

21

世纪

信息与通信技术教程

# 高效数字调制 技术及其应用

■ 刘聪锋 编著



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪信息与通信技术教程

# 高效数字调制技术及其应用

刘聪锋 编著

人民邮电出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高效数字调制技术及其应用/刘聪锋编著. —北京: 人民邮电出版社, 2006. 10  
(21 世纪信息与通信技术教程)

ISBN 7-115-14965-8

I. 高... II. 刘... III. 数字调制—教材 IV. TN761.93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 073247 号

## 内 容 提 要

本书系统地阐述了现代高效数字调制技术的基本原理、实现方法和有关技术的最新研究成果, 较充分地反映了当前高效数字调制技术的最新研究状况。

全书共分 7 章, 内容包括: 绪论、恒包络不连续相位调制、恒包络连续相位调制、准恒包络调制、具有较大包络波动的高效宽带调制、具有大包络波动的严带限制制、正交频分复用 (OFDM) 技术。

本书可以作为高等院校通信专业及相关专业的高年级本科生和研究生的学习教材, 也可供高等院校、科研院所、通信公司等有关部门的科研人员和工程技术人员作为自学或研究的参考书。

### 21 世纪信息与通信技术教程 高效数字调制技术及其应用

- 
- ◆ 编 著 刘聪锋  
责任编辑 王晓明
  - ◆ 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>  
人民邮电出版社河北印刷厂印刷  
新华书店总店北京发行所经销
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 17.25  
字数: 418 千字  
印数: 1-3 000 册
  - 2006 年 10 月第 1 版  
2006 年 10 月河北第 1 次印刷

---

ISBN 7-115-14965-8/TN · 2804

定价: 37.00 元

读者服务热线: (010) 67129258 印装质量热线: (010) 67129223

## 前 言

现代社会已经步入信息时代,在各种信息技术中,信息的传输(即通信)起着支撑作用,因此,现代通信技术是一门复杂的高新技术。随着计算机技术、电子技术和半导体集成电路技术的飞速发展,使得当前通信领域的发展也变得更加迅速;随着我国改革开放和社会主义市场经济的发展,全社会对通信的需求越来越大。现在的通信设备种类繁多,应用领域广泛,从人们所熟悉的固定电话、移动电话,到专用通信网、卫星通信系统、军用通信指挥控制系统、导弹或航天器的测控系统等,可以说,现代社会的各个领域无不应用着各种各样的通信手段。

现在的各种公用和专用通信系统都在追求具有更大的通信容量、更远的通信距离以及更高的功率效率,尤其是目前广泛应用的移动通信、卫星通信以及航天器的测量、跟踪与控制等系统中,这方面的需求和要求更加紧迫。通信系统的容量与系统所占的频带和可利用频段有着直接的关系,而可利用频段是不可再生的,并且是具有一定限制的资源,因此,就必须寻求具有更高频谱利用率的调制技术,来提高系统的容量。为了延长通信距离,一个比较直接的方法就是增加发射功率,但是这样将使功率的利用率降低,而且对电磁环境也会造成更大的污染。所以寻求更高的频谱利用率和功率利用率,是通信领域科研和技术人员永恒的追求目标。而能够实现此目标的高效数字调制技术就自然一直是人们研究的重点。

本书系统地阐述了现代高效数字调制技术的基本原理、实现方法以及有关该技术的最新研究成果,比较充分地反映了当前高效数字调制技术的最新研究状况。全书共分7章,主要内容如下。

第1章为绪论,简单介绍了通信技术的发展简史、现状及趋势,详细阐述了调制技术在通信系统中的作用,以及高效数字调制技术的研究背景,主要的研究方向和研究内容。

第2章为恒包络不连续相位调制,主要讨论四相相移键控(QPSK)调制技术以及它的有关派生调制技术(OQPSK、DQPSK、 $\pi/4$ -DQPSK),并重点讨论了理想接收机和非理想接收机的特性。

第3章为恒包络连续相位调制,本章的内容分两个部分:第一部分主要讨论了全响应连续相位调制技术MSK、SFSK以及预编码MSK,详细分析了调制信号在各种形式下的表达式、功率谱密度以及相关检测和差分相关检测的接收机,最后讨论了同步技术;第二部分主要讨论部分响应连续相位调制技术GMSK,详细分析了调制信号在各种形式下的表达式、功率谱密度以及相关接收机及其性能,讨论了数据不平衡存在时的频谱特性,最后讨论了同步技术,并给出了计算机仿真模拟性能。

第4章为准恒包络调制,本章的内容分成三个部分:第一部分详细讨论了IIF-QPSK、SQOQR、FQPSK、增强型FQPSK调制技术,讨论了它们之间的关系,介绍了FQPSK的逐符号互相关映射,以及FQPSK的描述——格型编码调制;第二部分详细讨论了最佳检测器和次最佳检测器以及它们的性能;第三部分详细地讨论了互相关格型编码正交调制技术和

