


“电子与通信工程领域”研究生教育精品教材

# 现代数字调制及其应用 (上)——恒包络调制

◆ 王士林 徐友云 蔡云飞 编著  
◆ 徐友云 审校

 中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 现代数字调制及其应用（上）

## ——恒包络调制

王士林 徐友云 蔡云飞 编著  
徐友云 审校



电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地阐述现代数字调制的基础理论、技术原理、性能评估、实现方法、典型应用等，分为上、下两册。其中，上册第1~4章依次介绍数字调制概论、数字信号和系统分析、随机信号处理、基带数字信号传输等基础理论；第5~10章从已调信号相位路径分析入手，深入阐述恒包络数字调制与解调技术原理、关键技术、实现方案、功率谱与误码率分析等。下册重点介绍MPSK和MQAM等高阶调制和OFDM调制的基本原理、解调关键技术及其接收机设计方法，并简要介绍数字调制技术在宽带无线接入、新一代移动通信、数字卫星通信等领域的应用。

本书可作为通信、电子类专业的高校、研究所高年级本科、研究生课程教材，也可作为相关专业教师、工程师和技术管理人员的专业参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代数字调制及其应用. 上, 恒包络调制 / 王士林, 徐友云, 蔡云飞编著. —北京: 电子工业出版社, 2015.10  
ISBN 978-7-121-26941-7

I. ①现… II. ①王… ②徐… ③蔡… III. ①数字调制 IV. ①TN761.93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 192323 号

策划编辑: 张小乐

责任编辑: 张小乐

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 36.5 字数: 934 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版

印 次: 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 89.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

数字调制位于通信协议的最低层——物理层，譬如作为互联网基本协议的 TCP/IP，数字调制位于该协议的物理层（网络接口层的子层）。为了实现物理层协议，需要在物理层中采用多种技术措施，而数字调制则是其中最重要的一种。该协议要求层中的数据按帧结构排列，每帧都由前导码和数据码组成。前导码是帧同步头，数据码是来自数据链路层的数据帧（data frame）。为了能够在物理层中有效和可靠地传输数据码，需要把数字调制与信道编码作为一个整体进行设计，并称它为调制和编码方案（MCS），通常把 MCS 看成物理层中的“引擎”。选择 MCS 时应以数字调制为主，即首先根据物理层需要传输的数据速率和允许系统占用的带宽来选择数字调制方式，而后再根据系统对误比特率的要求来选择与数字调制相适应的信道编码方式。

选择数字调制方式首先需要满足信道频带利用率的要求，提高信道频带利用率有两种方法。第一种是在信息传输速率一定的条件下，通过对已调波形的设计，使已调信号的频谱尽量变窄，这样就可减少占用的信道带宽，从而提高信道频带利用率。第二种是在占用信道带宽一定的条件下，通过对已调波形的设计，使其传输的信息速率尽量提高，从而也可以提高信道频带利用率，而且所得到的信道频带利用率往往要高于第一种方法。

除了需要满足信道频带利用率要求外，选择数字调制方式时还应考虑系统的功率转换效率这一性能指标。由于信道频带利用率和功率转换效率这两个性能指标是相互矛盾而不可兼得的，只能以一个指标为主兼顾另一个指标，因此实用中选择调制方式也有以下两种方案。

## 方案 1：高功率转换效率——恒包络调制

为了实现高的功率转换效率，系统中的高功放只能在非线性状态下工作。由于这个原因，凡是利用信号幅度来传送信息的调制方式都不能使用，而只能使用恒包络或准恒包络的调制方式。高阶调制 QAM 是幅度和相位联合调制，因而不能应用，故方案 1 的信道频带利用率较低。按照已调信号相位路径的不同，恒包络调制又可划分为连续相位路径和非连续相位路径两类。方案 1 用于卫星通信和深空通信中。

在方案 1 中，提高信道频带利用率采用了前述的第一种方法，这也就是本书上册所要讨论的主要内容。上册第 1~4 章为基础部分，第 5~10 章专门讨论恒包络或准恒包络的数字调制。

