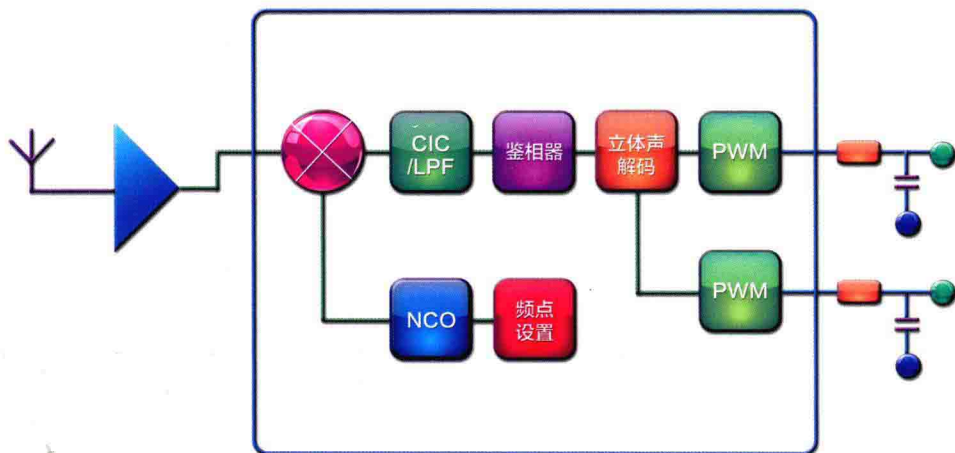


历时四年，累计1000多页的通信IC设计著作，内容覆盖通信理论、设计方法及产品实现。

配套多个芯片设计代码和完整的验证环境，内容包含WiFi、DVB-S、LTE的核心算法，可操作性极强。

本书由浅入深，全新演绎了Verilog的设计思想与设计流程，并将数字信号处理的精髓融入每章内容。



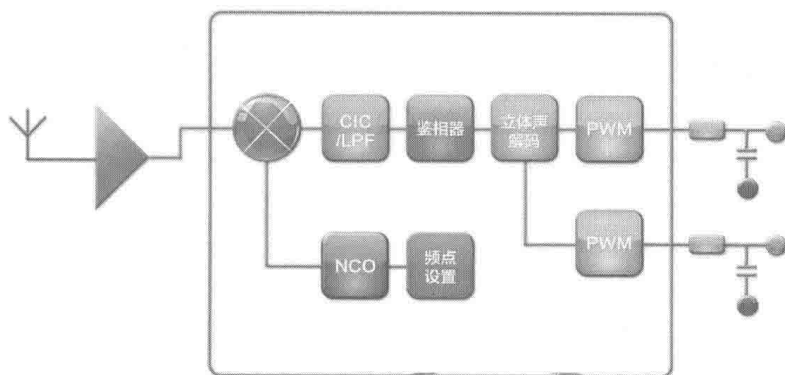
# 通信IC设计

李庆华 著



EDA与IC设计

下册



# 通信IC设计

李庆华 著



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

通信 IC 设计 / 李庆华著. —北京: 机械工业出版社, 2015.12  
(电子与嵌入式系统设计丛书)

ISBN 978-7-111-52551-6

I. 通… II. 李… III. 数据通信—程序设计 IV. TN919

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 007845 号

## 通信 IC 设计 (下册)

出版发行: 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: 张梦玲

责任校对: 董纪丽

印 刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版 次: 2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 186mm×240mm 1/16

印 张: 34

书 号: ISBN 978-7-111-52551-6

定 价: 189.00 元 (上下册)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88379426 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzit@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

# 目 录

- 第5章 通信原理与单载波芯片设计 / 645
  - 5.1 通信原理与设计基础 / 646
    - 5.1.1 通信系统模型 / 646
    - 5.1.2 常见的各种调制方式 / 647
    - 5.1.3 通信链路的关键要素 / 656
    - 5.1.4 射频模型 / 662
    - 5.1.5 调整射频的3个重要手段 / 674
  - 5.2 常见的通信解调套路 / 684
    - 5.2.1 解调套路概述 / 684
    - 5.2.2 解调实现方法 / 685
    - 5.2.3 完整通信链路解调实例：数据直播星系统设计 / 695
  - 5.3 DVB-S系统概述 / 708
    - 5.3.1 DVB-S整体流程介绍 / 709
    - 5.3.2 DVB-S系统的扰码 / 709
    - 5.3.3 DVB-S系统的外编码模块 / 709
    - 5.3.4 DVB-S系统的卷积交织 / 710
    - 5.3.5 DVB-S系统的卷积编码 / 712
    - 5.3.6 DVB-S系统的QPSK调制 / 712
  - 5.4 DVB-S信道接收算法原理 / 713
    - 5.4.1 QPSK信号数学表示 / 713
    - 5.4.2 接收算法的特性需求 / 714
    - 5.4.3 QPSK解调总体设计 / 715
    - 5.4.4 QPSK解调载波恢复电路 / 715
    - 5.4.5 QPSK符号时钟同步电路 / 723
    - 5.4.6 QPSK解调辅助电路 / 728
  - 5.5 DVB-S信道接收机设计实例 / 729
    - 5.5.1 信号命名规范与约定 / 729
    - 5.5.2 QPSK数字解调器的整体结构 / 730
    - 5.5.3 QPSK内部共用模块的电路设计 / 731
    - 5.5.4 载波恢复模块的电路设计 / 739
    - 5.5.5 符号同步电路 / 745
  - 5.6 DVB-S信道编解码设计实例 / 750
    - 5.6.1 信道编解码的整体流程 / 751
    - 5.6.2 Viterbi译码 / 752
    - 5.6.3 帧同步 / 760
    - 5.6.4 解交织 / 764
    - 5.6.5 RS译码 / 765
    - 5.6.6 解扰及同步 / 772
- 附录A DVB-S系统解调的算法推导 / 773
- 附录B  $GF(2^8)$ RS运算表 / 782
- 附录C 通信解调芯片的简化设计实例 / 786
- 总结 / 788

