由本社发行部调换  
本社购书热线: (010) 68326294

## 译者序

译者长期从事无线通信方面的科研和教学工作，多次使用国外原版教材为高年级本科生讲授无线通信方面的基础课程。教学实践中发现不少通信专业的学生甚至到了研究生阶段对无线通信系统还没有形成一个完整和清晰的概念。尽管他们知道PSK是相位调制，也能记住相干解调的误码率公式。然而这些概念并没有在他们的思维中建立起一个无线通信系统的完整体系，他们多数不能搭建或仿真哪怕是最简单的无线收发发射机。他们也不太清楚当实际系统遇到各种情况，例如频率抖动、定时抖动或信道衰落时，系统会出现什么问题。他们缺少针对这些问题的模拟训练，甚至也缺少探究解决这些问题的思想动力，而这些问题都是实际无线通信系统不可避免要面对的。由此折射出教学方式和教学内容对于教学成果而言是多么的重要。

《软件无线电》这本教材通过其内容及内容的展开方式提供了一个新的教学形式。它在教学上有两个显著的特点：

一是通过模拟而进行实践，通过实践而学习理论并掌握概念。之所以能这样做，是因为这里的通信系统是由“软件”搭建的。“软件”源程序能将通信系统内部结构和精妙之处展现得一览无余，并能充分表达出所用到的算法和涉及的理论。不会像过去那样面对一堆硬件电路板而茫无头绪。这些软件模块构成了通信系统，通过学习、摸索和调测这些由软件程序构成的通信系统模块能够帮助学生建立鲜明的概念，掌握理论联系实际的方法。

二是从一开始就建立一个完整而简单的通信系统，然后再随着学习的深入，随着各种问题的提出，逐步完善和修改这个系统。这样一开始就引领学生入门，并使学生不断增加解决各种问题的能力和经验。原书作者称这是一层一层地剥洋葱，译者觉得这更像做雕塑，先建立轮廓，再一步步精雕细作。

除了作为教材之外，本书及其提供的源程序在无线通信系统研发过程中还具有较大的参考作用。它提供了许多程序模块和软件信号源可以直接用于通信系统仿真和测试，例如其提供的“均衡”程序经过修改就用到了译者参与的科研项目中。

同时需要提出的是：无线网络融合和认知无线电是未来无线通信发展的重要方向之一，这个方向需要通信节点能够动态地适应不同结构和协议的无线网络，而软件无线电是实现这一功能的基础，这是未来无线通信发展方向的基石。

感谢刘胜美博士校对了部分书稿并提出了诸多宝贵意见，感谢研究生王义、薛飞霞、时慕华和殷俊作了大量文字处理工作。感谢机械工业出版社华章分社编辑同志们的辛勤工作。

由于时间仓促，学知尚浅，不妥之处在所难免。欢迎广大读者和同行专家指正。

2007年秋于南京邮电大学



# 致教师

(也供学生参考)

本书可以帮助读者建立一个完整的数字无线电系统，这个系统包括了典型的数字通信系统的各个部分。通过一章接一章的学习，读者可以通过MATLAB软件实现系统的各部分，并在此过程中探索通信的关键思想。在最后一章，作者将前面的知识综合起来，可以搭建成具有完全功能的接收机，尽管这种接收机是不能实时工作的。本书从一个独特的视角（即构造一台可用的接收机）来探索通信系统，这个视角诠释了学习通信系统的连续性要求。

建立一个可工作的数字无线电系统有3个步骤，它们是：

- 1) 建立模块；
- 2) 评估模块性能；
- 3) 集成模块。

为了在一个学期内完成这些课程，我们必须略掉在一般介绍性课程中讲述的内容，而把重点放在其他书中往往写得较肤浅的一些内容上。接收机每个功能的实现都有好多种方法，我们没有如百科全书般罗列所有这些实施接收机每个功能的各种方法。例如，我们着重介绍频分多址，而不是时分或码分多址。我们着重于脉冲幅度调制而不是正交调制，也不介绍频移键控调制。另一方面，一些内容在数字接收机中很重要（如同步），我们会多用一些篇幅来介绍这些内容，我们相信从头到尾学习一个完整的系统，要好于支离破碎地学习很多内容。

在本书中，我们建立数字无线电模块的方法是统一的。对于许多任务，我们定义了性能函数和优化这个函数的算法。这种方法提供了一个统一的框架用来实现AGC（自动增益控制）、时钟恢复、载波恢复和均衡算法，幸运的是，可以仅用数学工具完成这些工作，而这是一个初级电气工程师（在大学低年级水平）能够具有的知识。学习本书需要微积分和傅里叶变换的知识。任何综合性的微积分教材都可以为本课程提供基础背景知识，同时需要了解信号与系统的知识，比如在第3.8节中给出的一些用于进一步阅读的教材。

本书强调用两种方法来评估通信系统部件的功能：通过研究性能函数和通过做实验。嵌入在各种部件中的算法，其推导不需要对构成信号的细节作出假设（比如是否有高斯噪声）。概率的使用仅限于基本概率，比如对样本数据的平均（得到均值），而不采用随机过程的方式。因为本书中没有对高等概率论的要求，本课程可以较早地开设。

接收机设计中的集成阶段在第9章和第15章完成，由于任何实时的数字系统是运行在一个高度复杂环境中的，不能指望用解析的方法来研究实时情况，通常做法是通过仿真和进行实验来研究。本书提供了一系列的仿真和实验的测试指导（15章）来评估接收机的运行。对于数字无线电来说，重要的挑战在于学生必须在系统中加上噪声和各种误差（现实系统不可避免会有各种误差），如：加性噪声、多径衰落、相位抖动、频率误差、时钟误差，等等。一个好的设计会在这些损害性的误差中正常地工作。

