

普通高等院校

电子信息类系列教材

*Wuxian Tongxin  
Tiaozhi Yu Bianma*

# 无线通信 调制与编码

© 王军选 张晓燕 张燕燕 编

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

TN92/79

2008

普通高等院校电子信息类系列教材

# 无线通信调制与编码

王军选 张晓燕 张燕燕 编

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

无线通信调制与编码/王军选, 张晓燕, 张燕燕编.  
北京: 人民邮电出版社, 2008. 4  
(普通高等院校电子信息类系列教材)  
ISBN 978-7-115-17032-3

I. 无… II. ①王… ②张… ③张… III. ①无线电  
通信—调制技术—高等学校—教材②无线电通信—编码—  
技术—高等学校—教材 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 161856 号

## 内 容 简 介

本书主要介绍了无线通信中调制与编码的原理及其应用。全书共分 7 章, 内容包括: 线性调制、非线性调制、OFDM、扩频通信、分组码、卷积码、Turbo 码以及网格调制编码等。书中的论述尽量做到将通信理论和实际的通信系统相结合, 将理论分析和实例相结合。

本书适用于作为高等院校电子信息类专业的高年级学生教材, 也可供低年级研究生和工程技术人员参考使用。

### 普通高等院校电子信息类系列教材 无线通信调制与编码

- 
- ◆ 编 王军选 张晓燕 张燕燕  
责任编辑 滑 玉
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京华正印刷有限公司印刷  
新华书店总店北京发行所经销
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 13.5  
字数: 326 千字 2008 年 4 月第 1 版  
印数: 1-3 000 册 2008 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-17032-3/TN

---

定价: 24.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

# 前 言

无线通信发展日新月异，新技术不断推出。特别是移动通信技术的发展更为迅速，除了传统的移动通信 2G、3G 以及正在制定标准的 4G (B3G) 外，Wimax 等技术也逐步被业界人士所重视。但这些技术都离不开最基本的物理层技术——调制与编码纠错。本书编写的内容就是针对无线通信的这部分共性技术。

目前全国几乎所有的工科、综合类高校都开设了电子信息类专业。由于学生基础、教学的侧重点以及办学层次等方面的差异，对纠错编码的学习要求各不相同；另外，工程技术人员因工作性质不尽相同，对纠错编码知识要求的深度与广度也是不同的。同时也可以从不同的角度去学习和理解纠错编码：理论分析、技术层次和工程应用。正是这种需求的多样性，产生了对纠错编码教材多层次、多样性的要求。

目前，在很多有关信息编码、通信原理、数字系统的教材中均有调制和纠错编码内容，但限于篇幅，一般只能讲些常用码结构，不讲原理与设计；另外，许多纠错编码的专著具有很高的学术水平，对大多数非专业人员来说显得过于深奥。

本书从技术和工程角度讲述调制和纠错编码的原理、设计与应用，其中对原理的叙述力求突出概念和思路，尽量避免深奥的纯数学推导；对设计与应用则尽量具体化，列举很多实例并进行分析。

本书适合高等院校电子信息类高年级学生用作教材，也可供研究生和工程技术人员参考使用。

本书由王军选、张晓燕和张燕燕编写，全书由王军选定稿。在本书编写过程中，得到很多同事给予的帮助和鼓励，在此表示感谢。

限于编者的水平，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

第 1 章 调制和编码概论	1
1.1 调制和编码的作用	1
1.2 调制和编码的性能参数	3
1.3 调制和编码的权衡	3
1.4 先进调制和编码策略的优势	4
思考题及习题	6
第 2 章 无线系统中的调制技术	7
2.1 概述	7
2.2 数字频率调制	9
2.2.1 二进制频移键控 (BFSK)	9
2.2.2 连续相位频移键控 (CP-FSK)	12
2.2.3 最小频移键控 (MSK)	13
2.2.4 高斯滤波的最小频移键控 (GMSK)	17
2.2.5 高斯滤波的频移键控 (GFSK)	25
2.3 数字相位调制	25
2.3.1 四相相移键控调制 (QPSK)	26
2.3.2 交错四相相移键控调制 (OQPSK)	27
2.3.3 $\pi/4$ -DQPSK 调制	28
2.4 正交幅度调制 (QAM)	34
2.5 多载波调制和正交频分复用 (OFDM)	39
2.5.1 多载波调制系统	39
2.5.2 正交频分复用 (OFDM) 的工作原理	42
2.5.3 OFDM 系统中的关键技术	48
2.5.4 OFDM 系统的应用	51
思考题及习题	55
第 3 章 扩频调制通信系统	56
3.1 扩频技术概论	56
3.1.1 扩展频谱通信的定义	56
3.1.2 扩频通信的理论基础	57
3.1.3 扩频通信的性能指标	58
3.1.4 扩频通信的主要特点	59
3.1.5 扩频通信的基本工作原理和分类	60
3.1.6 扩频技术应用概况	61
3.2 扩频通信系统	62
3.2.1 直接序列扩频系统	62
3.2.2 跳频扩频系统	67