有形偏移 QPSK 调制技术。

第 5 章为具有较大包络波动的高效宽带调制,本章的内容分为三个部分:第一部分详细讨论了具有指定解码延迟的等信号能量 TCM 调制;第二部分详细讨论了具有指定解码延迟的不相等信号能量 TCM 调制;第三部分对恒包络调制技术的性能进行了比较。

第 6 章为具有大包络波动的严带限制调制,本章的内容分为四个部分:第一部分主要讨论了二进制奈奎斯特发信号,以及多电平和正交奈奎斯特发信号;第二部分详细讨论了全响应正交幅度调制,其中包括正交幅度调制的原理,16QAM 和 16SQAM;第三部分详细讨论了部分响应正交幅度调制(QPR),其中讨论了调制的基本原理、QPR 调制器和解调器;第四部分简单介绍了可变速率 QAM。

第 7 章为正交频分复用(OFDM)技术,本章的内容分为六个部分:第一部分主要讨论了 OFDM 系统的基本原理;第二部分详细讨论了 OFDM 的调制与解调技术;第三部分详细讨论了 OFDM 的同步技术;第四部分详细讨论了 OFDM 的信道编码技术;第五部分详细讨论了 OFDM 的峰值平均功率比问题;第六部分详细讨论了 OFDM 的自适应处理技术。

在本书的编写过程中,得到了西安电子科技大学电子工程学院副院长廖桂生教授的支持和帮助,同时也得到了西安电子科技大学电子对抗研究所所长赵国庆教授以及杨绍全教授和解放军电子工程学院陈鹏举教授的帮助和指导,在此一并对他们表示深深的谢意。也感谢西安电子科技大学电子对抗研究所的全体老师在工作上给予的帮助。

在此对我的夫人杨洁表示深深的感谢,这本书的完成得到了她的大力支持和帮助,她对本书的编写思路提供了有益的建议、对资料整理付出了辛勤的劳动;感谢我的好友张斌博士和曲毅博士在本书的内容编写、问题讨论以及校审过程中提供的许多宝贵的建议和极大的帮助;杨波和樊健老师在本书的成稿过程中也做了大量工作,在此对他们表示深深的谢意。

人民邮电出版社的编辑和各相关部门对本书的出版提供了很大的帮助和指导,在此也深表谢意。

本书可以作为高等院校通信专业及相关专业的高年级本科生和研究生的学习教材,也可供高等院校、科研院所、电信运营商和设备制造企业等有关单位的科研人员和工程技术人员作为自学或研究的参考书。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬希读者批评指正。

编 者

2006.4

# 目 录

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                                 | 1  |
| 1.1 通信发展简史                               | 1  |
| 1.2 通信技术的发展现状与趋势                         | 2  |
| 1.2.1 光纤通信                               | 2  |
| 1.2.2 卫星通信                               | 2  |
| 1.2.3 移动通信                               | 3  |
| 1.2.4 微波中继通信                             | 3  |
| 1.3 通信频段的划分                              | 4  |
| 1.4 调制在通信系统中的作用                          | 5  |
| 1.5 调制技术的发展                              | 6  |
| 第 2 章 恒包络不连续相位调制                         | 9  |
| 2.1 四相相移键控 (QPSK)                        | 9  |
| 2.2 偏移四相相移键控 (OQPSK)                     | 11 |
| 2.3 差分编码四相相移键控 (DQPSK)                   | 13 |
| 2.4 $\pi/4$ 差分编码四相相移键控 ( $\pi/4$ -DQPSK) | 16 |
| 2.5 功率谱密度                                | 19 |
| 2.6 理想接收机的特性                             | 21 |
| 2.7 非理想发射机情况下的性能                         | 22 |
| 2.7.1 调制器不平衡模型                           | 22 |
| 2.7.2 对载波跟踪环路稳态锁定点的影响                    | 24 |
| 2.7.3 对平均 BEP (误比特概率) 的影响                | 24 |
| 2.7.4 数据不平衡                              | 30 |
| 2.8 QPSK 系统的载波同步                         | 30 |
| 2.8.1 四次方环                               | 30 |
| 2.8.2 科斯塔斯 (COSTAS) 环                    | 31 |
| 2.8.3 逆调制环                               | 32 |
| 2.8.4 判决反馈环                              | 34 |
| 第 3 章 恒包络连续相位调制                          | 38 |
| 3.1 连续相位调制                               | 38 |
| 3.2 全响应调制技术——MSK 和 SFSK                  | 38 |
| 3.2.1 连续相位频率调制的表达式                       | 39 |
| 3.2.2 MSK 信号的等价 I-Q 表达式                  | 41 |
| 3.2.3 预编码 MSK                            | 46 |