## 第6章 多载波通信芯片设计 / 789

- 6.1 OFDM 设计思想与通用解调过程 / 790
  - 6.1.1 OFDM 的技术特点 / 790
  - 6.1.2 OFDM 的基本原理 / 793
  - 6.1.3 OFDM 的解调套路 / 793
- 6.2 MIMO 技术 / 796
  - 6.2.1 MIMO 系统原理 / 797
  - 6.2.2 MIMO 中的空时编码 / 798
  - 6.2.3 MIMO 与 OFDM 的结合 / 799
  - 6.2.4 LTE 中的 MIMO / 800
  - 6.2.5 LTE 中 MIMO 的简单解调套路 / 801
  - 6.2.6 超越 MIMO: 非正交多址 / 802
- 6.3 WiFi 的基础知识 / 804
  - 6.3.1 802.11 系列标准 / 806
  - 6.3.2 802.11 的几个关键概念 / 808
  - 6.3.3 802.11 的通信模型 / 812
- 6.4 802.11a 发射机设计 / 814
  - 6.4.1 802.11a 的技术参数概述 / 814
  - 6.4.2 802.11a 的帧结构 / 817
  - 6.4.3 802.11a 的发送流程 / 819
  - 6.4.4 802.11a 发射机的实现原理 / 820
  - 6.4.5 802.11a 发射机的 Matlab 实现 / 832
  - 6.4.6 802.11a 发射机的 Verilog 实现 / 836
- 6.5 802.11a 接收机设计 / 837
  - 6.5.1 802.11a 接收机的适用范围 / 837
  - 6.5.2 802.11a 接收机的整体概述 / 838
  - 6.5.3 802.11a 接收机的算法原理概述 / 843
- 6.5.4 802.11a 接收机的模块设计 / 851
- 6.5.5 802.11a 接收机中用到的一些查表模块 / 873
- 6.6 802.11b 发射机设计 / 877
  - 6.6.1 802.11b 的帧结构 / 878
  - 6.6.2 802.11b 发射内容归纳 / 879
  - 6.6.3 802.11b 的标准发射过程 / 879
  - 6.6.4 802.11b 发射数据产生 / 881
  - 6.6.5 802.11b 发射机的硬件详细设计 / 889
- 6.7 802.11b 接收机设计 / 891
  - 6.7.1 802.11b 接收机概述 / 891
  - 6.7.2 802.11b 接收机的算法原理 / 891
  - 6.7.3 802.11b 接收机的接收流程 / 892
  - 6.7.4 802.11b 接收机的信号处理小结 / 901
  - 6.7.5 802.11b 接收机的实际硬件实现 / 901
  - 6.7.6 802.11b 接收机的部分通用模块设计 / 924
- 6.8 完整的 802.11a/b/g 芯片设计案例 / 927
  - 6.8.1 802.11a/b/g 系统设计 / 927
  - 6.8.2 802.11g 接收机前端的信号处理模块 / 931
  - 6.8.3 802.11g 接收机前端的控制处理模块 / 953
  - 6.8.4 802.11g 发射机前端的信号处理模块 / 959
  - 6.8.5 802.11g 芯片的一些附加模块 / 972

- 6.9 802.11 技术新的发展 / 973
  - 6.9.1 802.11 系列的发展  
脉络 / 973
  - 6.9.2 802.11n 关键技术  
概述 / 978
  - 6.9.3 802.11n 的帧格式 / 981
  - 6.9.4 802.11ac 的物理层 / 988
  - 6.9.5 802.11ac 的发射机 / 990
  - 6.9.6 802.11ac 新特性 / 997
  - 6.9.7 802.11ah: 802.11 的  
物联网标准 / 1001
  - 6.9.8 802.11 的全双工传输  
技术 / 1007
  - 6.9.9 802.11n 商业芯片  
示例 / 1011
- 附录 A 802.11b 接收机的理论  
基础 / 1012
- 附录 B 802.11a/g 接收机算法的  
Matlab 代码概述 / 1021
- 总结 / 1031
- 第7章 复杂通信系统设计 / 1032**
  - 7.1 大型通信系统简介 / 1033
    - 7.1.1 概述 / 1033
    - 7.1.2 公网系统的演进 / 1033
    - 7.1.3 大型通信系统的  
特点 / 1034
  - 7.2 LTE 系统简介 / 1043
    - 7.2.1 LTE 系统构架 / 1044
    - 7.2.2 LTE 物理层 / 1046
    - 7.2.3 LTE 的关键技术 / 1066
    - 7.2.4 LTE 的一些浅显  
描述 / 1071
  - 7.3 LTE 的物理层过程及关键  
算法 / 1073
    - 7.3.1 上行共享信道  
(PUSCH) / 1073
    - 7.3.2 上行控制信道  
(PUCCH) / 1076
    - 7.3.3 随机接入信道  
(PRACH) / 1080
    - 7.3.4 下行共享信道  
(PDSCH) / 1085
    - 7.3.5 下行控制信道  
(PDCCH) / 1087
    - 7.3.6 下行 PBCH / 1094
    - 7.3.7 PHICH / 1095
    - 7.3.8 PCFICH / 1096
    - 7.3.9 SRS 过程 / 1097
    - 7.3.10 上行信道的功率  
控制 / 1098
    - 7.3.11 HARQ 重传 / 1101
    - 7.3.12 终端对物理层的  
处理 / 1105
    - 7.3.13 基站对物理层的  
处理 / 1106
    - 7.3.14 其他算法 / 1109
  - 7.4 LTE 系统开发的简要说明 / 1116
    - 7.4.1 复杂通信系统的几个  
基本概念 / 1116
    - 7.4.2 LTE 的软件框架 / 1118
    - 7.4.3 LTE 高层算法 / 1119
    - 7.4.4 LTE 芯片概述 / 1122
  - 7.5 LTE 基站芯片设计 / 1124
    - 7.5.1 LTE 基站基带芯片的  
需求分析 / 1124
    - 7.5.2 LTE 基站芯片的参考  
构架 / 1130
    - 7.5.3 LTE 基带芯片的设计  
参考 / 1136
    - 7.5.4 基于 ESL 的 LTE 基站芯片  
开发案例 / 1142
  - 7.6 基于 FPGA 的 LTE 基带方案 / 1152
    - 7.6.1 基站基带模块在 LTE  
系统中的位置 / 1152
    - 7.6.2 基站基带模块的硬件  
架构 / 1153