3.2.3 跳时扩频系统.....	70
3.2.4 脉冲线性调频 (Chirp) 系统 .....	71
3.3 扩频系统的伪随机码序列.....	71
3.3.1 伪随机码的概念.....	71
3.3.2 m 序列 .....	75
3.3.3 Gold 序列 .....	81
3.4 直接序列扩频系统的同步原理.....	84
3.4.1 同步不确定性的来源.....	84
3.4.2 同步过程.....	85
思考题及习题 .....	89
<b>第 4 章 线性分组码 .....</b>	<b>90</b>
4.1 概述.....	90
4.2 差错控制编码基本概念.....	91
4.2.1 差错控制方式.....	91
4.2.2 差错控制编码的分类.....	93
4.2.3 几种实用的简单检错码.....	94
4.3 线性分组码.....	96
4.3.1 基本概念.....	96
4.3.2 汉明码构造原理.....	98
4.3.3 线性分组码的主要性质.....	103
4.4 循环码 .....	104
4.4.1 循环码的定义.....	104
4.4.2 循环码的码多项式运算.....	104
4.4.3 循环码的生成矩阵、生成多项式和监督矩阵.....	105
4.4.4 循环码的编码与译码 .....	109
4.5 BCH 码.....	112
4.5.1 BCH 码的基本概念.....	112
4.5.2 BCH 码的生成.....	115
4.5.3 BCH 码的译码.....	117
4.6 RS 码.....	117
思考题及习题.....	119
<b>第 5 章 卷积码.....</b>	<b>120</b>
5.1 卷积码的基本概念和描述.....	120
5.2 卷积码的结构.....	121
5.3 卷积码的译码.....	131
5.3.1 卷积码的代数译码 .....	131
5.3.2 Viterbi 译码算法.....	136
5.3.3 序列译码 .....	142
5.3.4 卷积码的生成函数 .....	147

5.3.5 卷积码中的好码 .....	149
* 5.3.6 几种类型的卷积码 .....	150
5.4 交织编码 .....	153
5.5 卷积码在移动通信中的应用 .....	154
5.5.1 GSM 中的信道编码 .....	154
5.5.2 CDMA 中的卷积码 .....	156
5.6 级联编码 .....	158
思考题及习题 .....	163
<b>第 6 章 Turbo 码</b> .....	<b>165</b>
6.1 Turbo 的编码 .....	166
6.1.1 并行级联卷积码 .....	167
6.1.2 串行级联卷积码 (SCCC) .....	169
6.1.3 混合级联卷积码 (HCCC) .....	169
6.1.4 Turbo 的交织器设计 .....	170
6.2 Turbo 码的译码 .....	170
6.2.1 MAP 算法 .....	171
6.2.2 Max-Log-MAP 与 Log-MAP 算法 .....	176
6.2.3 SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm) 算法 .....	177
6.2.4 算法举例 .....	180
6.3 Turbo 码性能分析 .....	186
6.4 Turbo 码在第三代移动通信中的应用 .....	187
6.4.1 Turbo 码在 CDMA2000 中的应用 .....	188
6.4.2 Turbo 码在 WCDMA 中的应用 .....	190
6.4.3 Turbo 码在 TD-SCDMA 中的应用 .....	190
思考题及习题 .....	190
<b>第 7 章 网格编码调制</b> .....	<b>192</b>
7.1 网格编码调制的基本理论 .....	192
7.1.1 网格编码简介 .....	192
7.1.2 网格编码的基本思想 .....	193
7.1.3 网格编码调制的有关概念 .....	194
7.2 集合分割 .....	196
7.3 网格编码调制的表示 .....	198
7.4 TCM 应用 .....	199
7.4.1 V.32 协议的 TCM 编码 .....	199
7.4.2 V.32 协议的 TCM 译码 .....	202
思考题及习题 .....	205
<b>附录: 词汇表</b> .....	<b>206</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>208</b>

# 第 1 章 调制和编码概论

今天，无线通信已成为世界上增长速度最快的产业之一，它的产品正在对人们的生活产生着重要的影响。本书主要介绍无线通信领域中最基本的一个方面：可使信息在无线信道上传送的“调制和编码”策略。