|       |                                  |     |
|-------|----------------------------------|-----|
| 3.2.4 | 频谱特性                             | 47  |
| 3.2.5 | 其他发射机的描述                         | 49  |
| 3.2.6 | 基于相关检测的接收机                       | 51  |
| 3.2.7 | 基于差分相关检测的接收机                     | 55  |
| 3.2.8 | 同步技术                             | 55  |
| 3.3   | 部分响应调制技术——GMSK                   | 60  |
| 3.3.1 | 连续相位调制的表达式                       | 61  |
| 3.3.2 | 等价 I-Q 表达式                       | 62  |
| 3.3.3 | GMSK 的其他表达式——劳伦展开式               | 65  |
| 3.3.4 | 功率谱密度                            | 70  |
| 3.3.5 | 基于单脉冲流的 GMSK 近似 AMP 表达式          | 70  |
| 3.3.6 | 相关 GMSK 接收机及其性能                  | 72  |
| 3.3.7 | 数据不平衡存在时的频谱特性                    | 80  |
| 3.3.8 | 同步技术                             | 85  |
| 3.4   | 仿真模拟性能                           | 93  |
| 第 4 章 | 准恒包络调制                           | 100 |
| 4.1   | IJF-QPSK 和 SQOCR 以及它们与 FQPSK 的关系 | 102 |
| 4.2   | FQPSK 的逐符号互相关映射                  | 109 |
| 4.3   | 增强型 FQPSK                        | 112 |
| 4.4   | FQPSK 的描述——格型编码调制                | 114 |
| 4.5   | 最佳检测器                            | 118 |
| 4.6   | 次最佳检测器                           | 120 |
| 4.6.1 | 逐符号检测器                           | 120 |
| 4.6.2 | 平均比特错误概率性能                       | 124 |
| 4.6.3 | 接收机的进一步简化以及 FQPSK-B 的性能          | 125 |
| 4.7   | 互相关格型编码正交调制                      | 129 |
| 4.7.1 | 发射机的描述                           | 130 |
| 4.7.2 | 特殊的具体化                           | 133 |
| 4.8   | 其他技术——有形偏移 QPSK                  | 136 |
| 第 5 章 | 具有较大包络波动的高效宽带调制                  | 143 |
| 5.1   | 具有指定解码延迟的高效宽带 TCM——等信号能量         | 144 |
| 5.1.1 | 基于 ISI 的发射机实现                    | 144 |
| 5.1.2 | 功率谱密度的估计                         | 147 |
| 5.1.3 | 带宽效率的优化                          | 152 |
| 5.2   | 具有指定解码延迟的高效宽带 TCM——不相等信号能量       | 157 |
| 5.3   | 恒包络调制技术的性能比较                     | 161 |
| 第 6 章 | 具有大包络波动的严带限制制                    | 165 |
| 6.1   | 奈奎斯特信号                           | 165 |
| 6.1.1 | 二进制奈奎斯特信号                        | 165 |



|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 6.1.2 多电平和正交奈奎斯特发信号 .....            | 167        |
| 6.2 全响应正交幅度调制 .....                  | 168        |
| 6.2.1 正交幅度调制的原理 .....                | 168        |
| 6.2.2 16 进制星形 QAM .....              | 173        |
| 6.2.3 叠加式 QAM (SQAM) .....           | 175        |
| 6.3 部分响应正交幅度调制 .....                 | 180        |
| 6.3.1 基本原理 .....                     | 180        |
| 6.3.2 QPR 调制器 .....                  | 181        |
| 6.3.3 QPR 解调器 .....                  | 183        |
| 6.4 变速率 QAM .....                    | 185        |
| 6.4.1 可变速率 QAM 的信号结构 .....           | 186        |
| 6.4.2 可变速率 QAM 的数据帧结构 .....          | 186        |
| 6.4.3 可变速率调制的实现 .....                | 188        |
| <b>第 7 章 正交频分复用 (OFDM) 技术 .....</b>  | <b>191</b> |
| 7.1 OFDM 系统的基本原理 .....               | 191        |
| 7.1.1 串并变换 .....                     | 192        |
| 7.1.2 子载波调制 .....                    | 193        |
| 7.1.3 DFT 的实现 .....                  | 195        |
| 7.1.4 保护间隔、循环前缀和子载波数的选择 .....        | 196        |
| 7.1.5 加窗技术 .....                     | 200        |
| 7.1.6 OFDM 基本参数的选择 .....             | 203        |
| 7.2 OFDM 的调制与解调技术 .....              | 205        |
| 7.2.1 非差分调制与相干检测 .....               | 205        |
| 7.2.2 差分调制与差分检测 .....                | 206        |
| 7.2.3 信道估计 .....                     | 210        |
| 7.3 OFDM 的同步 .....                   | 212        |
| 7.3.1 OFDM 系统中的同步要求 .....            | 212        |
| 7.3.2 利用导频实现载波同步的方法 .....            | 213        |
| 7.3.3 最大似然方法联合实现符号定时同步和载波同步的方法 ..... | 216        |
| 7.4 OFDM 的信道编码技术 .....               | 220        |
| 7.4.1 差错控制编码的基本原理 .....              | 221        |
| 7.4.2 OFDM 系统中的分组编码 .....            | 223        |
| 7.4.3 OFDM 系统中的卷积码 .....             | 227        |
| 7.4.4 OFDM 系统中的交织编码 .....            | 229        |
| 7.4.5 OFDM 系统中的级联编码 .....            | 231        |
| 7.4.6 OFDM 系统中的网格编码调制 (TCM) .....    | 232        |
| 7.4.7 OFDM 系统中的 Turbo 码 .....        | 236        |
| 7.4.8 OFDM 系统中的空时编码 .....            | 238        |
| 7.5 OFDM 的峰值平均功率比 .....              | 243        |