- 7.6.3 基带软件到硬件的映射 / 1153
- 7.6.4 FPGA 功能设计 / 1155
- 7.7 LTE 典型基站产品的内部结构解析 / 1161
  - 7.7.1 研究 LTE 基站产品的目的 / 1161
  - 7.7.2 基站的内部结构 / 1162
  - 7.7.3 主板主要器件分析 / 1162
  - 7.7.4 对基站芯片/FPGA 开发的启示 / 1164
- 7.8 5G 系统展望 / 1165
  - 7.8.1 5G 的愿景 / 1165
  - 7.8.2 5G 整体开发思路 / 1166
  - 7.8.3 5G 网络架构 / 1166
  - 7.8.4 5G 的核心技术 / 1168
- 总结 / 1175
- 缩略语 / 1176
- 参考文献 / 1178

# 通信原理与单载波芯片设计

## 本章概要

前面章节的内容主要围绕通信基本单元进行论述，而本章及后面的章节将站在通信系统的角度进行论述。对于通信系统设计而言，首要的工作是建立完整的无线通信链路，形成收发完备的通信系统模型。通过通信链路能够找到各种影响传输性能的因素，能够正确描绘真实世界的通信过程。建立通信系统模型有助于准确评估各类信号处理算法的潜能，便于在设计中做出最佳方案选择。

本章主要针对传统的单载波通信系统进行内容安排。

5.1 节从总体上论述什么是无线通信系统，讲述通信系统的概念，并给出几种最基本的信号调制方法。本节还对无线链路进行详细说明，强调链路的每一个环节都会对发送、接收造成影响。并针对算法设计人员通常对射频了解较少的现状，详细讲述射频电路的各种特性指标以及对基带电路的影响，并给出基带处理三大基本电路：AFC、AGC、APC。

5.2 节主要讲述非理想信道下，接收机如何与发射机同步的过程，强调从信号本身中提取各种特征并完成补偿，从而实现理想解调。本节给出两个理论极限：香农极限和克拉美-罗极限，其后的算法都将依据这两个极限进行设计。此外，本节还给出适合常规通信系统的通用同步技巧和解调技巧，包括频偏、定时、相偏等方面。将本节给出的各种方法组合起来，就能形成不同的通信解调方案。

5.3 节则是在前面两节的基础上，讲述数字卫星电视系统（DVB-S）进行调制的过程。读者可以通过本节学习，并对照前面两节思考如何进行 QPSK 信号盲解调。

5.4 节给出 DVB-S 系统 QPSK 信号的解调方法，该方法充分利用接收信号的统计特性，按照非数据辅助（NDA）解调方法实现解调。其他任意的正交调制信号都可以采用类似方法实现解调。本节给出的 QPSK 最终解调算法非常简单，但隐藏在后面的统计原理和简化推导过程有很深的理论背景。

5.5 节给出 DVB-S 的解调硬件实现，所有的复杂算法电路均能通过本节的简单模块搭建实现。

5.6 节则给出 DVB-S 的信道解码实现，包括 Viterbi 译码和 RS 译码两类，是对前面信道编解码章节的一个硬件实现方法总结。

附录给出一个简单实用的 GMSK 解调方案，强调通过对信号本质的理解获得简单可靠的解调方法。很多的通信系统都可以按照本章附录介绍的思想进行解调。



## 5.1 通信原理与设计基础

本节将系统论述无线通信原理、通信系统模型以及各种常见的解调方案。

### 5.1.1 通信系统模型

前面章节的内容主要面向通信基础模块设计，重点在于如何将电路设计与数字信号处理联系起来。从本章起，将重点转向无线通信系统设计以及对应的芯片构架实现，强调系统结构与链路设计。由于通信系统需要较多的理论知识，所以会有很多的算法推导，有兴趣的读者可以简单了解一下，也可以直接进入芯片设计相关主题章节。

通用的通信系统定义是：进入传输信息所需的一切技术设备和传输媒介的总和。具体的模型如图 5-1 所示。

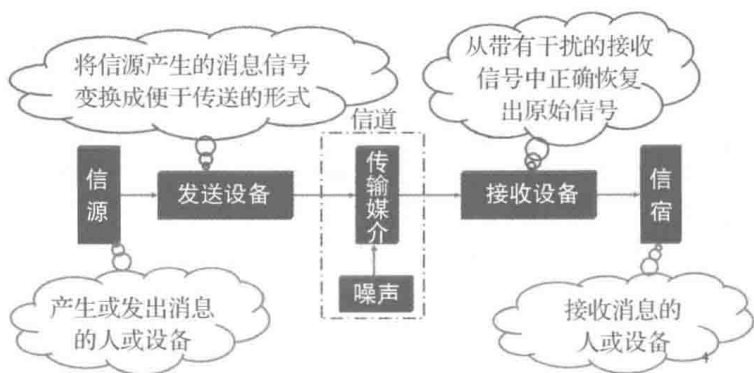


图 5-1 通信系统的一般性模型

在实际生活中，往往会以双向通信为主，其信元的主要构成如图 5-2 所示。

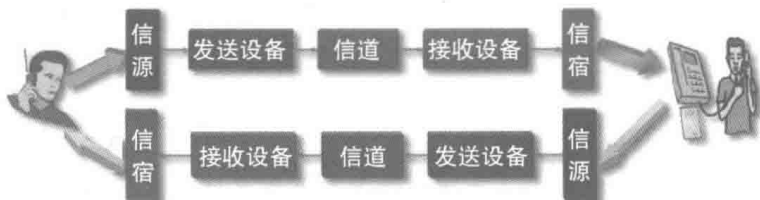


图 5-2 双向通信系统示意

前面论述的各种基础信号处理模块均为发送或接收设备中间的一环，如果要让一个通信系统运行起来就必须按照上面的模型完整串接起来，形成一个完整的通信链路，否则设计实现只是一个实验室的玩具。通信链路的基本构成如图 5-3 所示。

图 5-3 中各个模块的作用如下：

- ▶ 信源编码是把信源发出的模拟信号变为数字信号，以及为了降低码速率而进行压缩编码（去除冗余），例如 MPEG4、H.265 编码等。
- ▶ 信源解码，是信源编码的逆处理。
- ▶ 信道编码，由于信道传输中会出现误码，为了能够自动检出错误并纠正，采用纠错编