## 1.1 调制和编码的作用

在任何一个通信系统中，尤其在无线系统中，调制和编码都扮演着一个重要的角色。图 1-1 所示为“通信系统”的简略图。

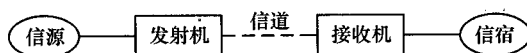


图 1-1 通信系统的简略图

由图 1-1 可见，通信系统中最基本的部分是“信道”，它是承载信息的物理媒介。在无线系统中，这个信道就是无线电波在自由空间中的传播。此外，系统中发射机的作用是在发送端将承载信息的信号（原始电信号）翻译成适合在信道中传输的信号；接收端中的接收机再将其转换回来，成为终端用户可以理解的信号形式。通信系统工程师的任务是设计出合适的设备来完成上述任务。值得注意的是：接收机的设计要比发射机更困难，它不仅仅要简单地执行发射机的相反翻译功能，它还要克服由于信道而产生的各种畸变和干扰的影响。

下面详细介绍在无线系统中所需的发射机和接收机的结构。图 1-2 给出了无线系统中发射机的结构框图；尽管接收机更为复杂，但其结构仍为发射机结构的镜像。

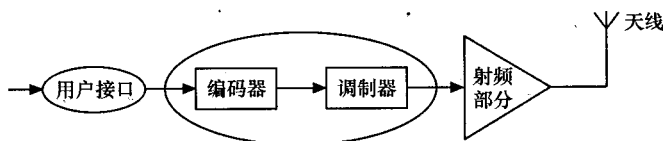


图 1-2 无线系统中发射机的结构框图

由图 1-2 可见，无线发射机由天线、射频部分、编码器和调制器、用户接口等部件构成。其中，天线的作用是将电信号转换成在自由空间中传播的无线电波；射频部分的作用是



在所需载频上产生足够功率的电信号，典型射频部分包括高功率放大器、本地振荡器和上变频器等部件；用户接口作为发射机的输入部分，直接与用户交互，其作用是将信息转换成适宜的**数字数据流**；**编码器**和**调制器**的作用是将数字数据流转换成射频部分输入端所需的电信号形式，此信号应是围绕在系统载波频率周围的一个窄频带信号。通常，这个窄带信号可通过将一个所需频率（载频）的正弦信号，采用数据修改它的某些参量来得到，此过程被称为“调制”；而为了更好地抵抗由于信道所引入的各种衰变对信号的影响，可将数据流转变成另一种形式，此过程被称为“编码”（特指“信道编码”）。图 1-3 (a) 给出了“编码器/调制器”的功能。

目前，也可将“调制和编码”用一个“单一的综合实体”来同时完成两者功能，如图 1-3 (b) 所示。这一观点强调此处理过程的重要性，即正是“编码和调制”过程决定了传输信号所占用的带宽；也正是“译码和解调”过程决定了接收数据的服务质量。例如，比特错误概率 (BER)、有效性和延迟等。此外，由于射频部分（例如噪声和非线性特性）和射频信道（例如多径时散和衰落）等的影响，也决定了系统对信道损伤的鲁棒性。

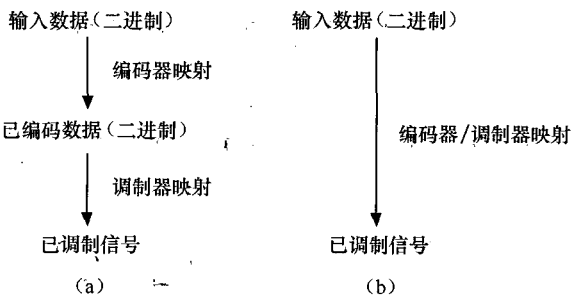


图 1-3 编码器/调制器的功能

由此可见，对调制和编码策略的研究以及正确选择对于整个系统的高效工作是至关重要的。另外，从面向软件的观点出发，另一个研究数字通信系统的有用框架是 OSI 七层协议模型，它的设计原则是：每一层通过协议栈的下一层所提供的服务可以与另一个终端的相应层进行通信，底层对上层来说是透明的；底层传递上层信息时，不改变上层信息的内容，只是增加一个本层的控制信息，此控制信息会被接收终端的相同层实体分析后剥离，执行完本层功能后，再将数据交还给上层。OSI 七层协议最低 3 层的功能列于表 1-1 中。

表 1-1 OSI 模型最低 3 层的功能

层	功 能	
网络层	路由	
数据链路层	逻辑链路控制	错误控制
	媒体接入控制	多址接入协议
物理层	调制、前向纠错、均衡和同步等	
物理媒介	无线传播机制	

由表 1-1 可见，“调制和编码”是物理层需要完成的基本任务，它将高层来的信息转换成可以在物理媒介上发送的信号形式。

## 1.2 调制和编码的性能参数

通过研究调制/编码策略的性能参数,可以评价其效率。其性能参数通常可用“功率利用率(power efficiency)”和“带宽利用率(bandwidth efficiency)”来度量。