## 方案 2：高信道频带利用率——高阶调制

为了传输视频信号，特别是高清（high definition）和在线（on-line）的视频信号，要求系统必须能够传送较高的数据速率，但系统允许占用的频带又是有限的。在这种情况下，就要求选用高阶调制（如 MQAM）进行映射，把输入的二进制比特序列转变为输出的多进制符号序列，使得一个符号中含有若干个比特。高阶 QAM 调制的幅度也是用来传送信息的，因此高功放必须在线性状态下工作，故方案 2 的功率转换效率较低。此外，方案 2 中的另外一个问题是：由于高阶调制一个符号中包含有若干个比特，当发射机功率受限时，就会使每比特的能量信噪比下降，从而造成系统误比特率增大。为了使系统误比特率达到要求，MCS 中必须采用强有力的纠/检错的措施，为此国际电信联盟（ITU）规定，移动通信系统中的 MCS 必须采用 Turbo 码。方案 2 用于移动通信和无线局域网（WLAN）中。

在方案 2 中,提高信道频带利用率采用了前述的第二种方法,这也就是本书下册所要讨论的主要内容。下册第 1~4 章专门讨论高阶调制(MPSK 和 QAM)和正交频分复用(OFDM),第 5 章讨论数字调制在 WLAN、移动通信和卫星通信中的应用。

虽然本书涉及内容较广、深度较深,但在编写时非常注意条理性 and 前后内容的连贯性,因此只要认真、耐心地读下去,其中的难点都是可以克服的。

最后,向本书参考文献中所有的作者们深表谢意,从你们的著作和论文中学到了大量的知识,这对完成本书的编写给予了极大的帮助。

此外,需要指出的是:

1. 作者王士林教授和蔡云飞高级工程师在 TCL 集团任职期间所积累的理论 and 实际知识在本书下册中都有所体现;

2. 本书上册第 10 章中的仿真工作是由解放军理工大学讲师许魁博士带领王飞同学协助完成的;

3. 本书的电子版制作及校验得到解放军理工大学王健博士的全力帮助,同时也得到了陈刚、李来扛、田辉、随楠楠、曹天威、王雨榕、沈先丽等研究生同学和王玲莉女士的大力帮助;

4. 本书编写过程中,得到解放军理工大学徐友云教授研究团队的张冬梅、马文峰、谢威、王聪、李宁等教员的支持和帮助;

5. 本书编写过程中,一直得到解放军理工大学李广侠、傅麒麟、钱关海、张杭、张更新、杨婷等教授和电子工业出版社编辑的支持和帮助;

6. 本书编写过程中始终得到林英玲女士给予的精神上的鼓励和生活上的关心。

在此,对以上单位和个人,作者一并表示感谢!

由于作者水平有限,谬误之处敬请指正!

作 者

2015 年 5 月

电子邮箱:

徐友云: [yyxu@vip.sina.com](mailto:yyxu@vip.sina.com)

蔡云飞: [caiyf1962@163.com](mailto:caiyf1962@163.com)

王士林: [18014720309@163.com](mailto:18014720309@163.com)

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字调制的主要类型	2
1.2 现代数字调制的发展	2
1.3 与数字调制有关的几个重要概念	3
1.3.1 应用场景与信道模型	3
1.3.2 信号传输的基本要求	8
1.3.3 恒包络调制信号的特征	9
1.3.4 已调信号的相位路径	10
1.4 数字调制的主要技术指标及评估方法	11
1.4.1 已调信号的功率谱密度	11
1.4.2 解调误比特率	11
1.4.3 已调信号峰均比	12
1.4.4 已调信号的频谱效率	13
1.4.5 调制解调器的实现复杂度	14
1.5 本书主要内容	14
第 2 章 系统和信号分析	16
2.1 系统和信号	16
2.1.1 信号的分类	16
2.1.2 系统的分类	17
2.2 信号的傅里叶级数表达式	18
2.2.1 复指数傅里叶级数	18
2.2.2 周期信号的傅里叶级数表达式	19
2.3 信号傅里叶变换的表达式	22
2.3.1 非周期信号傅里叶变换的表达式	22
2.3.2 周期性功率信号的傅里叶变换	24
2.3.3 变换定理	25
2.4 功率谱密度	29
2.5 系统响应和滤波	32
2.5.1 冲激响应、阶跃响应和时域分析	32
2.5.2 传输函数及其频域分析	32
2.5.3 传输函数对频谱密度的影响	33
2.5.4 实际滤波器和理想滤波器	33
2.6 调制和解调运算的频谱分析	35
2.7 频谱测量和计算	37

