

中国通信学会普及与教育工作委员会推荐教材



21世纪高职高专电子信息类规划教材

21 Shiji Gaozhi Gaozhuan Dianzi Xinxilei Guihua Jiaocai

移动通信 技术与设备 (第2版)

解文博 解相吾 主编

*Electronic
Information*



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

第2章

移动通信的编码与调制

【本章内容简介】本章着重介绍移动通信系统所涉及的主要技术，通过学习调制解调技术、编码技术、交织技术，了解这些技术的基本概念、主要特点、应用范围和方式，为掌握移动通信系统的工作原理和方法打下坚实的基础。

【学习重点与要求】重点掌握调制解调技术、编码技术的基本概念、主要特点和应用范围，了解 MSK 类调制的性能，掌握空时编码的基本特性。

移动通信是目前国内外发展最快的新技术之一，它的主要特点是高技术含量大、新技术层出不穷。下面介绍在当前移动通信中采用的一些典型的、具有代表性的通用技术。

对二进制的介绍。

2.1 数字调制技术

第一代蜂窝移动通信系统采用的是模拟调频 (FM) 技术，传输模拟语音，但其信令系统却是数字的，采用 2FSK 数字调制技术。第二代数字蜂窝移动通信系统，传送的语音都是经过数字语音编码和信道编码后的数字信号。GSM 系统采用 GMSK 调制，IS-54 系统和 PDC 系统采用 $\pi/4$ -DQPSK 调制，CDMA 系统 (IS-95) 的下行信道采用 QPSK 调制、上行信道采用 OQPSK 调制。第三代数字蜂窝系统将采用 MQAM 调制、平衡四相扩频调制 (BQM)、复四相扩频调制 (CQM) 和双四相扩频调制 (DQM) 技术。

所谓调制，是对信号源的编码信息 (信源) 进行处理，使其变为适合于信道传输形式的过程。信号源的编码信息中含有直流分量和频率较低的分量，称为基带信号。基带信号一般不能直接作为传输信号，必须把它变换为一个相对基带频率而言频率非常高的带通信号，以适合于信道传输，这个带通信号叫作已调信号，基带信号则称为调制信号。调制是通过改变高频载波的幅度、相位或频率，使其随着基带信号的变化而变化；而解调则是将基带信号从载波中提取出来的逆变换过程。

现代移动通信系统都使用数字调制。为了使数字信号在有限带宽的信道中传输，必须用数字信号对载波进行调制。实际应用中，在发送端用基带数字控制高频载波，把基带数字信号变换为频带数字信号，即数字调制；在接收端通过解调器把频带数字信号还原成基带数字信号，即解调。通常，把数字调制与解调合起来称为数字调制，把包括调制和解调过程的传输系统称为数字信号的频带传输系统。

图 2-1 所示为频带传输系统图。由图 2-1 可见，原始数字序列经基带信号形成器后变成适合于信道传输的基带信号 $s(t)$ ，然后送到键控器来控制射频载波的振幅、频率或相位，形成数字调制信号，并送至信道。在信道中传输的还有噪声，接收滤波器把叠加在噪声中的有用信号提取出来，并经过相应的解调器恢复出数字基带信号 $s(t)$ 或数字序列。

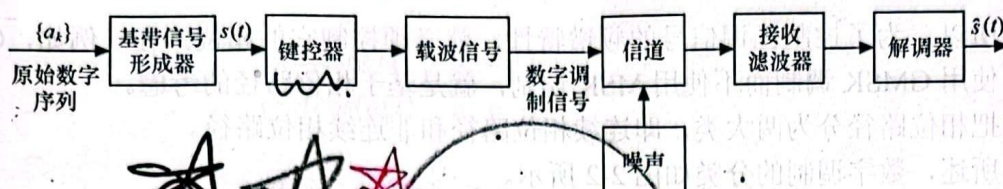


图 2-1 频带传输系统图

本节主要研究在实际中已经应用或将得到广泛应用的数字调制技术，即对二进制及多进制振幅键控、频移键控、相移键控数字调制技术的原理、频带特性及各种调制技术的性能比较进行全面论述。

2.1.1 数字调制技术的分类

一般而言，数字调制技术可分为两种类型：一是利用模拟方法实现数字调制，也就是把数字基带信号当作模拟信号的特殊情况来处理；二是利用数字信号的离散取值特点键控载波，从而实现数字调制。第二种技术通常称为键控法，例如，用基带数字信号对载波的振幅、频率及相位进行键控，便可获得振幅键控 (ASK)、频移键控 (FSK) 及相移键控 (PSK) 调制方式。也有同时改变载波振幅和相位的调制技术，如正交调幅 (QAM)。键控法一般由数字电路来实现，它具有调制变换速率快，调整测试方便，体积小，设备可靠性高等特点。