“功率利用率”也称为“能量利用率”,它描述调制/编码技术对低功率数字信息的保真能力。功率利用率 $\eta_p$ 通常定义为:在保证一定错误概率(如 $10^{-6}$ )的前提下,接收端所要求的每比特信号能量 $E_b$ 与噪声功率谱密度 $N_0$ 之比,即

$$\eta_p = E_b/N_0 \quad (1-1)$$

在数字通信系统中,为了增加抗噪声性能,就需要增大信号功率;但是这样一来,低功率数字信息的保真度就会有所下降。因此,应该兼顾考虑功率利用率和保真度二者之间的性能。

“带宽利用率”描述的则是调制/编码策略在有限带宽内提供数据的能力。一般而言,增加数据率就意味着减小数字码元的脉冲宽度,即增加信号的带宽。因此,数据率和带宽占有之间存在着一种矛盾关系。由此可见,带宽利用率给出的是如何有效利用所分配带宽的一种测度,其定义为:在一给定的频谱带宽(1Hz)内的数据通过率。若 $R$ 为数据率(也称为比特率,单位:bit/s), $B$ 是被调制信号所占据的带宽,则带宽利用率 $\eta_B$ 定义为

$$\eta_B = \frac{R}{B} \text{ (bit/s} \cdot \text{Hz}^{-1}\text{)} \quad (1-2)$$

由于具有较大 $\eta_B$ 的调制/编码策略能在给定的频谱资源内发射更多的数据,所以任何数字移动通信系统的系统容量均与所采用的调制/编码策略直接有关。

任何调制/编码策略可实现的“带宽利用率”存在一上限。根据Shannon信道编码定理可知,对于任意小的错误概率,最大可能的带宽利用率 $\eta_{Bmax}$ 受到噪声的限制,其可用信道容量 $C$ (单位:bit/s)表示为

$$\eta_{Bmax} = \frac{C}{B} = \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-3)$$

式中, $S/N$ 为信号噪声功率比。

理论上,只要比特速率 $R \leq C$ ,通过采用足够复杂的编码方式,该信道就能以任意小的差错概率,进行速率为 $R$ 的信息传输;若 $R > C$ ,则不可能存在某种编码方式使传输差错概率任意小。Shannon证明, $S$ ,  $N$ 和 $B$ 限制了传输速率,而不是差错概率,它给出了实际系统可能达到的性能极限。

## 1.3 调制和编码的权衡

上节所述的式(1-3)给出了理想信道中功率—带宽的权衡,但它不是纯粹的权衡,因为检测的噪声功率与带宽成正比,即

$$N = N_0 \cdot B \quad (1-4)$$

将式(1-4)代入式(1-3)中,得

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N_0 \cdot B} \right) \quad (1-5)$$

假定比特速率等于信道容量，即  $R=C$ ，且  $C=1/T_b$ ， $S=E_b/T_b=E_b \cdot C$ ，则

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left( 1 + \frac{E_b \cdot C}{N_0 \cdot B} \right) = \log_2 \left( 1 + \frac{E_b}{N_0} \cdot \left( \frac{C}{B} \right) \right) \quad (1-6)$$

$$2^{C/B} = 1 + \frac{E_b}{N_0} \cdot \left( \frac{C}{B} \right) \quad (1-7)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{C/B} - 1}{C/B} = \frac{2^{\eta_B} - 1}{\eta_B} \quad (1-8)$$

极限情况下，即当  $C/B \rightarrow 0$  时，有

$$\lim_{\eta_B \rightarrow 0} \frac{E_b}{N_0} = \lim_{\eta_B \rightarrow 0} \frac{2^{\eta_B} - 1}{\eta_B} = \ln 2 = 0.693 \quad (1-9)$$

或以分贝 (dB) 为单位表示为

$$\lim_{\eta_B \rightarrow 0} \frac{E_b}{N_0} = -1.6 \text{ dB}$$

该  $E_b/N_0$  称为“Shannon 极限”。此极限是任何通信系统所需  $E_b/N_0$  的绝对极限值，即当系统中的  $E_b/N_0$  低于  $-1.6 \text{ dB}$  时，可靠有效的通信将是不可能的。Shannon 极限在实际中是不可能达到的，但是 Shannon 公式在理论上证明了存在可以提高差错性能或降低所需  $E_b/N_0$  的编码方式，从无编码的二进制调制到性能接近极限的调制编码方式。