码, 又叫信道纠错编码, 例如 RS 码、Turbo 码、LDPC 等。

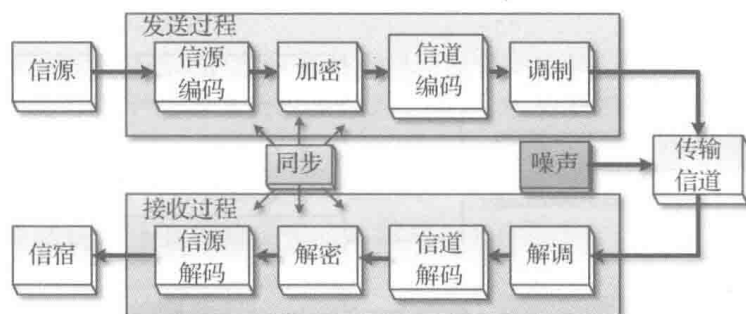


图 5-3 通信链路的基本构成

- ▶ 信道解码, 是信道编码的逆处理, 通常采用最大似然概率译码或者迭代译码。
- ▶ 调制, 其目的是使传输的数字信号与信道特性相匹配, 便于有效地进行信息传输。调制通常是通过数字信号控制载波的某个参数, 包括频率、相位、幅度或者通断等, 此时就会出现类似 ASK、FSK、PSK、QAM 等选择。而调制性能评估的核心是射频功放效率和带宽效率。
- ▶ 解调, 根据调制方式进行对应的解调, 往往解调要比调制复杂 10 倍以上, 因为解调需要根据信道估计状况进行最大概率判别。

此外, 通信系统还必须考虑安全加密的问题。例如 2G 系统, 由于加密算法被攻破, 所以基于 USRP 的 GSM 伪基站能够疯狂肆虐, 使很多手机用户收到大量的垃圾短信, SIM 卡也容易被盗用复制。3G 系统相对好一点, 但仍然存在核心网漏洞, 容易被攻陷。而 4G 则大大改善了安全加密机制, 但仍然存在 IMIS(身份标示)泄露的问题。

上述步骤是通信链路的必备环节。如果想得到最优接收, 还需要加上同步、信道估计和均衡等环节。因此通信系统的几个关键技术要素如表 5-1 所示。

表 5-1 通信系统的关键技术要素及其可选方案

技术要素	可选方案
信源编码与解码技术	预测编码、变换编码
加密与解密技术	对称密钥体制、公钥体制
信道编码与解码技术	卷积、分组、TURBO、LDPC
调制与解调技术	FSK、PSK、QAM、OFDM
多路复用技术	OFDM、频分复用、时分复用
定时与同步技术	载波同步、位同步、网同步

## 5.1.2 常见的各种调制方式

调制从信号方式上分为: 模拟调制和数字调制。站在功放效率的角度, 数字调制根据信号包络是否恒定又分为: 恒包络调制和非恒包络调制。对于恒包络调制, 信息传递与调制的幅度无关, 通过相位即可传递信息, 可以适应非线性功放, 射频传输效率最高。恒包络调制包含相位不连续调制和相位连续调制两类。而非恒包络调制在调制过程中信号幅度存在变化, 包含线性调制和正交幅度调制 (MQAM) 两类。具体的调制方式分类说明如图 5-4 所示。

上述信号的时域波形如图 5-5 所示。

在 ASIC 实现时, 调制位的精度受限于 EVM 要求和各种射频指标。虽然 64QAM 最低可用 4 位表示 ( $IQ$  各自 4 位), 实际输出位往往需要 7 位以上, 如果考虑满足射频指标, 通常需要 10 位以上。另外, 各种调制解调在芯片实现时, 通常采用查找表方式实现, 而且会与编码交