在数字调制中，所选择信号参量的可能变化状态数应与信息元数相对应。数字信息有二进制和多进制之分，因此，数字调制可分为二进制调制和多进制调制两种。在二进制调制中，信号参量只有两种可能取值；而在多进制调制中，信号参量可能有 $M(M>2)$ 种取值。一般而言，在码元速率一定的情况下， M 取值越大，则信息传输速率越高，但其抗干扰性能也越差。

在实际应用中，根据已调信号的结构形式又可分为线性调制和非线性调制两种。在线性调制中，已调信号表示为基带信号与载波信号的乘积，已调信号的频谱结构和基带信号的频谱结构相同，只不过搬移了一个频率位置。线性调制主要包括各种 PSK、QAM 等。这类调制技术不适宜于非线性移动无线信道，因为它们不能满足占用频带的要求；然而这些调制技术可用于线性移动无线信道。从基带频率变换到无线电载频以及放大到发射电平，都需要高度的线性，即低的失真，因此设计难度大，制造成本高。但随着放大器设计技术的新突破，实现了高效率且实用的线性放大器，使得移动通信无线系统中有效地使用线性调制方法成为可能。1987 年以后，QPSK 等线性调制技术开始得到广泛应用。

在非线性调制中，其射频已调信号具有恒定包络（连续相位）的特性，即恒定包络调制。已调信号的频谱结构和基带信号的乘积关系，使其频谱不是简单的频谱搬移。其优点是已调信号具有相对窄的功率谱和对放大设备没有线性的要求，可使用高效的 C 类功放，降低了功放成本。其中具有代表性的是最小移频键控 (MSK)、高斯滤波最小移频键控 (GMSK)、平滑调频 (TFM) 等。

在调制技术中，还要注意相位路径或相位轨迹。载波相位变化值是一个随时间变化的函数，记作 $\phi(t)$ 。 $\phi(t)$ 随时间 t 变化的轨迹称为相位路径或相位轨迹。一个已调信号频谱高频滚降特性与其相位路径有着紧密的关系，相位路径不同，对应的已调信号频谱高频滚降速度



也不同。所以，为了控制已调信号的频谱特性，就必须控制它的相位路径。例如，GSM 系统为什么使用 GMSK 调制而不使用 MSK 调制，就是基于相位路径的考虑。

通常把相位路径分为两大类，即连续相位路径和非连续相位路径。

综上所述，数字调制的分类如图 2-2 所示。

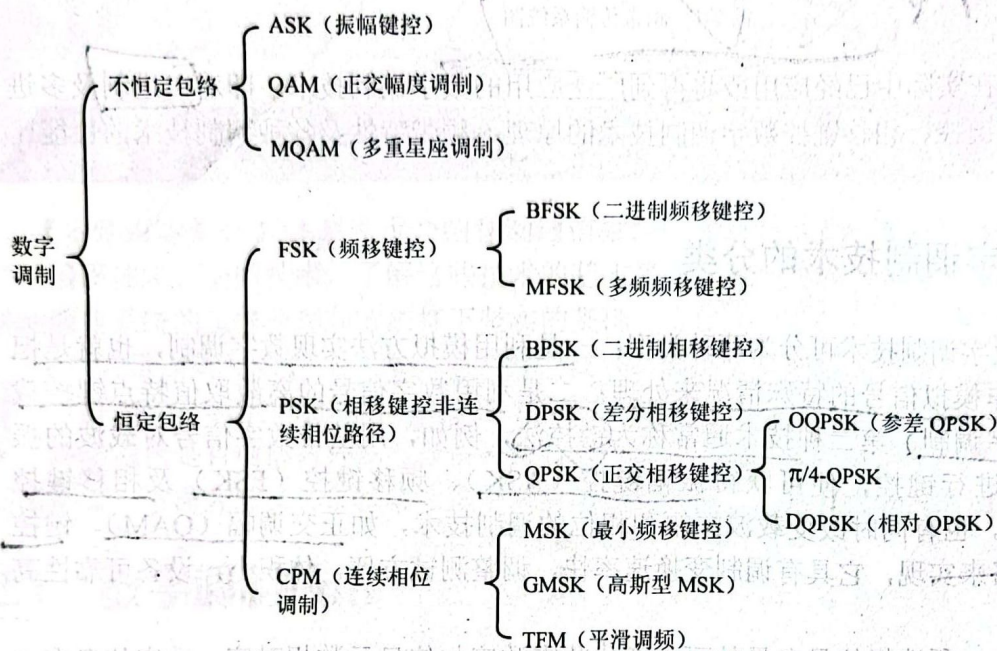


图 2-2 数字调制的分类

2.1.2 线性调制技术

线性调制主要有相移键控 (PSK) 调制、正交相移键控 (QPSK) 和 $\pi/4$ -DQPSK 调制。

1. 相移键控 (PSK) 调制

以基带数据控制载波的相位称为数字相位调制，数字相位调制又叫相移键控 (Phase Shift Keying, PSK)。二进制相移键控记作 2PSK 或 BPSK，多进制相移键控记作 MPSK，它们是利用载波相位的变化来传送数字信息的。通常，把它们分为绝对相移 (PSK) 和相对相移 (DPSK) 两种。