2.7.1	频谱仪	37
2.7.2	傅里叶级数系数的数值计算	38
2.7.3	傅里叶变换的数值计算	39
2.8	带通信号及其系统的低通等效法	40
2.8.1	窄带带通信号	40
2.8.2	线性窄带带通系统	43
2.8.3	线性窄带带通系统的响应	44
2.8.4	带通信号的运算	46
2.8.5	带通信号的相关	47
2.9	本章小结	48
<b>第 3 章</b>	<b>随机信号理论</b>	<b>50</b>
3.1	引言	50
3.2	概率引论	51
3.2.1	定义	51
3.2.2	随机事件的概率	51
3.2.3	联合概率和条件概率	52
3.3	离散随机变量	54
3.3.1	概率质量函数	54
3.3.2	统计平均	55
3.3.3	概率质量函数的举例	56
3.4	连续随机变量	57
3.4.1	概率密度函数和统计平均	57
3.4.2	概率密度函数的举例	58
3.4.3	随机变量的变换	60
3.5	随机过程的理论基础	62
3.5.1	定义和符号	63
3.5.2	平稳性、时间平均和各态历经性	65
3.5.3	平稳随机过程的功率谱密度	66
3.5.4	复随机过程	72
3.5.5	带通平稳随机过程的低通等效法	73
3.6	高斯随机过程	75
3.7	马尔科夫序列	75
3.7.1	离散信源	75
3.7.2	马尔科夫序列(或链)的统计模型	77
3.8	循环平稳随机过程	85
3.8.1	问题的提出	85
3.8.2	循环平稳随机过程的定义	87
3.8.3	循环平稳随机过程的统计模型	88

3.8.4	循环平稳随机过程的自相关函数	89
3.8.5	循环平稳过程的功率谱密度	98
3.9	系统和随机信号	114
3.9.1	无记忆系统的响应	114
3.9.2	线性非时变系统的响应	115
3.10	通信系统中的噪声	117
3.10.1	热噪声	117
3.10.2	窄带噪声的时域表示式	119
3.10.3	信噪比和误差概率	124
3.10.4	噪声等效带宽、等效噪声温度和噪声系数	125
3.11	小结	130
<b>第 4 章</b>	<b>基带数字信号传输</b>	<b>131</b>
4.1	引言	131
4.2	基带二进制 PAM 系统与奈奎斯特第一准则	133
4.2.1	基带脉冲形成	133
4.2.2	最佳发送和接收滤波器	136
4.2.3	设计方法举例	140
4.2.4	奈奎斯特第一准则	141
4.3	部分响应系统与奈奎斯特第二准则	142
4.3.1	双二进制基带 PAM 系统工作原理	142
4.3.2	改进的双极制系统	149
4.3.3	部分响应技术	153
4.3.4	各类部分响应系统的性能比较	157
4.4	奈奎斯特第三准则	158
4.5	发送信号频谱的形成	160
4.5.1	预编码对信号频谱的影响	160
4.5.2	用数字方法形成脉冲	165
4.6	均衡	166
4.7	眼图	169
4.7.1	眼图的基本概念	169
4.7.2	几个重要参数的定量分析	170
4.7.3	眼图	176
4.8	简单的布尔运算引入的误码扩散	178
4.9	小结	181
<b>第 5 章</b>	<b>不连续相位路径的数字调制 (I)</b>	<b>182</b>
5.1	二进制数字调制的一般概念	182
5.2	二进制数字调制信号的最佳检测	183
5.2.1	误比特率 $P_e$ 的表达式	183



5.2.2	最佳接收滤波器的传递函数	186
5.2.3	最佳检测接收机	187
5.3	二相相移键控 (2PSK)	189
5.3.1	绝对移相 (BPSK)	189
5.3.2	相对移相 (DPSK)	191
5.3.3	二相 PSK 信号的功率谱密度	192
5.4	二相 PSK 信号解调	193
5.4.1	相干 PSK 解调	193
5.4.2	差分相干 PSK 解调	194
5.4.3	载波提取	197
5.4.4	位同步提取	202
5.5	小结	208
<b>第 6 章</b>	<b>不连续相位路径的数字调制 (II)</b>	<b>210</b>
6.1	四相相移键控 (QPSK)	210
6.1.1	QPSK 调制	210
6.1.2	QPSK 相干解调	212
6.1.3	DQPSK 解调	214
6.2	QPSK 的码变换逻辑	214
6.2.1	QPSK 的相位逻辑	215
6.2.2	调制器与解调器的相位逻辑	218
6.2.3	QPSK 的差分编/译码器	221
6.2.4	DQPSK 中调制解调器以及差分编/译码器之间的配合	236
6.3	DQPSK 的误码扩散	238
6.3.1	差分译码器输出误码率的通用表达式	238
6.3.2	三种不同差分译码器的误码率	239
6.3.3	三种差分译码器误码扩散的比较	247
6.4	四相系统 QPSK 系统的载波同步	247
6.4.1	四次方环	247
6.4.2	科斯塔斯环	248
6.4.3	逆调制环	250
6.4.4	判决反馈环	253
6.5	交错正交相移键控 (OQPSK)	254
6.5.1	OQPSK 的基本特点	255
6.5.2	OQPSK 原理	255
6.5.3	OQPSK 信号的解调	258
6.6	小结	258
<b>第 7 章</b>	<b>线性连续相位路径的数字调制</b>	<b>259</b>
7.1	二进制频移键控 (FSK)	259