很明显上述这些选择使得本书有别于其他泛泛而谈的教材。我们相信这种易学的方法使得本书成为一个理想的学习教材，尽管它不那么包罗广泛。另外，教师也会发现，本书的内容编排次序也和其他书不同，1.3节会介绍目录次序，并解释我们为什么这样编排。

### 如何阅读使用本书:

尽管这是第一版,但作者已经使用本书的不同版本讲课数年了。我们探索了多种方法来使得数字无线电的内容适合“标准”电气工程专业大学毕业班学生的选择要求。

教师可将本书作为一门独立课程的教材,使用一学期课时,学生学习每一章,完成15章要求完成的项目作为结束。

在作者所在的康奈尔大学和威斯康星大学,对本科生设有一个为期两学期的系列通信课程,对于这样的课程,本书有三种融入的方法:

- 1) 第一学期用传统教材,第二学期用本书。
- 2) 第一学期使用本书,第二学期用传统教材。
- 3) 第一学期用本书,在第二学期作课程设计。

这三种方法效果都很好。当使用第一种方法时,学生们经常评论:通过学习本书,他们终于理解了上学期学的是什么。第二种方法可以在较低年级使用。因为本书不需要概率论做基础,当然,我们鼓励学生同时学习概率论。第三种方法会对学生的设计提出一些扩展的要求,比如从脉冲幅度调制扩展到正交调制(QAM),使用更先进的均衡技术等。其中一些扩展内容可在随书的CD中找到。

### 背景知识的阅读:

我们相信,宽带通信不断增长的市场竞争力是设计和重设计无线系统的驱动力。数字设备不断地进入以前一直由模拟设备占领的市场(比如美国提出在2006年用数字电视取代模拟电视),关于数字通信和软件无线电的报道也经常出现在媒体上。因此,教师可以强调无线数字通信所具有的社会和经济效益,以此说明本课程的学习意义。

我们提供了一个参考文章的清单,这些文章刊登在最近的一些著作,出版物上,在CD上也能找到这些文章,比如,清单上的一些文章有讨论本地公用事业部门如何投资无线因特网接入服务以吸引商业发展的,有讨论引起政府对频谱有效利用的关注的,有讨论激发用户对宽带接入需求的,有讨论无线系统基础结构的,等等。数字无线电的影响是巨大的,目前正是涉足这一领域的大好时机。本书集中在无线系统设计的技术层面,而所有大众媒体的文章都在强调无线电对经济、政治和社会的影响。我们相信这些文章清单对学生学习也是有益的。

### 一些补充:

随书的CD包含了一些补充材料,对教师尤其有用。首先,我们给出了一套完整的幻灯片(pdf格式)以帮助规划教学。纯课程设计项目有两种:一种使用第14章的分组编码,另一种没有采用。另外,CD上有大量的接收信号可以用来作为作业和完成项目。CD上还有一个名为“数字QAM(正交幅度调制)无线电”的额外章节,这章将软件无线电从脉冲幅度调制扩展到QAM。最后,CD中包含了书中的所有的MATLAB程序代码,当在MATLAB程序中添加好这些程序的路径后,这些程序可以用作作业或进一步开发。从readme文件中可以了解CD内容的清单和更新的信息。

### 数学要求:

(数学参考书名)

G.B.Thomas and R.L.Finney, *Calculus and Analytic Geometry*, 8th edition, Addison-Wesley.

J.H.McClellan, R.W.Schafer, and M.A.Yoder, *DSP First: A Multimedia Approach* Prentice Hall, 1998.

**致谢:**

Applied Signal Technology, Aware, Jai Balkrishnan, Ann Bell, Rick Brown, Raul Casas, Wonzoo Chung, Tom Endres, Fox Digital, Matt Gaubatz, John Gubner, Jarvis Haupt, Andy Klein, Brian Evans, Betty Johnson, Mike Larimore, Sean Leventhal, Lucent Technologies, Rick Martin, National Science Foundation, NxtWave Communications (now ATI), Katie Orlicki, Adam Pierce, Tom Robbins, Brian Sadler, Phil Schniter, Johnson Smith, John Treichler, John Walsh, Evans Wetmore, Doug Widney, Robert Williamson, and all the members of ECE436 and ECE437 at the University of Wisconsin, and ECE467 and ECE468 at Cornell University.

C. Richard Johnson jr.  
William A. Sethares

# 目 录

译者序  
致教师

## 第一篇 数字无线电系统的分层结构

第1章 数字无线电	1
1.1 数字无线电概述	1
1.2 图解设计	2
1.3 完整的结构	8

## 第二篇 部件结构层

第2章 通信系统	11
2.1 模拟波形的电磁波传输	11
2.2 带宽	12
2.3 发射机的上变频	13
2.4 频分复用	15
2.5 滤除频率的滤波器	16
2.6 模拟下变频	17
2.7 数字通信系统中的模拟核心	19
2.8 接收机的采样	20
2.9 以模拟为核心的数字通信	21
2.10 脉冲成形	21
2.11 同步	23
2.12 均衡	24
2.13 判决及误差估计	24
2.14 编码和解码	25
2.15 通信系统	26
2.16 扩展阅读	27
第3章 数字无线电系统五要素	28
3.1 找到信号的频谱	29
3.2 第一要素：振荡器	31
3.3 第二要素：线性滤波器	32
3.4 第三要素：采样器	35
3.5 第四要素：静态非线性	37
3.6 第五要素：自适应	39
3.7 总结	40
3.8 扩展阅读	40