|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7.5.1 峰值平均功率比的定义及其分布 .....   | 243 |
| 7.5.2 解决峰值平均功率比问题的方法 .....   | 244 |
| 7.6 OFDM 的自适应处理技术 .....      | 248 |
| 7.6.1 自适应策略的根据: 信道状态信息 ..... | 248 |
| 7.6.2 自适应功率分配 .....          | 250 |
| 7.6.3 自适应调制技术 .....          | 254 |
| 7.6.4 联合自适应比特、调制和功率分配 .....  | 258 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 通信发展简史

通信的历史可以追溯到从研究电、磁现象开始的 17 世纪初期。自从 19 世纪开创了电通信以来, 通信技术的发展非常迅速。19 世纪 40 年代是通信理论基础的准备阶段, 随后通信才进入实用阶段, 从 20 世纪 50 年代以后, 通信技术出现了突飞猛进的发展。在近两个世纪的时间内, 世界上通信技术发展的历史可以简单概括如下:

- 1838 年 莫尔斯发明了有线电报;
- 1864 年 马克斯韦尔提出了电磁辐射方程;
- 1876 年 贝尔发明了电话;
- 1896 年 马可尼发明了无线电报;
- 1906 年 发明了真空管;
- 1918 年 世界上第一台调幅无线电广播、超外差式接收机问世;
- 1925 年 开始采用三路明线载波电话、多路通信;
- 1936 年 调频无线电广播开播;
- 1937 年 发明了脉冲编码调制技术;
- 1938 年 电视广播开播;
- 1940~1945 年 第二次世界大战促进了雷达和微波通信系统的发展;
- 1948 年 发明了晶体管, 香农提出了信息论, 通信统计理论开始建立;
- 1949 年 时分多路通信应用于电话;
- 1956 年 铺设了越洋电缆;
- 1957 年 发射了第一颗人造卫星;
- 1958 年 发射了第一颗通信卫星;
- 1960 年 发明了激光;
- 1961 年 发明了集成电路;
- 1962 年 发射了第一颗地球同步通信卫星, 脉冲编码调制技术进入实用阶段;

1960~1970 年 彩色电视问世, 阿波罗宇宙飞船登月, 数字传输的理论和技術得到迅速发展, 出现了高速数字电子计算机;

1970~1980 年 大规模集成电路、商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信系统、微处理器等迅速发展;

1980 年以后 超大规模集成电路、长波长光纤通信系统广泛应用, 综合业务数字网

崛起。

从通信技术发展过程可以看出,通信技术是沿着从数字到模拟,又从模拟到数字的方向发展的。最早出现的电报是一种最简单的数字通信,但随着真空管的出现,模拟通信又得到了发展。此后,由于脉冲编码原理和信息论的提出,以及晶体管和集成电路的发明,使数字通信又进入了全盛时期。

## 1.2 通信技术的发展现状与趋势

数字化、大容量、远距离、高效率、多信源以及保密性、可靠性、智能化等已成为现代通信系统的主要特点。为了叙述方便,下面主要从光纤通信、卫星通信、移动通信、微波中继通信等几方面来介绍现代通信技术的现状及未来的发展趋势。

### 1.2.1 光纤通信

光纤通信系统是当前最常用的有线通信系统,被大量用在公共电信网和专用通信网中作为传输系统。光纤通信具有容量大,成本低、抗电磁干扰等优点,与同轴电缆相比可以大量节约有色金属和能源,因此,自从1977年世界上第一个光纤通信系统在美国芝加哥投入运行以来,光纤通信的发展极为迅速,新器件、新工艺、新技术不断涌现,性能日臻完善。世界上各国纷纷采用光纤通信,横跨大西洋、太平洋的海底光缆通信系统已经开通使用。由于长波长激光器和单模光纤的出现,使每芯光纤通话路数可高达百万路,中继距离将达到100km,市话中继光纤成本也连续大幅度下降。目前,我国光纤通信也已经得到了全面的普及应用,在全国长途网和所有的本地网中已全部采用了光纤通信系统。