7.1.1	相干 FSK .....	261
7.1.2	非相干 FSK .....	262
7.2	最小频移键控 (MSK) .....	263
7.2.1	快速频移键控 (FFSK) .....	263
7.2.2	最小频移键控 (MSK) .....	278
7.2.3	MSK 与 FFSK 之间的关系 .....	285
7.3	MSK 调制/解调器的实现方法 .....	289
7.3.1	MSK 调制器 .....	289
7.3.2	MSK 解调器 .....	292
7.4	串行 MSK (SMSK) .....	306
7.4.1	串行 MSK 的特点 .....	306
7.4.2	变换滤波器的设计 .....	306
7.4.3	变换滤波器的等效低通实现 .....	309
7.4.4	用于 MSK 的匹配滤波器 .....	310
7.5	频移交错正交调制 (FSOQ) .....	312
7.5.1	FSOQ 原理 .....	312
7.5.2	相干载波和定时恢复 .....	317
7.6	小结 .....	319
<b>第 8 章</b>	<b>非线性连续相位路径的数字调制 .....</b>	<b>320</b>
8.1	正弦频移键控 (SFSK) .....	320
8.1.1	引言 .....	320
8.1.2	正弦频移键控 .....	321
8.1.3	“阿莫罗索 (AMOROSO) 型” OQPSK .....	326
8.2	平滑调频 (TFM) .....	330
8.2.1	引言 .....	330
8.2.2	TFM 的工作原理 .....	331
8.2.3	TFM 系统的实现 .....	339
8.3	无符号间干扰和抖动—交错正交相移键控 (IJF-OQPSK) .....	344
8.3.1	引言 .....	344
8.3.2	IJF 的工作原理 .....	346
8.3.3	IJF-OQPSK 调制与解调 .....	355
8.3.4	部分响应(PR)-LJF-OQPSK 调制 .....	361
8.4	互相关相移键控 (XPSK) .....	363
8.4.1	调制与解调方案 .....	364
8.4.2	XPSK 系统的性能 .....	370
8.5	调制前高斯滤波的 MSK (GMSK) .....	372
8.5.1	GMSK 的基本原理 .....	373
8.5.2	GMSK 调制/解调的实现 .....	379

8.6	载波恢复	386
8.6.1	两种类型的载波恢复原理	386
8.6.2	四相判决反馈环提取 TFM 相干载波的原理	387
8.7	小结	398
<b>第 9 章</b>	<b>理论频谱和误比特率</b>	<b>399</b>
9.1	数字调角信号功率谱密度的分析方法	399
9.1.1	一阶马尔科夫链方法	400
9.1.2	矩阵方法	400
9.1.3	最易实现的数值计算方法	438
9.2	各种调制方式的信号表示	460
9.3	QPSK 的功率谱密度	462
9.3.1	QPSK 基带数字信号	462
9.3.2	QPSK 低通复包络信号	464
9.4	OQPSK 的功率谱密度	468
9.5	MSK 和 SFSK 的功率谱密度	474
9.5.1	MSK	475
9.5.2	SFSK	483
9.6	IJF-OQPSK 的功率谱密度	485
9.6.1	IJF 基带信号的功率谱密度	486
9.6.2	IJF-OQPSK 信号的低通等效功率谱密度	491
9.7	FSOQ 的功率谱密度	494
9.8	TFK 和 GMSK 的功率谱密度	498
9.8.1	计算 CPFSK 信号功率谱密度的程序框图	498
9.8.2	TFM 的功率谱密度	500
9.8.3	GMSK 的功率谱密度	502
9.9	几种调制方式频谱特性的比较	502
9.10	频谱形状的物理解释	505
9.11	理论误比特率	510
9.12	小结	516
<b>第 10 章</b>	<b>实际频谱及误比特率</b>	<b>517</b>
10.1	带限非线性信道的描述	517
10.1.1	信道模型	517
10.1.2	非线性特性的描述	518
10.2	带限硬限幅下的频谱	523
10.2.1	OQPSK (QPSK)、MSK、SFSK 的实际频谱	523
10.2.2	IJF-OQPSK 和 PR-IJF-OQPSK 的实际频谱	533
10.2.3	理想硬限幅与饱和和高功放引起信号频谱的扩展	537
10.3	带限软限幅下的频谱	538