## 第三篇 理想系统层

第4章 信号失真的建模	41
4.1 当好的信号受到干扰时	41
4.2 线性系统：线性滤波器	46
4.3 $\delta$ 函数	46
4.4 线性系统的时域卷积	50
4.5 时域卷积对应于频域相乘	52
4.6 改善信噪比	54
4.7 扩展阅读	56
第5章 模拟调制和解调	57
5.1 大载波的振幅调制	57
5.2 抑制载波的振幅调制	59
5.3 正交调制	62
5.4 中频插入	64
5.5 扩展阅读	66
第6章 带自动增益控制的采样	67
6.1 采样和混叠失真	68
6.2 通过采样降频	70
6.3 在MATLAB中研究采样	72
6.4 插值和重建	73
6.5 迭代和优化	76
6.6 最优化解例：多项式的最小化	77
6.7 自动增益控制	80
6.8 用自动增益控制对抗衰落	86
6.9 总结	87
6.10 扩展阅读	87
第7章 数字滤波和离散傅里叶变换	88
7.1 离散时间和离散频率	88
7.2 实际滤波	96
7.3 扩展阅读	102
第8章 从比特到符号再到信号	103
8.1 比特到符号	103
8.2 符号到信号	105
8.3 相关性	106
8.4 接收滤波器：从信号到符号	108
8.5 帧同步：从符号到比特	109



第9章 困难的发生 .....	112
9.1 理想的数字通信系统 .....	112
9.2 模拟理想系统 .....	114
9.3 平坦衰落: 简单的信号损伤和简单的调整 .....	120
9.4 其他损伤: 更多的“如果” .....	121

#### 第四篇 自适应部件层

第10章 载波恢复 .....	129
10.1 通过FFT实现相位和频率的估测 .....	130
10.2 平方差分环路 .....	133
10.3 锁相环路 .....	136
10.4 科斯塔斯 (Costas) 环 .....	139
10.5 直接判决相位跟踪 .....	143
10.6 频率跟踪 .....	146
10.7 扩展阅读 .....	150
第11章 脉冲成形和接收滤波 .....	151
11.1 脉冲的频谱: 信号的频谱 .....	152
11.2 码间干扰 .....	153
11.3 眼图 .....	155
11.4 奈奎斯特脉冲 .....	159
11.5 匹配滤波器 .....	162
11.6 传输和接收匹配滤波器 .....	165
第12章 同步恢复 .....	167
12.1 同步恢复问题 .....	167
12.2 示例 .....	168
12.3 直接判断同步恢复 .....	171
12.4 通过最大化输出能量达到同步恢复 .....	175
12.5 两个实例 .....	177
12.6 扩展阅读 .....	179
第13章 线性均衡 .....	180
13.1 多径干扰 .....	181

13.2 基于训练的最小平方线性均衡 .....	182
13.3 基于训练序列的均衡的自适应方法 .....	190
13.4 面向判决的线性均衡 .....	192
13.5 弥散-最小化线性均衡 .....	194
13.6 实例和观测结果 .....	196
13.7 扩展阅读 .....	202
第14章 编码 .....	204
14.1 什么是信息 .....	205
14.2 冗余 .....	207
14.3 熵 .....	212
14.4 信道容量 .....	214
14.5 信源编码 .....	218
14.6 信道编码 .....	221
14.7 压缩盘编码 .....	229
14.8 扩展阅读 .....	230

#### 第五篇 整合层

第15章 Mix'n'匹配接收机设计 .....	231
15.1 如何构建接收到的信号 .....	231
15.2 $M^6$ 接收机的设计方法 .....	234
15.3 $M^6$ 接收机设计的挑战 .....	239
15.4 扩展阅读 .....	240

#### 附录

附录A 变换, 等式和准则 .....	241
附录B 模拟噪声 .....	248
附录C 带通信号的包络 .....	251
附录D 傅里叶变换到离散傅里叶变换 .....	255
附录E 功率谱密度 .....	258
附录F 差分方程和频率响应及码间干扰的关系 .....	260
附录G 平均和求平均 .....	267

# 第一篇 数字无线电系统的分层结构

软件无线电是通过软件设计并实现通信传输的技术，其概念模型就好像一个洋葱一样，是分层的。第1章介绍了数字无线电的概况——洋葱的第一层。把洋葱的表皮剥掉暴露出里面一层，这就是第2章，它主要介绍了设计的细节以及多种设计方法。接下来的每一个章节都在重复使用着剥洋葱表皮的概念，而每一层都增加了知识的深度和精度。第9章提出了第一个理想状态下的功能接收机。接下来的每一章都去掉了一个理想化的假设条件，直至最后一章给出了一个最终成熟的设计结果。1.3节列出了接收机结构的五个层次，并给出了本书内容的一个基本次序的框架。

## 第1章 数字无线电

通信传输最基本的问题就是将一端发出的信息在另一端精确或者大致精确地重现。

——C.Shannon, 通信的数学理论, 贝尔系统技术杂志, 1948年第27卷

### 1.1 数字无线电概述

从香农时代至今，通信的基本理论没有发生什么重大的变革。变化了的并将持续变化的是如何将这些理论应用到具体的技术中。众多变化中最主要的一个变化就是从硬件到软件的变化——本书就反映了这种变化的趋势。它主要讨论了由软件来实现和设计无线电系统，并且这种软件设计可以用MATLAB来实现。