应用式 (1-8) 可以画出带宽利用率  $\eta_B$  和功率利用率  $E_b/N_0$  关系曲线，如图 1-4 所示。由图可以看到功率—带宽权衡的真实情况。当带宽效率越高，则需要更大的  $E_b/N_0$ ；因此，当一个系统被指定带宽时，通过增大信号功率来提升系统的容量是可能的。最优系统设计就是在各种限制和相互矛盾的目标中寻找适当的折中权衡。由于期望降低发送功率以及节约无线频谱，所以调制和编码权衡，即选择调制和编码方式以最大限度的利用传输功率和信道带宽是十分重要的。

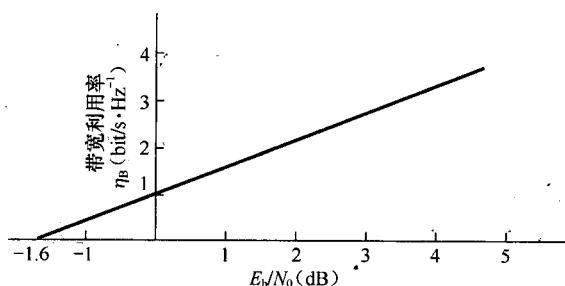


图 1-4  $\eta_B$  和  $E_b/N_0$  关系曲线

### 1.4 先进调制和编码策略的优势

在无线系统中，采用更先进形式的调制和编码策略，可获取如下系统优势。

- ① 增加容量（具有更高的数据传输速率或容纳更多用户）。
- ② 带宽效率增加（在无线移动系统中具有更低的频谱价格成本）。

- ③ 功率需求降低。
  - 可降低发射机功率；
  - 可降低所需的天线增益（比如，卫星系统中更小的截抛物面反射器尺寸）；
  - 容忍更高的路径损耗。
- ④ 增加对同频干扰的容忍度。
  - 在蜂窝系统中可降低频率再用距离，即总容量增加；
  - 在 CDMA 系统中可更有效地克服小区内干扰。
- ⑤ 增加对多径效应的克服。

本书的主要内容是讨论在无线系统中所采用的各种调制和编码策略。粗略来说，本书分为三大部分：第一部分主要讨论在无线系统中的调制策略，第二部分主要讨论在无线系统中的编码策略，最后将调制和编码合二为一，讨论了在无线系统中的调制/编码策略。本书的具体内容安排如下：

第1章总体阐述了在无线系统中采用调制和编码策略的作用、衡量调制和编码策略优劣的性能参数、调制和编码的权衡以及采用先进调制和编码策略带来的系统优势等。

第2章首先重点描述了目前在第二代移动通信系统中所采用的数字调制方案——数字频率调制（比如，MSK, CPFSK 及 GMSK 等）和数字相位调制（比如，QPSK, OQPSK 和  $\pi/4$ -DQPSK 等）；然后又对目前非常有应用前景的正交振幅调制（QAM）进行了描述；最后简单介绍了在下一代蜂窝移动通信系统中有望采用的正交频分复用（OFDM）技术。

第3章介绍宽带扩频调制技术，在介绍各种扩频方式的基础上，重点介绍应用于窄带 CDMA 系统的直接序列扩频调制和应用于 GSM 系统的跳频调制技术。还介绍了在直扩系统中所采用的各种伪码序列以及伪码同步等重要内容。

第4章首先介绍信道编码（差错控制编码）的基本思路及基本概念；然后介绍几种简单的线性分组码的构造及特征（比如，汉明码、循环码、BCH 码和 RS 码等）。

第5章介绍在第二代移动通信系统中所广泛采用的差错控制编码方案——卷积码。内容包括卷积码的编码原理、卷积码的编码表示、译码、性能以及在无线通信中的应用，同时也给出了卷积码好码的方案和相关的重点概念。在卷积码的生成部分介绍了生成多项式、生成矩阵、离散卷积的方式；卷积码的表示包括状态转移图、格图以及树图等；译码重点介绍了基于极大似然准则的 viterbi 译码，给出了详细的译码步骤，并附基于 matlab 语言（2, 1, 2）结构的译码程序，同时还分析了序列译码算法。

第6章介绍了 Turbo 码。Turbo 码具有良好的性能，和仙农（Shannon）极限相差几乎只有 0.7dB，广泛用于卫星通信、深空通信以及无线通信等领域，是过去几十年间编码发展的一个重要的里程碑。本章主要介绍 Turbo 码的编码原理、迭代译码原理。分析了 MAP 算法、log-MAP 算法、MAX-log-MAP 算法以及 SOVA（软输出的 viterbi 算法）。给出了一个输入为 4 比特，基于 log-MAP 算法的 PCCC 结构的迭代译码的例子，从该例中可以看出迭代的原理和作用。本章最后给出了 Turbo 码在 CDMA2000 和 WCDMA 中的应用。