10.4	带限非线性信道下的实际误比特率	542
10.4.1	OQPSK (QPSK) 和 MSK 的实际误比特性能	542
10.4.2	IJF-OQPSK 和 PR-IJF-OQPSK 的实际误比特率	544
10.4.3	非线性多信道下 XPSK 系统的误比特率性能	552
10.5	小结	553
附录 A		554
A.1	频段划分	554
A.2	傅里叶变换	554
A.3	Q 函数	555
A.4	误差函数	556
A.5	式 (7.24) 和式 (7.25) 的证明	559
A.6	最大似然接收的误比特率	560
A.7	带通和等效低通信号功率谱密度之间的关系	561
参考文献		568

# 第1章 绪 论

在过去的几十年里，计算机技术和数字通信（尤其是数字移动通信）的快速发展极大地改变了人与人之间的沟通方式，并促进社会生产力的大幅提升。人类正处于信息化社会的发展阶段，并经历着从互联网时代向后互联网时代（有人称之为“移动互联网时代”或“物联网时代”，等等）的转型发展。

自香农信息论提出以来，数字通信技术得到长足发展并有无数成功应用。实践证明，建立在香农信息论基础上的数字通信系统是有效的，基本原理如图 1.1 所示。其中，数字调制是其核心模块，在整个系统中发挥着“传输引擎”的作用。

本书专门讨论各类数字调制技术。

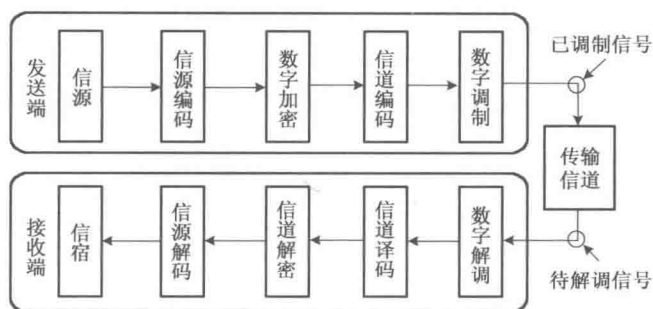


图 1.1 数字通信系统原理框图（从信源到信宿的主要物理过程）

数字调制是现代数字通信系统物理层传输协议中的关键技术，它作为一个功能模块，是数字通信系统收/发信机的重要部分；作为物理层通信协议的处理过程，在发送端将传输信息转换为适合信道传输的信号形态，在接收端则从经过信道传输的（通常是有失真的）已调信号中恢复出原始信息。

那么，什么样的信号适合信道传输呢？总体上讲，如果将信道看作一个输入输出响应系统，能够使系统输出尽量保持无失真无码间串扰的信号就是适合信道传输的信号。要做到这一点，首先，要求信号有一定的传播强度并可通过调节信号参数（如幅度、频率和相位等）携带信息；但是，信号承载信息速率不得超出信道容量；而且，信号有一定的频带宽度限制和能量（功率）限制；最后，信号有一个合适的工作频段和明确的工作频点（中心频率）。

在实际中，产生一个适合信道传输的调制信号，往往需要经过信息比特到调制符号映射、基带信号成型滤波、频谱搬移、功率放大等过程。

在接收端，经历信道传输的已调信号通过带通滤波、下变频、载波同步、帧同步、位同步、信道估计与信道均衡、判决与解映射等解调过程恢复出原始信息。

一个数字通信系统的质量，在很大程度上取决于所采用的调制方式。调制是为了使传输信号特性与信道特性相匹配，因此，调制方式的选择是由系统中的信道特性来决定的。显然，为适应不同类型的信道特性，相应地存在不同类型的调制方式。

## 1.1 数字调制的主要类型

一个通信系统选择什么样的调制方式主要取决于它的信道,同时要考虑系统所侧重的技术指标。现代数字调制技术已发展成多种具体形态:

从信息“搭载”方式的角度区分,主要有幅度调制、频率调制、相位调制,及幅度与相位联合调制(如 QAM)等。

从每调制符号承载信息量的角度区分,有低阶调制(如 2FSK、BPSK)和高阶调制(如 16PSK、32QAM)。

从系统指标制约因素的角度区分,适合功率受限信道传输的高功率效率的恒包络调制(如 QPSK、GMSK)和适合频带受限信道传输的高频谱效率的高峰均比调制(如 64QAM、OFDM)。