“无线电”不是从字面意思理解的车里的调频/调幅（AM/FM）收音机。无线电代表着任何可以在空中传输的信号，比如电视信号、手机信号或者一台可以无线上网的电脑发出的信号。其实很多这些理念跟原来的有线系统是有很大关联的，比如我们上网用的调制解调器、有线电视及普通电话等。“软件定义”的概念是指无线系统中的最重要的部分是用软件来实现的。这种用软件定义的设计方式反映了一种目前很流行的接收机设计理念，那就是越来越多的系统都是用能够重新配置的软件来设计和实施的，而不是用那种固定的不能重新配置的硬件来做。软件还可以通过仿真来表达、证明及理解信号发射的概念。例如，当我们谈论如何转化一个信号的频率的时候，整个过程就是先建立数学方程式，然后描绘结构框图，最后用MATLAB程序很具体地表达出来。

本书的教学理念就是要把书本上的知识用到实践中去：在实践中引起学生学习的兴趣，通过仿真的实例来加强巩固其数学能力，通过“操作”各个模块来整合多个概念。因此，本书的每一章都是专门研究和理解通信系统中的某一个部分，并要求完成一系列任务，用不同的方式“构建”通信系统中各个部分。在最后的一章里，结合了前面所有提到的研究结果而组成了一个全功能的接收机。

我们尽量用最精简的模型来表达每个系统部件的机理。我们并不想详尽地列出目前所有新技术方法（但是我们的表达方法和主要观点却是最新的），也不是要详细分析每一种设计方法的

细节。相反，我们要教你部分通过分析，部分利用我们提供并且你已经掌握的软件程序来研究那些系统部件的性能。我们给出完整的传输系统的内在机理。我们通过少量的理论来讲授通信中的主要概念性问题，比如通过信号变换来讲授调制，通过递归算法来讲授同步和均衡等。我们认为这些基本的理论对接收机的设计非常的重要，所以花时间来研究这些理论还是很必要的。

虽然你将要构建的接收机远不是最优的，但是它却有着全功能接收机的所有子模块。这就给我们提供了一个非常简单有效的方法来解决那些“如果出现”的问题。如果系统中有噪声怎么办？如果调制的频率跟指定值不一样怎么办？如果接收数据中有误码怎么办？如果传输码率不够高怎么办？如果传输信道中有失真、反射或者回波怎么办？如果接收机移动了又怎么办？

我们将从探讨无线数字通信的基本概况来开始本书的“洋葱模型”中的第一层。

## 1.2 图解设计

最初的设计就是介绍“洋葱模型”的外层。如果前面很多的专业术语让你感觉很不熟悉的话，我们在后面接下来的章节中会重新提到这些词并会详加解释的。图1-1到图1-7都是本节所提到的例子。当我们讨论到这些图时，你就会觉得有些概念太过简化了。因此有必要在以后的学习中回过头来再仔细研究这些图形及其表达的概念。

根据香农理论中在另一点重建传输信息的目标，假设我们要在信道的一端到另一端传送一个文本文件，当然，传文本文件没有什么神奇的，但是传mp3格式的声音文件、jpg格式的图像文件、音频片断、电视图像扫描信号及其他任何的只要能够相应地转变成二进制0或1数字的信息就会有一些复杂的地方需要处理。

在信道中最简单可行的方法就是发送一个脉冲代表“1”，而什么也不发送就代表“0”。但是，在这种情况下很难区分在信道中出现一大串0和发射机根本没有传送信号这两种情况。那么通常的解决办法就是发送一个正的脉冲来表示1，而发送一个负的脉冲来表示0。事实上，如果接收机能够区分不同大小的脉冲的话，我们完全可以用一个符号（一定大小的脉冲）传送两个比特。比如，用脉冲幅度<sup>⊖</sup> +1、-1、-3、+3来表示不同的二进制数10、01、00和11。这四个符号±1、±3叫做符号表，而从原信息（如文本）到符号表的转化是由发射机框图1-1中的“编码器”来处理的。英语字母表的头几个字母及相应的标准二进制ASCII码及其对应的符号编码序列如下：

字母	二进制ASCII码	字符串	
a	0110 0001	-1, 1, -3, -1	
b	0110 0010	-1, 1, -3, 1	
c	0110 0011	-1, 1, -3, 3	
d	0110 0100	-1, 1, -1, -3	(1-1)
⋮	⋮	⋮	

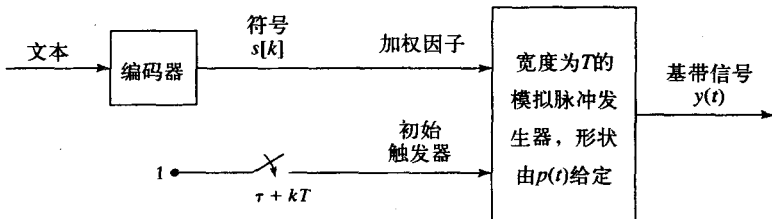


图1-1 理想化的基带发信器

⊖ 有很多选择振幅的方式。本例中选择的值是等距的，从而使噪声不会把3混淆成1或者把1混淆成-1。

在本例中，符号被分成了四个组，而每一个组叫做一帧。设计合适的编码方法可以提高传输的安全性、减少传输错误及增加数据的发送码率。尽管本例中这种简单的编码规则在很多方面不是最优的，但我们可以很方便地将它应用在仿真学习中。那么具体来说：定义：