织紧密结合；整个芯片算法的难度实际在于由非理想发射接收带来的各种同步处理以及信道均衡实现。

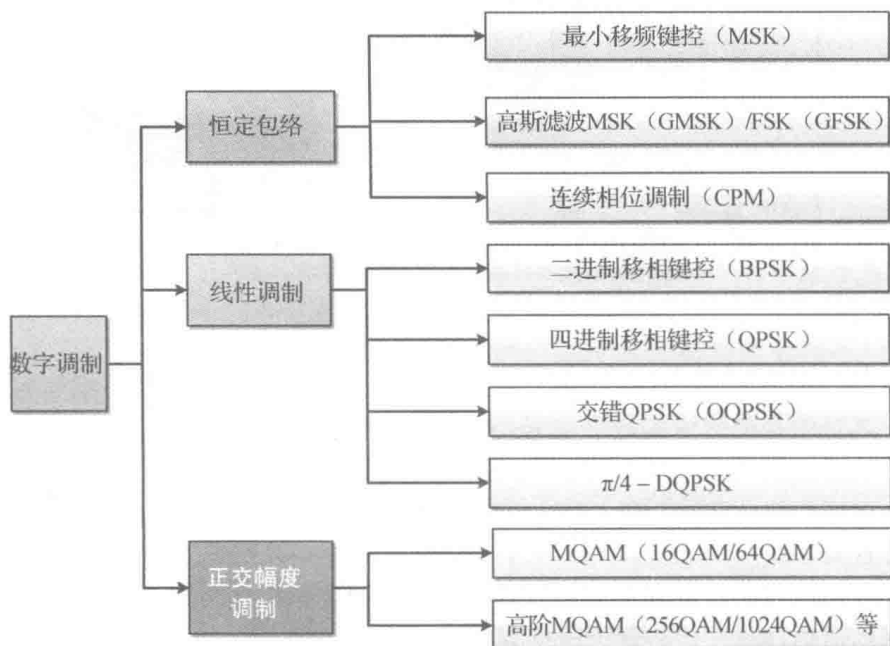


图 5-4 调制方式的分类说明

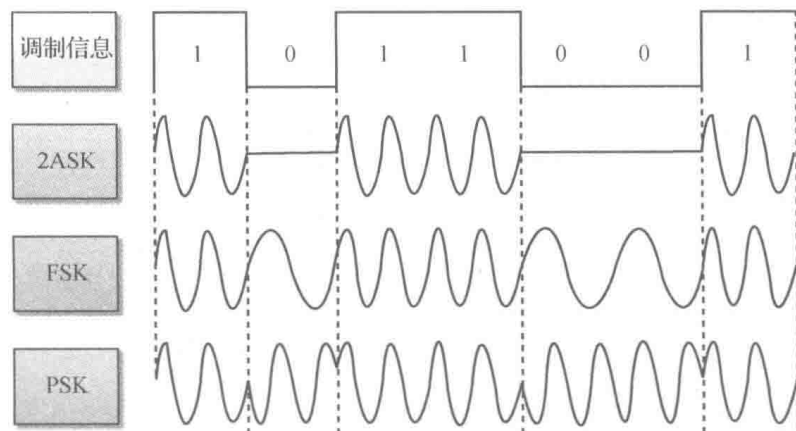


图 5-5 各种简单调制的时域波形图

### 5.1.2.1 恒包络调制

恒包络调制包括 FSK/MSK/GFSK/GMSK/CPM 等调制方式，主要特点包括：

- ▶ 对线性要求低，可使用 C 类放大器，功率效率高，是传统窄带通信和深空通信调制技术的首选。
- ▶ 带外辐射低，可达  $-70 \sim -60\text{dB}$ 。
- ▶ 可使用限幅器——鉴频器检测，系统结构简单，实现容易。
- ▶ 限幅器可克服随机噪声和瑞利衰落导致的信号幅度的变化，抗干扰和衰落能力强。

▶ 具有较好的解调门限。

### 1. 恒包络信号的相位处理方法

由于恒包络信号仅对相位处理，所以调制解调过程非常简单。图 5-6 是 GMSK 的调制实现示意图。发射时，直接对数字信号进行高斯滤波，并作为 VCO 的相位控制信号，就完成了 GMSK 的调制过程，其余恒包络信号与之类似。GMSK 理论上是对 MSK 的相位进行高斯滤波并调制的结果，如果取消预滤波就是 MSK。传统模拟芯片就是这样完成的，例如 CML589 芯片，数字芯片则需要设计一个大约持续 3 个符号长度的数字滤波器，以便完成相位滤波。

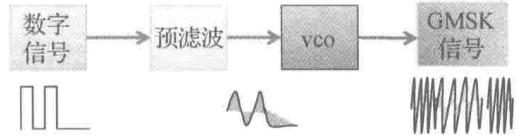


图 5-6 GMSK 的调制过程

整个 GMSK 的相位解调过程如图 5-7 所示，鉴频电路实现可以参考 FM 收音机一节。

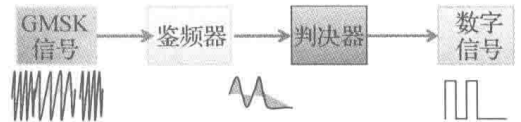


图 5-7 GMSK 的解调过程

可以发现 GMSK 的调制解调过程只需要一个滤波器、一个差分器和一个比较器即可实现。但这种方式是模拟解调思路<sup>⊖</sup>（实现过程是数字化的），真正高性能的解调方式是基于  $IQ$  的相关解调，即从载波中提取同步时钟，对  $IQ$  信号解旋转，然后进行判决的过程。

### 2. 恒包络信号的 $IQ$ 正交处理方法

前面给出的 MSK 调制是采用直接相位调制方式，而基于正交调制方式的实现如图 5-8 所示。

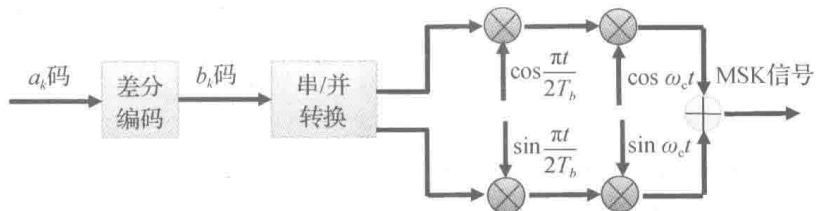


图 5-8 MSK 的正交调制

MSK 的调制过程如下，可以发现这是一个正交乘法实现：

- ▶ 对输入的二进制数据信号进行差分编码。
- ▶ 经串/并转换，分成相互交错一个码元宽度的两路信号  $I_k$  和  $Q_k$ 。
- ▶ 用加权函数  $\cos(\pi t/(2T_s))$  和  $\sin(\pi t/(2T_s))$  分别对两路数据信号  $I_k$  和  $Q_k$  进行加权。
- ▶ 加权后的两路信号再分别对正交载波  $\cos \omega_c t$  和  $\sin \omega_c t$  进行调制。
- ▶ 将所得到的两路已调信号相加，通过带通滤波器，就得到 MSK 信号。