光纤通信今后的主要发展方向是全光网络。

### 1.2.2 卫星通信

卫星通信是国内和国际间的主要通信手段之一,目前它正向着移动通信和直播电视等领域发展。

卫星通信的特点是通信距离远、覆盖面积广、不受地理条件限制,而且可以大容量传输,建设周期短、可靠性高等。自从1960年第一颗卫星成功发射以来,卫星通信得到迅速发展,目前,卫星通信的使用范围已经遍及全球,仅国际卫星通信组织就拥有数十万条话路的通信信道。卫星通信的广泛应用,使国际间重大活动能够及时得以实况转播,从而缩短了全世界人与人之间的“距离”。

我国自20世纪70年代起就有了自己发射的地球同步通信卫星,从1985年起开始提供国内卫星通信业务,并逐步开始用于国际通信业务,目前我国已经有多颗同步通信卫星,并与近200个国家和地区开通了国际卫星通信业务。我国幅员辽阔,在高山、沙漠、森林等众多的边远地区,卫星通信系统是最理想的通信手段之一。

卫星通信在早期大量使用的是模拟调制及频分多路技术和频分多址技术,后来发展到采用数字调制、时分多路和时分多址技术。目前,卫星通信正向更高频段发展,并采用了多波束卫星和星上处理等新技术。地面系统的主要发展趋势是小型化。这些发展都得益于调制/

解调、纠错编码/译码、数字信号处理、通信专用超大规模 IC 等多项新技术的使用。

### 1.2.3 移动通信

移动通信是无线通信的重要手段,也是现代通信中发展最为迅速的一种通信技术,它是随着汽车、飞机、轮船、火车等交通工具的发展而同步发展起来的。在过去的几十年里,移动通信技术获得了很大的进步,从传统的单基站大功率系统到蜂窝移动系统;从本地覆盖到全国覆盖,并实现了国内和国际漫游;从提供话音业务到提供包括低速数据的综合业务;从模拟移动通信系统到数字式移动通信系统等等。今后,随着第三代移动通信系统的商用和移动通信与因特网的结合,未来无线数据传输速率将高达 2Mbit/s,并可提供高速宽带数据业务。未来移动通信将为无处不在的因特网提供全方位的、无缝隙的移动接入,在此过程中,通过第三代移动通信技术和更多其他无线新技术的应用,可以实现广域的无线覆盖。移动通信技术令人目炫的快速发展,推动着移动信息时代的发展,实现有线和无线融为一体、固定和移动相互连通的全新通信网络。

### 1.2.4 微波中继通信

目前,微波中继通信系统在国内外仍是一种重要的通信手段,这种通信方式始于 20 世纪 60 年代,它与一般电缆通信系统相比具有易架设、建设周期短等优点。国外的微波通信在数字化、大容量、更高频段(接近毫米波)和无人管理方面都已经取得了很大的进展,实现了在 40MHz 带宽内传输  $4 \times 140\text{Mbit/s}$  的多路通信。我国国内已经建设了不少微波中继专用通信网,微波中继系统主要用来传输长途电话和电视节目,其调制主要采用单边带/调频/分频调制(SSB/FM/FDM)等方式。

目前,微波中继通信已经发展到数字微波通信系统阶段,并采用多电平调制技术来增大系统容量。目前采用的调制方式有 16QAM 和 64QAM,并已经出现了 256QAM、1024QAM 等超多电平调制方式。采用多电平调制,在 40MHz 的标准频道间隔内,可以传送 1920~7680 路 PCM 数字电话。

我国现有多条微波中继通信干线,其中 60%用于通信,40%用于广播电视节目传送。微波中继通信面临光纤通信的严峻挑战,但是它目前仍将是长途通信和专业(行业)通信的一种重要手段。

除了上面提到的 4 种通信技术以外,计算机通信网也正在迅速地发展。由于计算机与通信的结合,使得现代通信不仅要设计点对点的通信系统,而且要满足成千上万用户的种类繁多的信息终端的通信联络,即构成多点对多点之间的网络通信。以多媒体数据传输为主的计算机通信网将成为实现通信现代化的一种重要手段。通信网目前正向着智能化、宽带化、多媒体化方向发展,下一代网络(NGN)是其发展的目标。

通过以上对通信的现状和趋势的介绍,可以看出,通信将随着经济的发展和社会的进步,成为现代社会中人们相互联系的必不可少的重要工具。未来通信发展的趋势是宽带化、多媒体化以及智能化。人类通信的目标是任何人在任何地点(空间)和任何时间可以与在任何地方的人进行通信。

### 1.3 通信频段的划分

各种通信系统对所使用信道的频段都有一个选择性与合理性的分配问题，以便合理利用并尽量节省频谱资源，同时还要满足有效和可靠传输的要求。通信信道可以分为两大类：一类称为有线信道，另一类称为无线信道。