- 1) 符号的时间间隔 $T$ 是连续发送符号之间的间隔；
- 2) 脉冲形状函数 $p(t)$ 是传输脉冲形状的时间函数。

例如， $p(t)$ 可以是矩形脉冲

$$p(s) = \begin{cases} 1, & \text{当 } 0 \leq s < T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1-2)$$

它的图形在图1-2中给出。图1-1中给出的发射机被设计成每隔 $T$ 秒就会产生一个 $p(\cdot)$ 函数的复制，而这个 $p(\cdot)$ 函数是经过符号变量 $s(\cdot)$ 函数加权的。图1-3所示图形就是图1-1所示的发射机发出的典型波形。我们可以看到，第一个脉冲经过 $s[0]$ 加权后在某一时刻 $\tau$ 发出，产生了 $s[0]p(t-\tau)$ 。第二个脉冲由 $s[1]$ 加权后在 $\tau + T$ 时刻发出，结果是 $s[1]p(t-\tau-T)$ 。第三个脉冲结果是 $s[2]p(t-\tau-2T)$ ，……。发射机的完整输出是这些加权后的脉冲的叠加。

$$y(t) = \sum_i s[i]p(t - \tau - iT)$$

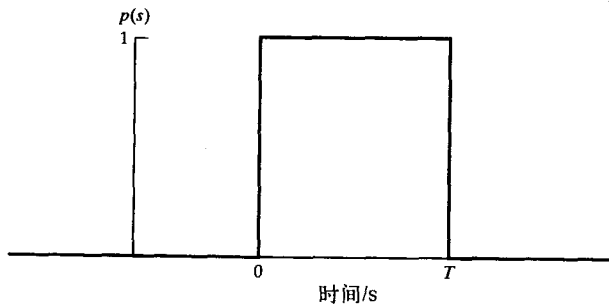


图1-2 独立的矩形脉冲

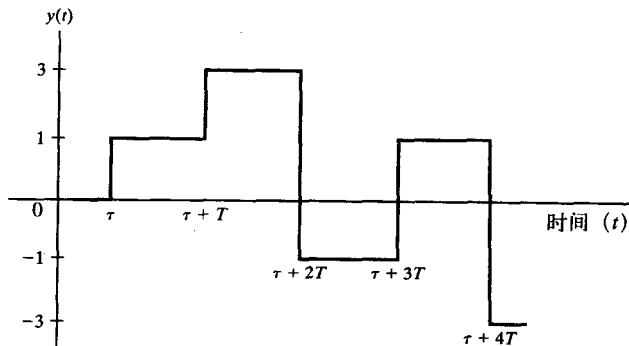


图1-3 由脉冲序列构成的发射信号，每个脉冲对应着一个符号。每个脉冲与图1-2所示脉冲形状相同，但时间上有一定延迟（由 $\tau$ 决定），幅度上有一定加权（由符号 $s[k]$ 决定）

因为一个脉冲停止后下一个脉冲开始，因此接收机一端接收到的一连串符号之间就没有混叠。通常采用通过利用符号幅度来调整脉冲大小从而来传送信息的通用方法叫做脉冲振幅调制（Pulse Amplitude Modulation——PAM）。例如式（1-1）中有四个字符，那我们就叫它4-PAM。

现在，假定发射机和接收机之间的路径（通常我们叫它信道）是理想化的。这就意味着接收机端收到的信号跟发射机发出的一样，这里我们先不考虑由于有限的电波传输速度而使信号产生的传输延迟及由于距离使得信号产生的衰落——这些在现实中都是不可避免的。当理想信道具有增益 $g$ 及时间延迟量 $\delta$ 的时候，图1-3的接收信号图就会变成图1-4所描绘的样子了。

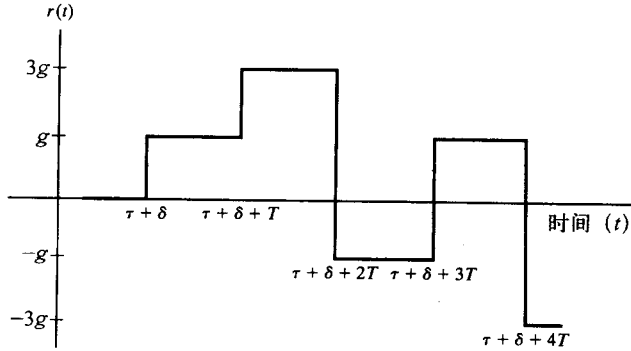


图1-4 在理想状态下，接收信号和图1-3中的发射信号是一样的，只不过幅度上有衰落（衰落 $g$ 倍），时间上有延迟（延迟 $\delta$ ）

在实际（非理想化的）信道中，有成千上万种可能会使一个真实的信号从发射机到接收机的过程中产生畸变。可能是由山峰或者大厦反射造成的，也可能是大气层散射造成的。波形随时间畸变会导致连续脉冲的混叠。其他的信号会跟已知信号形成加性干扰（比如，不同的城市间的无线电台发出的同一频率的无线电波），噪声会进入系统改变波形形状等。

在排除其他因素的情况下，电信传输系统在理想情况下有两个最值得讨论的问题。首先，工作中接收机的核心问题就是其结构能够使得接收机在理想状态下运行。经典的接收机设计方法（同样也是软件无线电的设计方法）就是先建立一个理想状态下的模型，然后再放到实际中去慢慢调整，直到接收机在多种不利因素下也能正常工作为止。第二，在理想状态下，我们能够更加清楚地理解许多基础概念。