而基于  $IQ$  相关解调过程的如图 5-9 所示。

基于  $IQ$  相关解调的 GMSK 方案如图 5-10 所示，读者只需简单了解即可。

对于恒包络信号，因为  $I^2 + Q^2 = \text{恒量}$ ，所以调制信号  $IQ$  的坐标分布图体现为一个单位圆。

<sup>⊖</sup> 早期的 Motorola GSM 芯片解调就是采用模拟相位解调，而 Nokia 则采用基于  $IQ$  解旋转的实现方法。

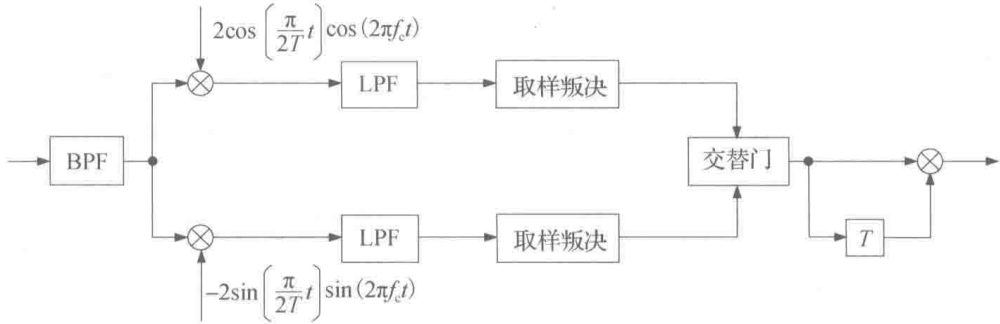


图 5-9 MSK 的正交相关解调

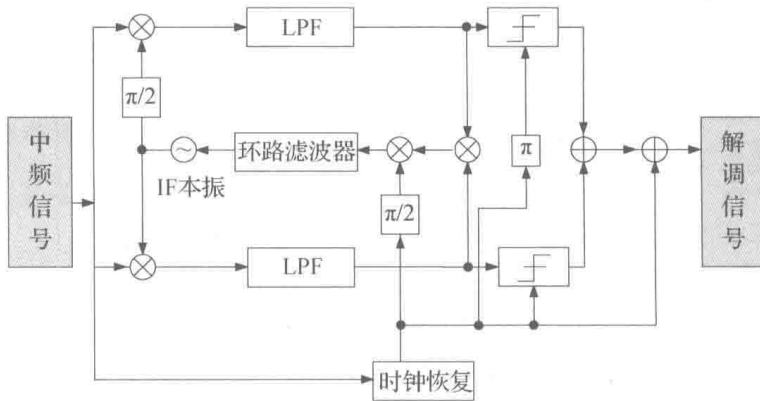


图 5-10 GMSK 的相关解调

### 5.1.2.2 线性调制

线性调制主要包含移相键控调制 (MPSK), 通过利用具有多个相位状态的正弦波来代表多组二进制信息码元, 即用载波的一个相位对应于一组二进制信息码元。对于 MPSK, 如果载波有  $2^k$  个相位, 它可以代表  $k$  位二进制码元不同码组。多进制相移键控也分为多进制绝对相移键控 (PSK) 和多进制相对 (差分) 相移键控 (DPSK)。典型的 MPSK 调制包括 BPSK/QPSK/OQPSK 等。

在 MPSK 信号中, 载波相位可取  $M$  个可能值, 即  $\theta_n = n \times \frac{2\pi}{M}$ ,  $n = 0, 1, \dots, M-1$ 。因此 MPSK 可表示为:

$$S_{\text{MPSK}}(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta_n) = A \cos\left(\omega_0 t + n \times \frac{2\pi}{M}\right)$$

假定载波频率  $\omega_0$  是基带数字符号速率  $\omega_c = 2\pi/T_s$  的整数倍, 则上式变为:

$$\begin{aligned} S_{\text{MPSK}}(t) &= A \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t - nT_s) \cos(\omega_0 t + \theta_n) \\ &= A \cos \omega_0 t \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos(\theta_n) g(t - nT_s) - A \sin \omega_0 t \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sin(\theta_n) g(t - nT_s) \end{aligned}$$

上式正好给出了 MPSK 的正交调制方式表达式, 可以发现 MPSK 实现就是输入位 ( $M$  进

制, 值为  $g(t - nT_s)$  与  $\cos(\theta_n)$  和  $\sin(\theta_n)$  相乘, 得到  $IQ$  两路信号, 然后进行上变频的过程。由于  $\cos(\theta_n)$  和  $\sin(\theta_n)$  为已知常数, 所以 MPSK 的实现就是一个常数乘法或者  $M$  个表项的查找表。

### 1. BPSK 的调制过程

一个最简单的 BPSK 通信系统如图 5-11 所示。

BPSK 的数学表达式为:

$$S_{\text{BPSK}}(t) = m(t) \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \theta_c)$$

该公式似乎很复杂, 但很容易发现 BPSK 的  $\theta_c = n \times \frac{2\pi}{M}$ , 只取  $0, \pi$ 。对应到实现上, BPSK 只进行  $I$  路双极性编码调制, 而  $Q$  路始终为 0。BPSK 的映射如图 5-12 所示。