从已调信号频谱结构变化与否的角度区分,有线性调制(如 AM、VSB)和非线性调制(如 FSK、PSK)。

从已调信号符号间相位变化角度区分,有连续相位调制(CPM)和非连续相位调制(NCPM)。

从接收端对载波频率同步依赖程度区分,有支持非相干接收的差分调制和需要相干接收的非差分调制。

从载波频率划分的角度区分,有单载波调制和多载波调制,其中多载波调制又分正交频分复用(OFDM)多载波和广义多载波(GMC)等。

## 1.2 现代数字调制的发展

现代数字调制技术伴随着数字通信技术的进步而不断发展,已经走过半个多世纪。

20世纪50年代末,出现了频移键控(FSK)与二相相移键控(BPSK)技术。

20世纪60年代,为提高信道传输的频谱效率,提出四相相移键控(QPSK)技术,该调制方式在码元转换点存在 $90^\circ$ 和 $180^\circ$ 相位突跳,使得频谱滚降性能差,带外辐射大。

到20世纪60年代末,提出交错正交四相相移键控(OQPSK)技术,它克服了 $180^\circ$ 相位突跳问题,但在码元转换点上仍存在 $90^\circ$ 的相位突跳。

20世纪70年代初,提出最小频移键控(MSK)调制,相邻码元之间的相位变化不再有突跳,相位变化是在一个码元周期内逐渐累积完成的。

为了进一步改善调制信号的频谱滚降特性,1975年提出正弦频移键控(SFSK)调制和频移交错正交调制(SFOQ);1977年提出平滑频率调制(TFM),它们都是MSK的改进型。

随着数字蜂窝移动通信技术发展的需要,1979年,先后出现高斯滤波最小频移键控(GMSK)、无码间串扰和抖动—交错四相相移键控(IJF-OQPSK)、部分响应无码间串扰和抖动—交错四相相移键控(PR-IJF-OQPSK)、互相关相移键控(XPSK)等改进调制方法。

1982年,Ungerbock提出基于集分割卷积编码的格状编码调制(TCM)技术,有效改善了高斯信道中高阶调制信号的传输性能,开创了编码与调制紧密结合的先例。

近20年来,为满足宽带多媒体移动通信系统(3G/4G)开发需要,高频谱效率的正交幅度调制(QAM)、正交频分复用(OFDM)多载波调制得到重用。

为满足未来新一代无线移动通信系统(5G)对高频谱效率传输需求,人们正在探索一些

革命性的数字调制方法，如李道本教授团队提出的波形分割重叠时分复用（OVTDM）调制，电磁涡旋轨道角动量调制，等等。

此外，1990年代末，Walker 提出以双相编码调制等超窄带调制方法，并一度引起人们的极大兴趣。

## 1.3 与数字调制有关的几个重要概念

### 1.3.1 应用场景与信道模型

数字通信系统设计因应用场景的不同有很大差别，其中很大程度上体现在数字调制方式的差异性选取上。现实中，应用场景可谓千变万化，而调制方式选取是有限的，应该如何适配呢？这就需要从典型应用场景的信道建模入手。

现代数字通信最常见的应用场景有：缆线（包括光纤、明线、对称电缆、同轴电缆等）传输通信、地面蜂窝移动通信、室内无线互联网接入通信、天基信息传输通信（卫星通信、深空通信）、微波视距中继通信、电离层反射和对流层散射通信、水下通信等。

#### 1. 调制信道模型

信道是指以传输媒质为基础的信号通道。如果信道仅是指信号的传输媒质，这种信道称为狭义信道。如果信道不仅是传输媒质，而且包括通信系统中的一些转换装置，这种信道称为广义信道。

狭义信道按照传输媒质的特性可分为有线信道和无线信道。广义信道除了包括传输媒质外，还包括通信系统有关的转换装置，这些装置可以是发送设备、接收设备、馈线与天线、调制器、解调器，等等。广义信道按照它包含的功能，可以分为调制信道、编码信道等，还可以定义其他形式的广义信道。调制解调器优化设计的依据是调制信道的传输特性。

调制信道通常有一对（或多对）输入端和一对（或多对）输出端；绝大多数的信道都是线性的，即满足线性叠加原理；信号通过信道具有固定的或时变的延迟时间；信号通过信道会受到固定的或时变的损耗；即使没有信号输入，在信道的输出端仍可能有一定的输出（噪声）。因此，多数调制信道可以建模为时变线性网络输入输出传递模型。