接收机的任务就是要接收传输信号（见图1-4）并且将源文本信息复原。图1-5所示的这个理想状态下的接收机能够实现这个过程。接收机首先要完成的任务就是对信号进行采样，使之转化成计算机识别的数字格式。但是何时开始采样呢？对比图1-3和图1-4，我们清楚地看到如果接收到的信号在靠近矩形脉冲段的中间处被采样的话，量化器就能够重建源信息字符。量化器必须同时满足以下两个条件：

- 1) 要知道信道增益 $g$ 的值，并将接收信号的幅度降为 $1/g$ 来恢复信号值；
- 2) 要能够区分 $\pm g$ 和 $\pm 3g$ ，并将输出值标为 $\pm 1$ 和 $\pm 3$ 。

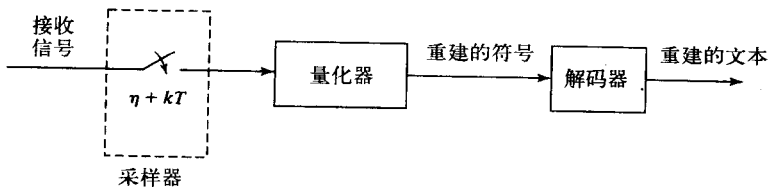


图1-5 理想基带接收机

符号一旦被重组之后，源信息就能够被解码并恢复成跟发射机发出的序列一样的信息了

(就像式(1-1)所示的序列)。相反,如果采样过程是发生在两个字符转换过程中的话,那么采样值就会发生混乱。

为了充分研究定时问题,现在我们假定 $T$ 就是采样时间间隔,而设 $\tau$ 为第一个脉冲发出的时刻。将 $\delta$ 作为信号从发射机传送到接收机所用的时间。那么,第 $(k+1)$ 个发出的脉冲发射时间是 $(\tau+kT)$ 到达接收机的时刻是 $(\tau+kT+\delta)$ 。采样的最佳时刻就是脉冲的中点,那就是 $(\tau+kT+\delta+T/2)$ 。正如图1-5所示,接收机在 $\eta$ 时刻开始采样,并且每 $(\eta+kT)$ 采样一次,其中 $k$ 为整数。如果 $\eta$ 满足

$$\eta = \tau + \delta + T/2 \quad (1-3)$$

的话,采样效果将是较好的。但是还有两个问题:①接收机不知道发射机是何时开始发送信息的;②接收机同样不清楚信号从发射机开始多长时间能够到达接收机。所以 $\tau$ 和 $\delta$ 都是未知的!

通常而言,通信系统需要一些额外的同步过程来保证式(1-3)得到满足。不过,在理想状态下,采样点并不是必须非要在脉冲波形的中点,只要不靠近波形的边缘就可以了。即使不在矩形波的中点进行采样,依然是可以重建出所传输的字符序列的。如果脉冲的波形并非简单的矩形波的话,那么 $\eta$ 的选取就会变得很重要了。

就像没有两个时钟可以报完全相同的时间一样,两个独立的振荡器不可能是绝对同步的。我们把发射机端发出的字符周期叫做 $T_{\text{trans}}$ ,由于收发机分别使用各自的振荡器, $T_{\text{trans}}$ 与接收机端周期 $T_{\text{rev}}$ 很明显是不一样的。那么,关于时间同步的问题最终需要解决的就是 $T_{\text{trans}}$ 和 $T_{\text{rev}}$ 之间的自动调整,使得 $T_{\text{trans}}$ 和 $T_{\text{rev}}$ 能够一致。

同样的,没有任何一个时钟能够绝对均匀的发出每一秒的滴答声。所以 $T_{\text{trans}}$ 和 $T_{\text{rev}}$ 的值会有抖动,就像在海上摇摆不定的小船一样,这是不可避免的。这样,就要求调整 $\eta$ 来使采样保持在每个波形的中间位置进行。图1-5的框图中并没有明确地将这种采样时间的调整设备表示出来。在理想状态下的传输系统中,我们假定接收机的采样周期字符和发射机端的发射周期字符(在图1-1和图1-5中都叫做 $T$ )是一样的,两地时钟也没有抖动。

尽管已经按照上面的理想状态进行了假定,还有一种同步也是很必要的。假设在无线传输的过程中,在接收端的捕获过程中丢失了 $K$ 个符号。即使整个符号序列在时间 $K$ 之后都被完整地接收下来了,但是接收机却并不知道哪个相应的符号才是某一帧的起始端。比如使用式(1-1)作为字母和符号的编码规则,每个字母被编写成4个符号。如果接收端接收到的某一帧的起始端错位一个符号的话,那么整个从符号翻译过来的字母将会变得面目全非。比如下面的例子,它到底是字母 $a$ 还是 $X$ 呢?

$$\begin{array}{c} \overbrace{-1, 1, -3, -1}^a \\ \underbrace{-1, -1, 1, -3, -1}_X \end{array}$$

因此合理的解码过程需要准确的定位每一帧的起始位置,即帧同步过程。图1-5中的帧同步的问题就是 $\eta$ 的选取问题,当它是 $t$ 的时候正好意味着整个消息序列的第一帧的第一个发送字符的时隙等于 $\eta$ (当 $k=0$ 时)。