第7章内容主要是调制和编码相结合的网络调制编码（TCM）。内容包括 TCM 基本原理、基本思想以及译码等；介绍了集合分割、并行转移等重要概念。同时分析了一个基于 ITU V. 32 协议的调制解调器使用的 TCM 方案，并给出编码和译码的流程。

## 思考题及习题

1. 简述调制和编码的作用？
2. 调制和编码位于 OSI 模型的第几层？主要完成什么任务？
3. 描述研究调制/编码策略的性能参数？
4. “Shannon 极限”的物理含义？任何通信系统所需  $E_b/N_0$  的绝对极限值是多少？
5. 使用先进调制和编码的益处有哪些？

## 第 2 章 无线系统中的调制技术

### 2.1 概 述

自由振荡是一种常见的自然现象，电的振荡以电磁波的方式在空间传播。为了利用电磁波传输信息，需要将自由振荡的电磁波（称为载波）加以调制，即用基带信号（有待传输信息的信号）对载波进行调制；一般来说，基带信号含有直流分量和频率较低的频率分量，往往不能作为传输信号在信道中直接传输，因此，必须把基带信号转变为一个相对基带频率而言频率非常高的带通信号（称为已调信号）以适合于信道传输。调制可通过改变高频载波的幅值、相位或频率，使其随着基带信号的变化而变化来实现。与调制相反，解调就是从已调信号中抽取基带信号的过程，其目的是使基带信号可以被约定的接收者（信宿）进行处理和解释。由此可见，调制过程用于通信系统的发端，其目的就是把要传输的基带信号变换成适合信道传输的高频信号，称为已调信号；而在接收端需要将已调信号还原成要传输的基带信号，该过程称为解调。

按照调制器输入信号（基带信号，也称为调制信号）的形式，调制可分为模拟调制（或连续调制）和数字调制。模拟调制是利用输入的模拟信号直接调制载波的振幅、频率或相位，从而得到调幅（AM）、调频（FM）或调相（PM）信号。数字调制是利用数字信号来控制载波的振幅、频率或相位，从而得到振幅键控（ASK）、频移键控（FSK）和相移键控（PSK）信号。与模拟调制相比，数字调制有许多优点，主要包括：抗噪声能力强、对信道扰动的鲁棒性高、容易传输不同形式的信息（如声音、数据和图像）、安全性好等。因此，许多无线通信系统，尤其是移动通信系统都使用数字调制技术。

由上述可知，一个通信系统的质量在很大程度上依赖于所采用的调制方式。调制是为了使信号特征与信道特性相匹配，因此，调制方式的选择是由系统中的信道特性来决定的。显然不同类型的信道特性，将相应存在着不同类型的调制方式。本章主要讨论在无线移动通信系统中所采用的调制方式。因此，首先讨论无线移动环境下所需信号的特征。

无线移动通信信道的基本特征是：第一，带宽有限，它取决于可使用的频率资源和信道的传播特性；实际上在大多数通信系统中，可利用的信道带宽都是有限的。因此，通信系统的设计者在选择用于发射信息所采用的调制方式时，必须考虑信道带宽有限所造成影响和限制。换句话说，确定数字调制信号的功率谱密度就显得十分重要。第二，移动通信工作在电磁环境

下，因此，所受到干扰和噪声的影响大。第三，移动信道是典型的随参信道，存在多径衰落。

针对移动通信信道的以上特点，已调信号应具有高的频谱利用率、抗噪声和抗干扰能力强、易于采用相干或非相干方式解调、以及适宜于在衰落信道中传输等特点。高的频谱利用率要求已调信号所占的带宽窄，即已调信号频谱主瓣要窄，同时副瓣的幅度要低（即辐射到相邻频道的功率要小）。高的抗干扰和抗多径衰落性能，要求在恶劣的移动信道环境下能很好地工作，经过调制解调后的输出信噪比（S/N）较大或误码率较低。

下面简单介绍一下调制技术的发展。由于  $\omega = d\theta(t)/dt$ ，因此一个已调波的频谱特性与其相位路径有着密切的关系。所谓相位路径，是指载波相位  $\theta(t)$  随时间变化的轨迹。不同的调制方式，具有不同的相位路径。采用 FSK 或 PSK 传递信息时，由于频率和相位之间互为微分与积分的关系，从本质上来说，FSK 也可以看成是 PSK。因此，这类调制方式都可以认为是由载波相位的变化值来传递信息。即随着输入数据的不断变化，载波相位的变化值也在不断变化。换句话说，载波相位的变化值是一个随时间而变化的函数。