BPSK 发射的  $IQ$  分布图 (星座图) 与加入高斯白噪声的星座图对比如图 5-13 所示。

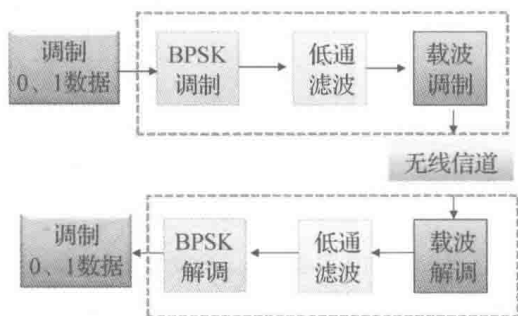


图 5-11 BPSK 通信系统框架

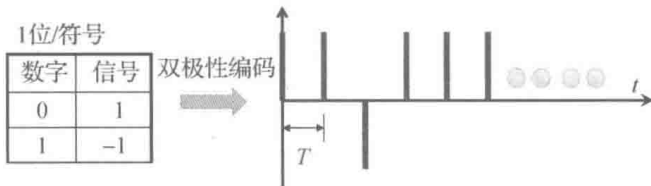


图 5-12 BPSK 的映射过程

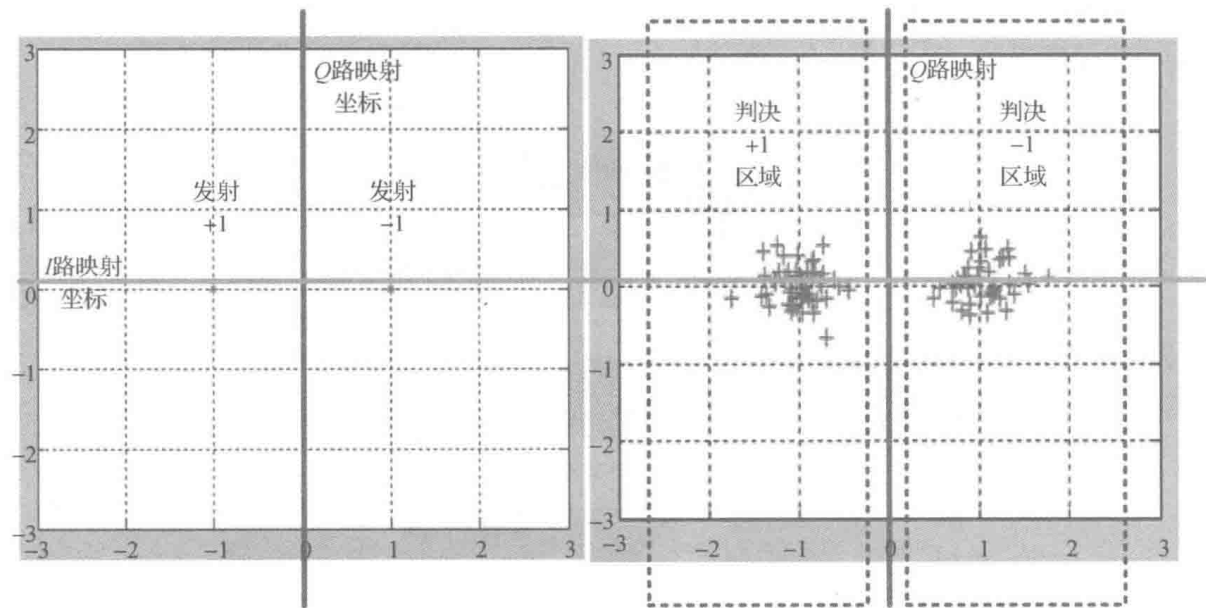


图 5-13 BPSK 调制解调星座图对比

如果不考虑对其他信道的干扰, 上述 BPSK 可以直接发送出去。但由于 BPSK 调制直接发射, 带外抑制不够, 容易给邻道造成严重干扰, 因此还需要进行低通滤波 (成型滤波), 才能形成可用的 BPSK 波形。图 5-14 就是一个 BPSK 调制过程示意图, 可以发现信号的轮廓实际上与直接发送的脉冲很类似。

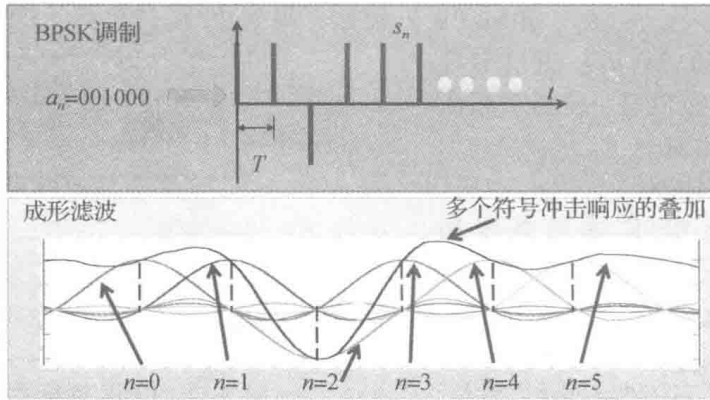


图 5-14 BPSK 的调制与成型滤波

2. QPSK 的调制过程

QPSK (4PSK, 正交相移键控) 又叫四相绝对相移调制, 是最常用的 MPSK, 分为  $\pi/2$  系统和  $\pi/4$  系统两种。它是利用信号的 4 种不同相位来表征数字信息。由于每一种码元含有两个比特信息, 故 QPSK 又被称为双比特码元。QPSK 的正交载波调制电路实现过程如图 5-15 所示。

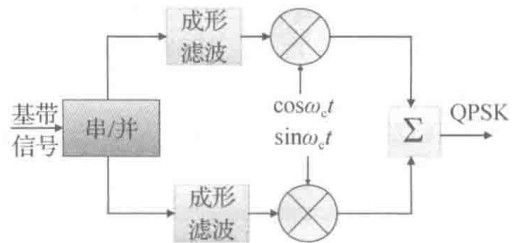


图 5-15 QPSK 的正交载波调制电路实现

而 QPSK 自身的调制过程可以简化为如图 5-16 所示的电路实现。

QPSK 的解调过程如图 5-17 所示。

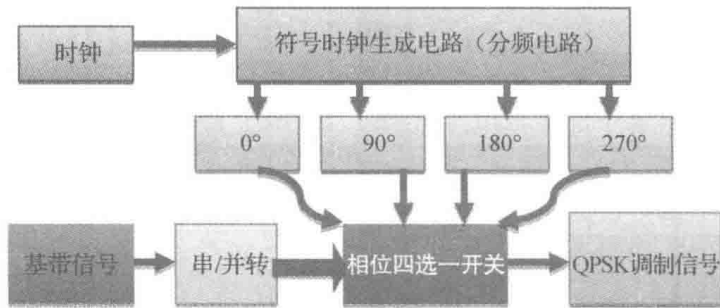


图 5-16 QPSK 调制电路

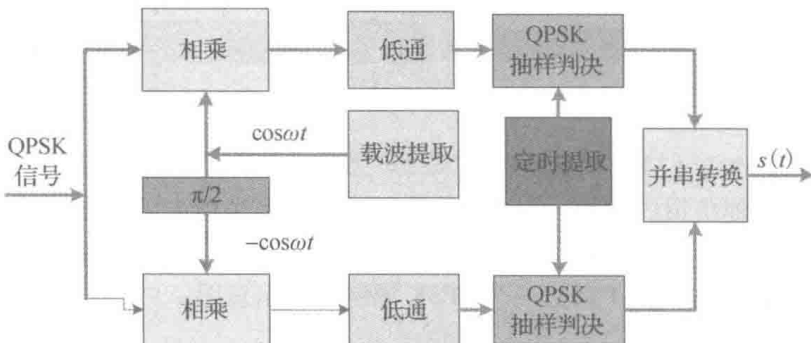


图 5-17 QPSK 解调框图

### 3. 2DPSK

2DPSK 采用差分相位键控，属于相对调相方式，相当于首先对输入的调制位进行差分，然后再送入 2PSK 模块。两者的调制信号对比如图 5-18 所示。

这里的绝对码输入  $a_k$  转为相对码  $b_k$  的变化规律可归纳为“1 变 0 不变”，即  $b_k = a_k + b_{k-1}$ ，设  $b_k$  初始值为 1，则各点波形如图 5-19 所示。

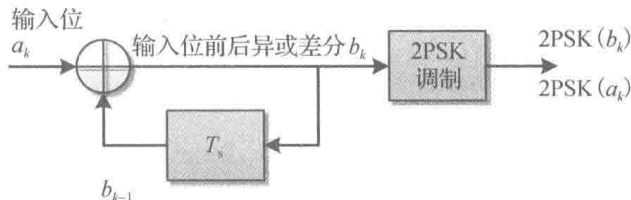


图 5-18 2PSK 与 DPSK 的关系

在调制时，2DPSK 第一个码元内信号的初相可任意假设。按照 2DPSK 规律，输入信息位（绝对码）为“1”时，本码元内 2DPSK 信号的初相相对于前一码元内 2DPSK 信号的末相变化  $180^\circ$ ，输入信息位为“0”时，则本码元内 2DPSK 信号的初相相对于前一码元内 2DPSK 信号的末相不变化。