在理想状态下,当没有其他的信号来占用传输系统的频率范围时,图1-1的发射机到底需要多少传输带宽(也就是频率范围)?以一个 $T$ 秒宽度的矩形脉冲为例。傅里叶变换已经证明了任何一个有限长时间序列脉冲的带宽都不是有限的,也就是说不能将它的频率限定在一个有限的范围之内。矩形脉冲的傅里叶变换的在频域是一个sinc函数(请查看附录A中的式(A-20))。



sinc函数的包络服从一个随频率而递减的函数（见图2-10）。所以，为了容纳这个单脉冲的传输，其他所有的发射机必须在带宽 $B = 1/T$ 的一定倍数的频率范围内没有发射功率。例如，假如5倍范围内是合适的，那么所有其他的发射机在5BHz之内的频率应该没有发射功率。但这只适合于一个简单脉冲的情况。那当不同振幅的宽度为 $T$ 的矩形脉冲序列传输的时候又会怎么样呢？很高兴告诉你，在这种情况下，大部分信息发送的带宽要求是几乎一样的，这在第11.1节将进行详细的介绍。

对数据传输的一个最基本的限制就是码率与带宽之间的相互平衡。增加数据发送比特率最直接的方法就是用较短的脉冲来发送数据，这种短脉冲能将更多的字符在一个较短的时间里发送出去。这样做，本质上就是减少脉冲间隔 $T$ ，代价就是会在更宽频率范围要求其他发射机不发送信号（否则会互相干扰），因为减少了脉冲间隔 $T$ 就是增加了带宽 $B$ 。如果5B安全带宽的要求显得过分的话，可以使用频谱随频率衰减得更快的其他脉冲形状。例如，如果使得矩形脉冲的两个直角圆滑一些的话，可以减少高频分量。同理，如果其他发射机占用了本发射机5BHz之外的高端频率部分，那么可以在本接收机之前加一个低通滤波器。受保护的5B频带以外的频率分量被低通滤波器抑制，这也会消除部分本发射机发出的矩形脉冲的高频成分。这在时域上将会导致接收到的矩形脉冲在边缘部分产生变形。在这两种情况下，接收脉冲愈加偏离矩形，定时采样也会变得愈加困难。

像图1-1的发射机和图1-5的接收机中的无线通信系统的一个缺陷是一个区域里同一时段只能有一对这样的系统工作。因为发射机占用着5BHz以内的所有的频率。然而，幸运的是有一种方法可以使多个发射机同时工作在同一区域。关键方法就是通过转移频率，以避免所有发射机都占用0~5BHz之间频段，一个系统可以用0~5BHz之间频段，另外的用5B~10BHz之间，10B~15BHz之间频段，等等。比较容易想到的是通过选择没有低频成分的不同脉冲形状（不是矩形）来实现。然而最常用的方法就是用一个高频正弦信号倍乘脉冲信号以进行调制。这样的射频频率发射机显示在图1-6中。必须要知道，根据不同的应用，实际使用的频率可能将处于电视波段或者处于为手机通信而预留的频率范围之内。

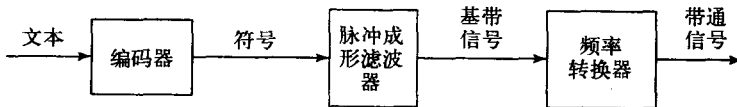


图1-6 射频发射机

在接收机，信号同样用另一个高频正弦信号倍乘并经过低通滤波后就可以转化为原有信号频率，也就是解调的过程。这些频率转换过程在2.3节会有更具体的阐述。在这些章节中会讲到，要想在接收端完全恢复信号原始形态，调制正弦信号和解调正弦信号必须具有同一频率和同一相位。正如无法使两个时钟完全同步一样，也无法产生两个相互独立的拥有绝对同一频率和相位的正弦信号。因此就极其需要一种载波同步的方法，一种使这些振荡器保持一致的途径。

在图1-1的发射机和图1-5的接收机中加入频率转化可以得到如图1-6的发射机和与之对应的图1-7的接收机。发射机中新加的模块是一个模拟部件，它在基带脉冲序列的所有频率成分中等效地增加同样的频率值。正如上文所说的那样，这种频率转化可以通过乘以一个正弦载波来完成，而这个载波具有我们所要求的发射频率。图1-7的接收机中新加的模块也是一个模拟部件，用于在采样前处理接收到的模拟信号，在接收信号所有成分中减少同一频率值。这个模块的输出应该和图1-5中采样器的输入是一样的。

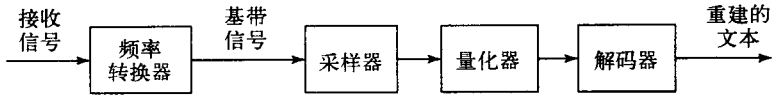


图1-7 射频接收机

这种将发送信号的频谱转换到高频的方法可以实现让许多个发射机同时工作在同一频率。但这是有一定代价的。既然信号不能完全将频带限制在 $5B$ 之内，那么就不可避免地产生频谱上的交叠。因此，发射机设计频带外面的残余部分会对其他发射机产生干扰。这样一来，频谱搬移虽然解决了多路传输问题，但也导致了对理想传输假设的否定（带来了干扰，不再是理想传输）。贯穿本书的一个主题就是：对一个问题的解决常常会导致另一个问题的出现。

事实上，传输信道许多时候会偏离理想状况，这些将在以后的章节中详细阐述。（例如：4.1节和整个第9章）。典型的情况就表现在混乱的电磁频谱会导致多种多样的失真和干扰，它们包括：

- 1) 带内失真和干扰（特定的发射机占用的频带内的失真和干扰）；
- 2) 带外干扰（特定的发射机占有频带之外的频率成分对该发射机造成的干扰，例如其他发射机发射的信号）；
- 3) 窄带干扰（类似正弦波的干扰）；
- 4) 宽带干扰（占用整个频带甚至更宽频带的干扰）；
- 5) 衰落（此时接收信号功率会波动）；
- 6) 多径（当传输环境中在不同地方有很多具有反射或吸收性质的物体时，经由不同的路径传输延时也不同，这会使接收信号之间相互削弱并且会对某些频率成分具有较大的衰减）。