回顾调制技术的历史发展过程，为了控制已调波的频谱特性以获得较好的性能，就必须控制它的相位路径。20 世纪 50 年代末出现了二相相移键控（BPSK）调制，后来为了提高信道频带利用率，在它的基础上提出了四相相移键控（QPSK）调制。它们产生的已调波，在码元转换时刻都可能产生  $180^\circ$  的相位突跳，使得频谱高频滚降缓慢，带外辐射大。为了消除  $180^\circ$  的相位突跳，改善频谱特性，到 20 世纪 60 年代末又在 QPSK 的基础上提出了交错四相相移键控（OQPSK）。它虽然克服了  $180^\circ$  相位突跳的问题，但是在码元转换时刻仍可能有  $90^\circ$  的相位突跳，同样使得频谱高频不能很快的滚降。为了彻底解决相位突跳的问题，人们自然会想到相邻码元之间的相位变化不应该瞬时的突变，而应该在一个码元时间内逐渐累积来完成，从而保持码元在转换时刻相位连续。这就是在 20 世纪 70 年代初提出的最小频移键控（MSK），其相位累积规律是直线形变化。由于其相位累积仅仅局限于一个码元内进行，其大大限制了选择不同相位路径的可能性；因此，想到把相位路径的研究扩展到几个码元内进行，1977 年提出了受控调频（TFM）。通过采用高斯滤波器来代替 TFM 中的相关编码器，在 1979 年提出了调制前高斯滤波的最小频移键控（GMSK）。为了进行简单的比较，表 2-1 列出了几种在无线通信系统中使用的调制技术的相位路径特点。

表 2-1 各种典型调制方式相位路径比较

名称	相位路径特点	提出时间
BPSK	$0, \pi$ (突跳)	20 世纪 50 年代末
QPSK	$0, \pm\pi/2, \pi$ (突跳)	20 世纪 60 年代末
OQPSK	$0, \pm\pi/2$ (突跳)	20 世纪 70 年代初
MSK	直线 (连续)	20 世纪 70 年代初
GMSK	非线性 (连续)	1979 年
$\pi/4$ -DQPSK	$\pm\pi/4, \pm3\pi/4$	20 世纪 80 年代初

目前，在实际移动通信系统中，有两类用得最多的数字调制方式：线性调制技术和恒定包络（连续相位）调制技术。线性调制技术中所谓的“线性”，是指这类调制技术要求通信设备从频率变换、放大直到发射的整个过程中保持充分的线性。显然，这种要求在制造移动

设备时会增加难度和成本,但这类调制技术可获得较高的频谱利用率。此类调制技术主要包括 PSK, QPSK, DQPSK, O-QPSK,  $\pi/4$ -DQPSK 和多电平 PSK 等。在许多系统(如在移动无线手机)中使用的高功率放大器,通常工作于高度的非线性状态。而这些非线性器件具有“幅相转换(AM/PM)”效应,即当输入信号幅度变化时,能转换为输出信号的相位变化,造成频谱扩散现象。因此,已调信号应包络恒定或包络起伏很小,以减小 AM/PM 效应。恒定包络(连续相位)调制技术是泛指那些载波相位以连续形式变化(已调信号包络恒定)的一大类频率调制技术。此类调制技术的优点是已调信号具有相对窄的功率谱且对放大设备没有线性要求;不足之处是其频谱利用率通常低于线性调制技术。恒定包络调制技术主要包括 MSK, GMSK, GFSK 和 TFM 等。

提高频谱利用率是提高通信容量的重要措施,是人们规划和设计通信系统的焦点。在 20 世纪 80 年代初期,当时人们选择数字调制技术时,大多把注意力集中于恒定包络数字调制(如泛欧 GSM 蜂窝系统采用的 GMSK)技术上。但是在 20 世纪 80 年代中期以后,人们却着重采用 QPSK 之类的线性数字调制技术(如美国的 IS-54 蜂窝系统和日本的 PDC 蜂窝系统均采用  $\pi/4$ -DQPSK,美国的 IS-95 蜂窝系统在上、下行链路中分别采用 O-QPSK 和 QPSK)。

另一种获得迅速发展的数字调制技术是“幅度和相位联合调制(QAM)”技术。目前,4 电平、16 电平、64 电平以至 256 电平的 QAM 都已在微波通信中获得成功应用。以往,人们认为多电平 QAM 信号的特征不适于在移动环境中进行传输。近几年,随着研究工作的深入,人们提出不少改进方案。例如,根据移动信道特征的好坏可自适应地改变 QAM 的电平数,即改变信道传输速率,从而构成变速率 QAM (VR-QAM) 调制技术;为减少码间干扰和时延扩展的影响,把将要传输的数据流划分为若干个子数据流,每个子数据流具有低得多的传输速率,并且用这些子数据流去调制若干个载波,从而形成多载波 QAM (MC-QAM) 调制技术或正交频分复用 (OFDM) 调制等。可以预期,在移动信道中使用多电平 QAM 调制和多载波技术将成为主要的调制技术。