对于有线信道，重要的是选择不同的传输媒体和对宽带媒体信道的频率复用。一般应根据信道的业务要求以及有线信道（恒参）的性能特征（如损耗、延时与相移特性以及最低与最高截止频率等）来确定频段。对于无线信道，问题则比较复杂，要根据空间电磁波传播的特点，来选择和适当分配工作频段。

电磁波由发射到接收的途径大体分为 3 种：一是靠地面传播的，称为“地波”；二是靠空间两点间直线传播的，称为“空间波”；三是靠地球上空的电离层反射到地面的单跳或多跳方式传播的，称为“天波”。

无线通信均需要使收发天线的长度与波长  $\lambda$  匹配，天线尺寸为  $\lambda/4$ 。无线电频率  $f$  及其波长  $\lambda$  的关系为： $\lambda = \frac{C}{f} \approx \frac{3 \times 10^8 (\text{m/s})}{f}$ 。其中  $C$  为电波在自由空间中的传播速度，通常认为  $C=3 \times 10^8$  (m/s)， $\lambda$  的单位为米 (m)， $f$  的单位为赫兹 (Hz)。

根据通信设备工作频率的不同，通信通常可以分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等。由于全部无线通信均通过自由空间传播，为了合理地使用频段，并且使各地区、各种设备的通信不互相干扰，国际电信联盟 (ITU) 科学地分配了各种通信系统所适用的频段，如表 1-1 所示。

表 1-1 通信使用频段的划分及主要用途

| 频 段       | 符号  | 名称  | 波 长                        | 常用传输媒介        | 用 途                 |
|-----------|-----|-----|----------------------------|---------------|---------------------|
| 30~300Hz  | ELF | 特低频 | $10^4 \sim 10^3 \text{km}$ | 有线线对<br>长波无线电 | 海底通信<br>电报          |
| 0.3~3kHz  | VF  | 音频  | $10^3 \sim 10^2 \text{km}$ | 有线线对<br>长波无线电 | 数据终端<br>实线电话        |
| 3~30kHz   | VLF | 甚低频 | $10^2 \sim 10 \text{km}$   | 有线线对<br>长波无线电 | 导航，频率标准<br>电报电话     |
| 30~300kHz | LF  | 低频  | $10 \sim 1 \text{km}$      | 有线线对<br>长波无线电 | 导航<br>电力通信          |
| 0.3~3MHz  | MF  | 中频  | $10^3 \sim 10^2 \text{m}$  | 同轴电缆<br>中波无线电 | 广播，业余无线电通信，<br>移动通信 |
| 3~30MHz   | HF  | 高频  | $10^2 \sim 10 \text{m}$    | 同轴电缆<br>短波无线电 | 国际定点通信，<br>军用通信，广播  |
| 30~300MHz | VHF | 甚高频 | $10 \sim 1 \text{m}$       | 同轴电缆<br>米波无线电 | 电视，调频广播，<br>移动通信，导航 |
| 0.3~3GHz  | UHF | 超高频 | $10^2 \sim 10 \text{cm}$   | 波导<br>分米波无线电  | 电视，雷达，遥控遥测          |
| 3~30GHz   | SHF | 极高频 | $10 \sim 1 \text{cm}$      | 波导<br>厘米波无线电  | 卫星和空间通信，<br>微波接力，雷达 |

续表

| 频 段                  | 符号  | 名称            | 波 长                                         | 常用传输媒介       | 用 途               |
|----------------------|-----|---------------|---------------------------------------------|--------------|-------------------|
| 30~300GHz            | EHF | 特高频           | 10~1 mm                                     | 波导<br>毫米波无线电 | 射电天文, 雷达,<br>微波接力 |
| $10^5 \sim 10^7$ GHz |     | 紫外、可见光、<br>红外 | $3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-6}$ cm | 光纤<br>激光空间传播 | 光纤通信              |

## 1.4 调制在通信系统中的作用

从话音、音乐、图像等信息源直接转换得到的电流信号是频率很低的电信号, 其频谱特点是包括(或不包括)直流分量的低通频谱, 其最高频率和最低频率之比远大于1, 如话音信号的频率范围为300~3000Hz, 这种信号被称为基带信号。基带信号可以直接通过架空明线、电缆等有线信道进行传输, 但不可能在无线信道直接传输。另外, 即使基带信号可以在有线信道传输, 但一对线路上只能传输一路信号, 这对信道的利用是很不经济的。为了使基带信号能够在像无线信道那样的频带信道上传输, 同时也为了使有线信道上同时传输多路基带信号, 就需要采用调制和解调的技术。