这些信道的非理想性集中体现在图1-8的信道模型中，这个信道模型在通信系统中应介于图1-6与图1-7之间。

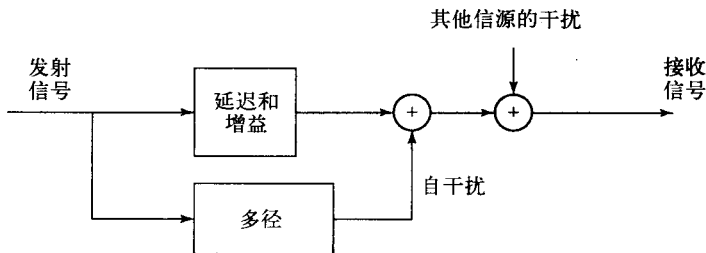


图1-8 存在多种干扰的信道模型

在接收机灵活地使用滤波器会使信道的这种非理想性得以改善。窄带干扰可以用凹陷滤波器去除，它会抑制窄带干扰信号频率成分而不会对宽带信号产生很大影响。而带通滤波器则可减小带外干扰和宽带噪声，这种滤波器抑制频带外信号但能使频带内部频率成分不失真地通过。如图1-7，也许有人会考虑放一个这样的滤波器是在采样器前面好还是在后面好（也就是说，是模拟的滤波器好还是数字的滤波器好）。在现代接收设备中，整体趋势是减少模拟的处理过程，因为数字方式更为便宜也更灵活，它们是通过重新配置软件来实现而不是由固定的硬件来实现的。

采用更多的数字化处理则要求把采样器放置得更接近天线。根据采样定理（第6.1节介绍）：只要采样频率大于信号最高频率的两倍，信号就不会失真，信息也就不会丢失。因此，如果把信号调制到 $20B \sim 25BHz$ 之间的频率上，那么采样频率至少每秒 $50B$ 才能在任意时刻准确地重构信号信息。假设这是可行的，接收到的模拟信号可以由足够高速的采样器采样，那么在

任意时刻，即可运用插值技术再现信号内容，比如在时刻 $\eta + kT$ 采样和插值（回想一下式(1-3)），此时 $\eta$ 不必是时间 $T$ 的整数倍。这样，时间同步就能合并到前置的采样器的数字信号处理模块中去，就像图1-9所示那样。容易看到：图1-7是图1-9的特例。

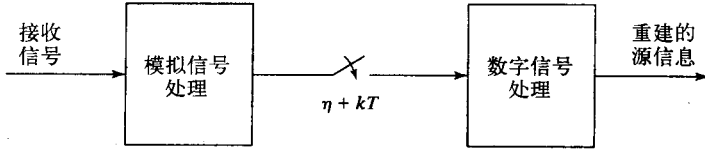


图1-9 同时使用模拟信号处理技术 (ASP) 和数字信号 (DSP) 处理技术的现代通用接收机模型

尽管如此，有时在模拟电路上完成某些任务具有更好的经济性。例如，如果发射机调制到一个非常高的频率，就要求足够快的采样速率，而这通常是很昂贵的。目前在实际系统中，使用接收机的模拟部分来完成频率转换和某些带外信号抑制的任务。有时完全由模拟部分把接收信号转换到基带，有时则是先由模拟部分转换到某些中间频率，然后由数字部分完成转换；这种方式的优点是模拟部分可以做的不十分精确，因此造价低；由数字处理完成工作，同时实现对在（廉价的）模拟电路上产生的不精确性的补偿。这样，接收机的数字信号处理部分就需要纠正产生于接收机模拟部分和产生于信道的信号畸变。

接收机的数字信号处理部分能实现以下任务：

- 1) 下变频采样信号转到基带；
- 2) 跟踪已调制正弦信号的相位和频率变化；
- 3) 通过插值的方法来调整符号定时；
- 4) 通过滤波来补偿信道的非理想性；
- 5) 将不精确的采样信号转换成符号；
- 6) 通过相关性实现帧同步；
- 7) 将成组的符号解码为信息字符。

本书的重点是详尽阐述图1-6至图1-8中的系统结构，进而给出由软件定义的可工作的无线通信系统。这包括外部的说明性设计，就好像洋葱的最表面层次。

### 1.3 完整的结构

本节简要介绍本书的完整结构层次。每层都讲述了数字通信系统，然而层层递进，每层都有更深层次和更详尽的介绍。

#### (1) 数字传输层

正如我们看到的，第一层介绍了数据的数字传输，并且讨论了信息比特是怎样被编码成波形，怎样穿越媒介发送到接收机，之后被解码为比特信息的。因为没有通用的时钟，定时问题是十分重要的，在数字接收机设计中的某些最为复杂的问题就涉及接收信号的同步。一般认为通信系统由以下三部分组成：发射机（数字信息→编码→脉冲成形→频率转换）、传输信道和接收机〔频率转换→采样→判决模块→解码→重构（恢复）信息〕。

#### (2) 体系结构组成层

第2章和第3章通过概括介绍完整的无线通信系统讲述了更深层次的和更细节的知识。当信号用电磁波形式通过大气传输时，采取的是连续的（模拟的）波形形式。理解这种模拟信号的一种好的方法是通过傅里叶变换，这个问题在第2章简要地涉及到。接收机的五个要素已为多数读者所熟悉，在第3章通过一种直接有用的形式——建立通信系统不同部分的