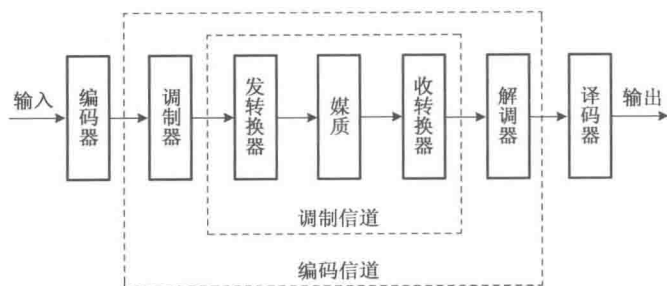


图 1.2 调制信道概念图

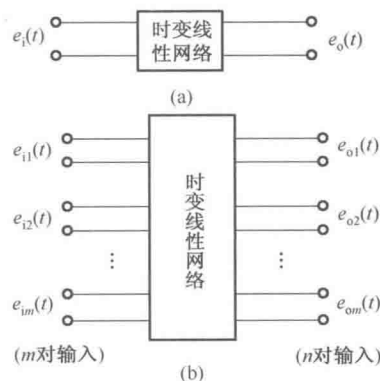


图 1.3 调制信道的传输特性模型

根据图 1.3，调制信号的总输出可表示为

$$e_o(t) = k(t)e_i(t) + n(t) \quad (1.1)$$

其中,  $e_i(t)$  是输入的已调信号,  $e_o(t)$  是信道总输出波形,  $n(t)$  是加性噪声(干扰),  $k(t)$  是乘性衰减因子(干扰)。

通常信道特性  $k(t)$  是一个复杂函数, 它可能包括各种线性失真、非线性失真、交调失真、衰落等。同时, 由于信道的延迟特性和损耗特性随时间做随机变化, 故  $k(t)$  往往只能用随机过程来描述。如果  $k(t)$  基本不随时间变化, 即信道对信号的影响是固定的或变化极为缓慢的, 则称为恒定参量信道, 简称恒参信道; 如果  $k(t)$  随时间随机快速变化, 则称为随机参量信道, 简称随参信道。

## 2. 实际信道模型

理想信道是指信道带宽为无穷大, 没有非线性特性, 只有加性高斯白噪声影响的信道。许多数字调制方式, 在理想信道下, 其误比特率几乎没有什么差别, 如果在理想信道条件下来评价它们性能的优劣, 可以说几乎是一样的。但是, 各种调制方式所产生的已调波通过实际信道(如具有带限和非线性)后, 它们的频谱特性和可检测性能则相差就很大了, 在这种情况下才能看出它们的优劣。所以, 下面在评价各种调制方式性能时, 必须和实际信道紧密联系在一起, 不能完全只考虑信道特点, 盲目地评价谁优谁劣。根据以上观点和其他一些考虑, 有必要对实际信道特性等问题做出如下假定:

- (1) 系统收、发两端均有中频或基带带限滤波器;
- (2) 系统中使用了限幅器(软的或硬的);
- (3) 发送的信号在自由空间传播, 因此, 天电干扰和信号衰落均不考虑;
- (4) 在接收机滤波器之前, 加在信号上的噪声是高斯白噪声, 其平均值为零, 双边功率谱密度为  $n_0/2$  (W/Hz);
- (5) 调制器输入的数据为“1”与“0”等概率的二进制随机序列;
- (6) 在接收机中能获得所需要的全部同步信号。

当然, 有助于解决数学推导的一些其他假设, 将在本书需要的地方再加以说明。

信道模型是调制方式选取及其性能评估的主要依据, 此外, 对通信系统的功率有效性和频带有效性要求上的差别, 也会影响调制方式的选取和技术指标的设计。

信道的数学模型是用来表征实际物理信道特性的, 现代数字通信实际应用场景的信道建模各不相同, 但大致可分为两大类: 加性白高斯噪声信道(AWGN)和衰落信道。其中, AWGN信道模型已经明确, 且有统一的数学描述; 而衰落信道数学模型因场景不同而有很多具体细分。图 1.4 所示的是静止轨道卫星数字通信系统传输模型。

加性白高斯噪声干扰是所有通信信道普遍存在的, 在某些应用场景中, 加性高斯白噪声是传输信道的主要干扰因素, 如缆线传输信道、静止轨道卫星通信信道和微波中继通信, 这类信道建模为 AWGN 信道是合理的。