调制的目的是把要传输的模拟信号或数字信号变换成适合信道传输的信号, 该信号被称为已调信号, 要传输的原始信号被称为调制信号, 调制的过程用于通信系统的发端。在接收端需将已调信号还原成要传输的原始信号, 该过程被称为解调。因此, 在发送端把基带信号频谱搬移到给定信道通带内的过程被称为调制, 而在接收端把已搬到给定信道通带内的频谱还原为基带信号频谱的过程被称为解调。调制和解调在一个通信系统中总是同时出现的, 因此, 经常把调制和解调系统简称为调制系统。而且, 一个通信系统的性能在很大程度上是由调制系统的调制方式所决定的。

按照调制器输入信号(即调制信号)的形式, 调制可分为模拟调制(或连续调制)和数字调制。模拟调制是指利用输入的模拟信号直接调制(或改变)载波(正弦波)的振幅、频率或相位, 从而得到调幅(AM)、调频(FM)或调相(PM)信号。数字调制是指利用数字信号来控制载波的振幅、频率或相位。常用的数字调制有振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)等。为了提高传信率, 还发展了多进制的数字调制方式, 如: 多进制数字振幅调制(MASK)、多进制数字频率调制(MFSK)、多进制数字相位调制(MPSK或MDPSK)等。20世纪60年代以来, 为了解决衰落现象对通信的影响, 提出了时频调制(TFSK)和时频相调制(TFPSK)等调制方式。20世纪70年代以来, 随着卫星通信和移动通信的发展, 为了提高频带利用率, 相继出现了四相相移键控(QPSK)、最小频移键控(MSK)、正弦频移键控(SFSK)、平滑调频(TFM)、预调制高斯滤波的最小频移键控(GMSK)以及无码间串扰和相位抖动的交错四相相移键控(LJF-QPSK或Fether QPSK)等调制方式, 而且这些调制方式都是在FSK或PSK的基础上发展起来的, 可以统称为窄带高效数字调制。

调制解调技术研究的主要内容包括: 调制的原理、已调信号的频谱特性及其产生方法、解调的原理和实现方法、解调后的信噪比或误码率性能等。

调制是指把基带信号频谱搬移到一定的频带范围，以适应信道的要求。对基带信号进行调制的目的主要有以下几个。

#### (1) 信号容易辐射

为了充分发挥天线的辐射功能，一般要求天线的尺寸和发送信号的波长在同一个数量级。例如常用天线的长度为  $1/4$  波长，如果把基带信号直接通过天线发射，那么天线的长度将为几十到几百公里的数量级，显然这样的天线是无法实现的。因此，为了使信号容易辐射，一般都将基带信号调制到较高的频率（一般调制到几百千赫到几百兆赫，甚至更高的频率）。

#### (2) 进行频率分配

为了使各个无线电台发出的信号互不干扰，给每个电台都被分配了不同的频率。这样利用调制技术把各种话音、音乐、图像等基带信号调制到不同的载频上，可以使接收者选择所需的电台信号。

#### (3) 实现多路复用

如果信道的通带较宽，就可以用一个信道传输多个基带信号，其方法是把基带信号分别调制到相应的载波上，然后将它们一起送入信道传输即可。这种在频域上实行的多路复用称为频分复用。当然还有时分复用、码分复用、空分复用以及波分复用等方法。

#### (4) 减少噪声和干扰的影响

噪声和干扰的影响不可能完全消除，但是可以通过选择适当的调制方式来减少它的影响，因为不同的调制方式具有不同的抗噪声性能。例如扩展频谱调制技术，它是利用调制技术使已调信号的传输带宽远大于基带信号的带宽，用增加带宽的方法换取噪声影响的减小。

#### (5) 克服设备的限制

通信系统中的某些部件（如放大器和滤波器）的性能优劣和制造的难易程度不仅与信号的频率有关，而且与信号的最高频率和最低频率之比有关。利用调制可以把信号频率变换到容易满足设计要求的频率上来，另外，通过调制还可以把宽带信号变为窄带信号。

## 1.5 调制技术的发展

调制技术最初是从模拟信号的调制与解调技术开始发展的，这是因为当时的通信系统为模拟通信系统。后来，随着数字通信技术的发展，数字调制技术也得到了迅速发展和广泛应用。随着各种通信系统数量的日益增多，为了充分地利用有限的频谱资源，广大通信科研工作者致力于研究具有更高频谱利用率的数字调制技术，而且原 CCITT 一直在促进并鼓励开发新奇的频谱使用技术，由于原 CCITT 科学地将频段分别分配给各种通信系统，以便各种通信系统能够有效地进行通信，因而，许多用户团体、科研院所和通信公司都在开发先进的调制技术来提高给定频谱的利用率。

众所周知，调制技术是通信系统中的关键技术之一，尤其对于数字通信系统，数字调制技术更关系到系统性能的优劣。对于数字调制技术的主要要求是：已调信号要具有比较窄的频谱宽度和较快的带外衰减（即已调信号所占频带窄，或者称频谱利用率高）；对于已调信号要容易采用相干或非相干方法解调；而且已调信号要具有较强的抗噪声和抗干扰能力，并