综上所述,本章主要研究在无线移动系统中所采用的上述各种调制技术,如 GMSK,  $\pi/4$ -DQPSK 及 QAM 等。研究的主要内容包括:各种调制方案的原理及实现方法、已调信号的功率谱特性、解调的原理及实现方法、解调后的信噪比或误码率性能等。

## 2.2 数字频率调制

研究发现,如果已调信号相位连续变化(包络恒定),则抑制带外干扰的性能将更好。目前,已经研究设计了许多种恒定包络连续相位调制方法,主要是对频移键控(FSK)信号的改进,例如,最小频移键控(MSK)、高斯滤波的最小频移键控(GMSK)、受控调频(TFM)等。恒定包络(连续相位)调制技术是泛指那些载波相位以连续形式变化(已调信号包络恒定)的一大类频率调制技术。在泛欧数字蜂窝移动通信系统 GSM 中,GMSK 调制方式得到了应用。

### 2.2.1 二进制频移键控(BFSK)

在二进制频移键控(BFSK)中,载波频率随两个可能的信息状态(与二进制数 1 和 0



对应) 而变化, 1 对应于载波频率  $f_1$ , 0 对应于载波频率  $f_2$ 。二进制频移键控已调信号的时域表达式为

$$S_{2\text{FSK}}(t) = \sum_n b_n g(t - nT_s) \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_n \bar{b}_n g(t - nT_s) \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (2-1)$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1, \omega_2 = 2\pi f_2, \bar{b}_n \text{ 是 } b_n \text{ 的反码。}$$

这里,  $g(t)$  为宽度  $T_b$  的矩形脉冲,

$$b_n = \begin{cases} 0, & \text{概率为 } P \\ 1, & \text{概率为 } 1 - P \end{cases} \quad (2-2)$$

设输入到调制器的比特流为  $\{a_n\}$ ,  $a_n = \pm 1$ ,  $n = -\infty \sim +\infty$ , 即  $b_n = \begin{cases} 1, & a_n = +1 \\ 0, & a_n = -1 \end{cases}$ ;

则 FSK 已调信号在第  $n$  个比特区间的时域表达式为

$$S_{2\text{FSK}}(t) = \begin{cases} S_1(t) = \cos(\omega_1 t + \varphi_1), & a_n = +1 \\ S_2(t) = \cos(\omega_2 t + \varphi_2), & a_n = -1 \end{cases} \quad (2-3)$$

即当输入为传号“+1”时, 输出频率为  $f_1$  的正弦波; 当输入为空号“-1”时, 输出频率为  $f_2$  的正弦波。

二进制频移键控信号的“调制指数”定义为

$$h = (f_1 - f_2) \cdot T_b \quad (2-4)$$

由式 (2-1) 可知, 二进制频移键控已调信号可以看成是两个不同载频的振幅键控 (ASK) 已调信号之和, 因此  $S_{2\text{FSK}}(t)$  的频带宽度为两倍基带信号带宽与两载频之差之和, 即

$$B_{2\text{FSK}} = 2f_s + |f_1 - f_2| \quad (2-5)$$

式中,  $f_s$  是基带信号的带宽。

产生频移键控信号的最简单的方法是根据数据比特 0 或 1, 在两个独立的振荡器之间作通断切换, 如图 2-1 所示。通常, 这种方式产生的频移键控信号在开关转换时刻, 已调信号波形是非连续的, 因此常称为“非连续二进制频移键控”。由于这种频移键控信号相位的非连续性会带来一些问题, 例如, 频谱扩展和伪发射等, 所以在实际的无线通信系统中很少采用。

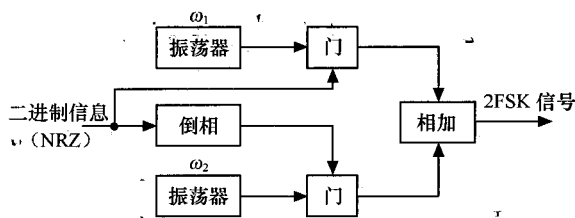


图 2-1 2FSK 调制器

另外, 对于 2FSK 信号而言, 当其相关系数  $\rho$  为 0 时,  $S_1(t)$  和  $S_2(t)$  互为正交信号 (其二者的相关系数为 0), 此时信号形式最佳。其中相关系数定义为

$$\rho = \frac{\int_0^{T_b} S_1(t) \cdot S_2(t) dt}{\sqrt{E_1 \cdot E_2}} \quad (2-6)$$