地面蜂窝移动通信则是典型的衰落信道, 而且根据室内与室外、终端移动与否、城市/郊区/农村差别等具体应用场合的不同, 衰落信道模型有很大差别, 人们已经通过实测和仿真找到了很多能较好逼近真实的实用数学模型。

图 1.5 所示的是地面数字蜂窝移动通信信号传播及其衰落情况示意图, 造成信号衰落的原因包括: 自由空间传播损耗、信号的反射/散射/衍射/绕射损耗(多径效应和阴影效应)、多普勒频移信号失真(多普勒效应)等。



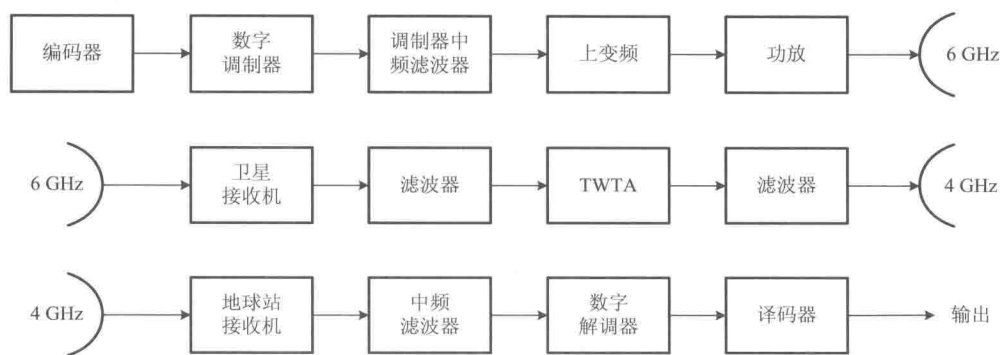


图 1.4 静止轨道卫星数字通信系统传输模型

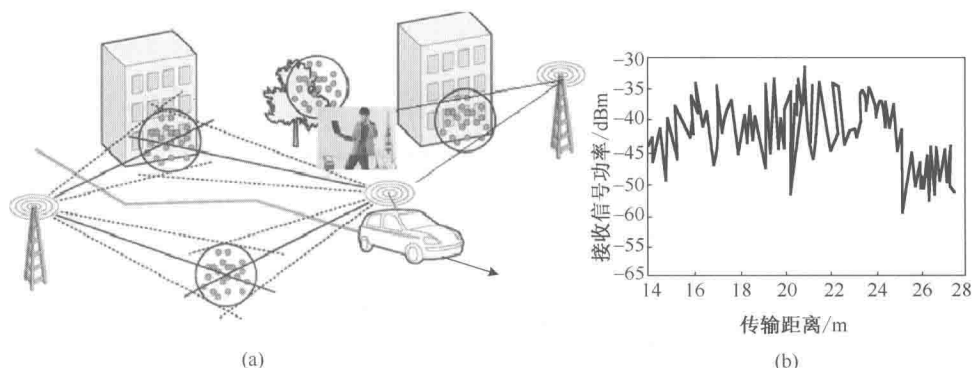


图 1.5 地面数字蜂窝移动通信信号传输及其衰落情况示意图。(a) 信号传播方式；(b) 接收信号强度变化

多径传输是地面移动通信最重要的特性之一，在多径丰富且没有直射主径的情况下，信号衰落呈瑞利 (Rayleigh) 分布特征，在这种情况下，信号传输通道可建模为瑞利衰落信道；如果接收端存在直射主径和其他多径信号，则可建模为莱斯 (Ricean) 信道。此外，具有一般性并更接近实测结果的 Nakagami 信道模型和适合描述阴影效应的对数正态 (Lognormal) 模型也被广泛采用，下面分别简要介绍。

### (1) 瑞利信道模型

瑞利衰落信道模型用于描述平坦衰落信号或独立多径分量接收的无线信道模型。两个正交的正态分布的随机过程之和的包络服从瑞利分布，如果  $X$  和  $Y$  为正态随机过程，则  $R=X+jY$  的包络  $r=|R|$  服从瑞利分布。瑞利分布的概率密度函数 (PDF) 为<sup>[24,27,28]</sup>

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), & r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

式中， $\sigma^2 = E[r^2]$  是包络检波之前的接收信号包络的时间平均功率， $R$  的相位  $\theta$  服从  $0$  到  $2\pi$  之间的均匀分布，即

$$p(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & 0 \leq \theta \leq 2\pi \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.3)$$