适宜在衰落信道中传输。

提高频谱利用率是提高通信系统容量的重要措施,也是人们规划和设计通信系统的关注焦点。高的频谱利用率就是要求已调信号所占的带宽要窄,即已调信号频谱从天线发射时功率的主瓣要窄,同时旁瓣的幅度要低(也就是要求辐射到相邻频道的功率要小)。对于数字调制系统而言,频谱利用率指的是传输效率问题,也就是说,不仅要关心通信系统的传输速率,还要看在这样的传输速率下所占用的信道频带宽度是多少。如果系统的频谱利用率高,则说明通信系统的传输效率高,否则传输效率就低。频谱利用率通常定义为单位频带(1Hz)内码元传输速率(单位为 Baud)的高低,由于码元速率与信息速率有确定的关系,因此频谱利用率还可以用信息速率的形式来定义,以便比较不同系统的传输效率,即单位频带(1Hz)内信息传输速率(单位为 bit/s)的高低,实质上,以上两个定义是等价的。本书所指的“高效”就是指具有较高的频谱利用率。

从频谱利用率的定义可以看出,要提高通信系统的频谱利用率有两种途径:一是降低已调信号的频谱宽度,二是提高该调制系统的信息传输速率。由于恒包络调制技术具有相对较窄的频谱,因而得到了重视和利用,并且获得了飞速发展。另一种获得迅速发展的调制技术是振幅和相位联合调制(QAM)技术,该技术具有较高的信息传输速率。由于移动通信、导航控制技术的迅速发展,使得码分多址通信系统发展非常迅猛,也使得正交频分复用(OFDM)技术获得了新生,并得到极快的发展,该技术可以克服码间干扰并极大地提高系统的容量。

本书主要讨论具有高频谱利用率的调制技术,而且是可以被政府、商业部门、科研院所及通信公司所应用的数字调制技术。本书将从基础内容(也就是从大家比较熟悉的数字调制技术)开始,然后讨论更加先进的技术,包括恒包络不连续相位调制、恒包络连续相位调制、准恒包络调制、具有较大包络波动的高效宽带调制以及具有大包络波动的严带限调制等。本书还讨论了最近发展起来的交叉相关格型编码正交调制(XTCQM),该调制技术具有相当高的技术水平,而且也获得了相当好的调制效果。有关调制技术的性能分析、计算机模拟结果等也将在本书中进行介绍。

数字通信系统经常是在路径损耗和大气感应衰落的环境下运行工作的。为了在通信系统的接收端获得维持正常通信所需足够的接收功率,数字通信系统要求系统的发射端设备必须在定量但有限的可利用功率条件下产生足够的发射输出功率。在许多通信系统中(如用于航天和航空等远距离通信的测量、跟踪、控制系统,用于卫星通信以及移动通信的有关发射和接收设备等),它们的放大设备通过运行在完全饱和的状态来达到最大的转换效率。然而,这就要求利用幅度调制—幅度调制(AM-AM)和幅度调制—相位调制(AM-PM)的转换过程将要传输的信号转换成发射信号,因此,需要通过对幅度的调制来发送信息,但幅度调制又往往需要使用线性放大器。例如,正交幅度调制(QAM)方式需要一个具有线性特性的放大器,但当要求满足最大发射功率效率的条件时,该调制方式又不适合在信道中传输。当前流行的另一种方法可以用来产生 QAM 类型的调制信号,它们是通过分别在同相(I)信道和正交(Q)信道上使用非线性的高功率放大器来实现的。

在各种通信系统中,所要研究的另一个问题是关于射频(RF)放大器设备,由于它工作在非线性模式以及饱和或者接近饱和的状态,因而又一次引入了频谱的展宽,这是由于带限调制之后,放大器之前的非线性引起的。由于需要发射的功率谱能够落在管理机构如

FCC 或国际电信联盟 (ITU) 指定的频带内, 因而这种调制必须进行精心的设计, 以保持频谱展宽达到最小。这个对已调信号的限制条件必须通过限制发射波形的瞬时幅度波动以及额外的要求“恒包络”来实现。在前面所提到的内容中, 由于需要考虑高发射功率效率, 因此, 就要求必须考虑利用调制技术来获得较高的带宽利用率, 所以必须利用除多电平幅度调制以外的其他手段。恒包络调制就是本书首先要讨论的内容。由于本书的内容有限, 因而不可能做到面面俱到, 只能对比较重要的和具有应用价值的内容进行讨论。对于目前大量的研究内容和所取得的成果, 以及有关技术的当前发展情况, 本书进行了总结和归纳, 最后, 将注意力放在讨论具有同相—正交相位 (I-Q) 描述的信号形式以及对应这种信号形式的 I-Q 形式接收机方面。