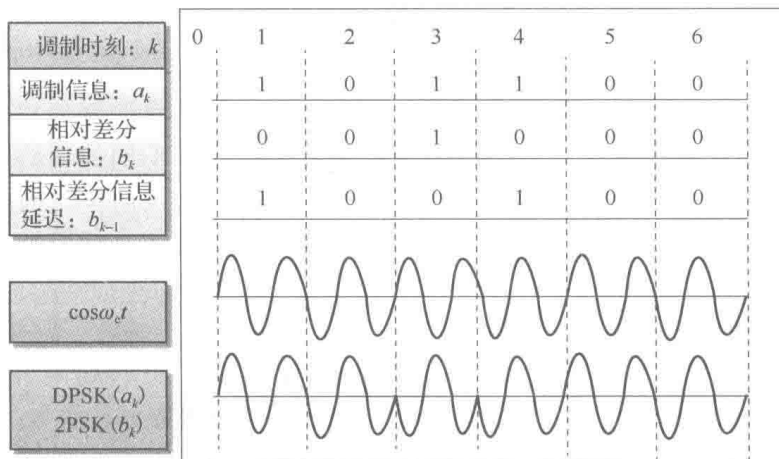


图 5-19 2DPSK 的调制波形

### 4. 理想 QPSK 调制解调

图 5-20 给出了一个最理想的 QPSK 调制解调链路。该例子没有考虑发送、传播以及接收的各种非理想偏差和异常情况，收发双方都认为是理想状态。实际情况中的例子请参见本节后面的论述。

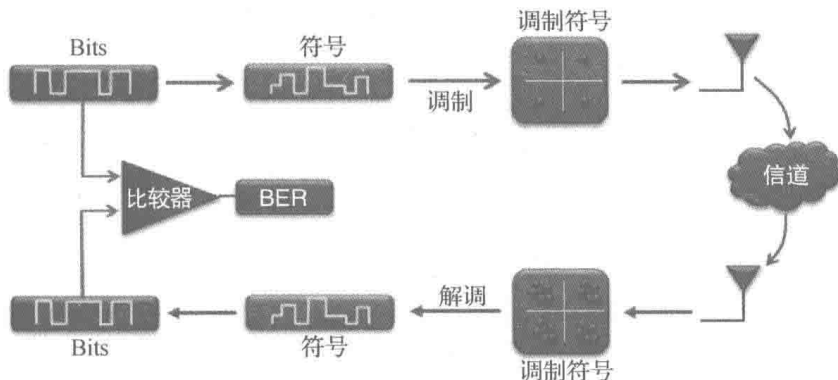


图 5-20 QPSK 理想调制解调链路



这个链路的 Matlab 实现过程如下：

```

N=1000; % 调制解调 1000 个数据
mlevel=4; % 为 4 点星座图
k=log2(mlevel); % 每个符号为 2 位,则为 QPSK,如果是 4 位,就是 16QAM 了
x=randi([0 1],N,1); % 随机生成 N 位数据
xsym=bi2de(reshape(x,k,length(x)/k),'left-msb'); % bit 变符号
Tx_x=qammod(xsym,mlevel); % QPSK 调制
SNR=5; % 增加噪声,模拟信号传播状态
Tx_awgn=awgn(Tx_x,SNR,'measured');
Rx_x=Tx_awgn;
Rx_x_demod=qamdemod(Rx_x,mlevel); % QPSK 解调
z=de2bi(Rx_x_demod,'left-msb'); % 整数转 bit
Rx_x_ByteStream=reshape(z,[],prod(size(z)),1); % 将数据流转换为 bit
[num_of_errors,bit_error_rate]=biterr(x,Rx_x_ByteStream) % 计算 BER

```

### 5.1.2.3 QAM 调制

正交幅度调制 (QAM) 是一种矢量调制,是幅度和相位联合调制的技术,它同时利用了载波的幅度和相位来传递信息,不同的幅度和相位组合代表不同的编码符号。因此在某些情况下可以实现更高的频带利用率,而且抗噪声能力强,实现简单。因此,除了传统电信领域,QAM 调制在新的卫星通信系统和有线电视等需要高速数据传输的行业,也得到了广泛应用。

#### 1. QAM 的调制原理

正交幅度调制使用两个正交的载波  $\cos(2\pi f_c t)$  和  $\sin(2\pi f_c t)$ ,每路采用独立的信息序列进行调制。由于 QAM 的 IQ 两路独立正交,所以合成后的调制函数可表示为:

$$S_{\text{MQAM}}(t) = A_{\text{mc}}g_T(t)\cos(2\pi f_c t) + A_{\text{ms}}g_T(t)\sin(2\pi f_c t), \quad m = 1, 2, \dots, M$$

QAM 信号是一种联合幅度和相位的调制方式,其星座图排布可有很多变化。目前常见的 M-QAM 信号星座图包含有均匀星形星座图,不均匀星形星座图和方形星座图 3 大类,对应的 16QAM 星座图如图 5-21 所示。

本书所用到的星座图如图 5-22 所示,注意星座图数据采用了格雷码编码,这种情况下即使符号判决错误,bit 错误也会降到最小。

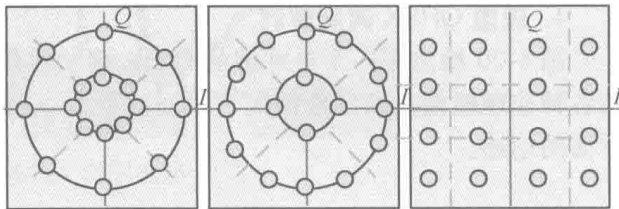


图 5-21 16QAM 星座图

在传统系统中,每个调制点对应一个星座图,但在后续 5G 通信系统中,则可能引入新的复合星座图,将调制与编码相结合,单个星座图点可以接受多个信号映射,如图 5-23 所示。

#### 2. QAM 调制实现框图

QAM 调制在实现时,将输入的二进制序列经过串/并转换,以输出速率减半的两路并行序列,再分别经过 2 电平到 L 电平的变换,形成 L 电平的基带信号。与 BPSK 等一样,QAM 信号也需要抑制已调信号的带外辐射,经过预调制 LPF,再分别与同相载波和正交载波相乘,形成两路幅度调制信号,最后将两路信号相加即可得到 QAM 信号(见图 5-24)。