绝对码和相对码是相移键控的基础。绝对码是以基带信号码元的电平直接表示数字信息，如果用高电平代表“1”，低电平代表“0”，则如图 2-3 中 $\{a_n\}$ 所示。相对码（差分码）是用基带信号码元的电平相对前一码元的电平有无变化来表示数字信息的。假若相对电平有跳变表示“1”，无跳变表示“0”，由于初始参考电平有两种可能，因此相对码也有两种波形，如图 2-3 中 $\{b_n\}_1$ 和 $\{b_n\}_2$ 所示。显然 $\{b_n\}_1$ 、 $\{b_n\}_2$ 相位相反，当用二进制数码表示波形时，它们互为反码。

绝对相移是利用载波的相位偏移（指某一码元所对应的已调信号与参考载波的初相差）直接表示数据信号的相移方式。

设输入比特率为 $\{a_n\}$ ， $a_n = \pm 1$ ， $n = -\infty \sim +\infty$ ，则 PSK 的信号形式为



$$s(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_c t) & a_n = +1 \\ -A \cos(\omega_c t) & a_n = -1 \end{cases} \quad nT_b \leq t < (n+1)T_b$$

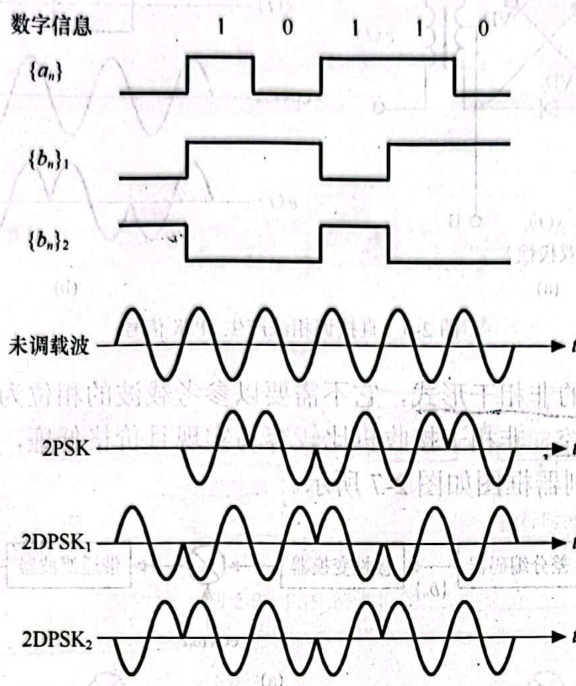


图 2-3 二相调相波形

即当输入为“+1”时，对应的信号 $s(t)$ 附加相位为“0”；当输入为“-1”时，对应的信号 $s(t)$ 附加相位为“ π ”。其信号波形如图 2-4 所示。

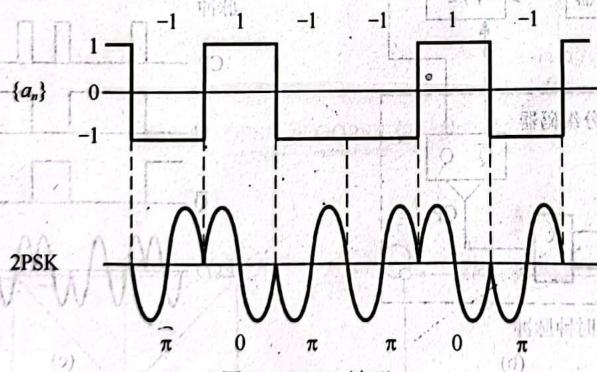


图 2-4 PSK 波形

图 2-5 所示为 PSK 调制框图。图中的乘法器完成基带信号到 2PSK 载波调制信号的变换过程，也就是用双极性数字基带信号 $s(t)$ 与载波直接相乘。这种产生 2PSK 的方法称为直接调相法，其原理图及波形图如图 2-6 所示。根据规定，必须使 $s(t)$ 为正电平时代表“0”，负电平时代表“1”。若原始数字信号是单极性码，则必须先进行极性变换再与载波相乘。图中 A 点电位高于 B 点电位时， $s(t)$ 代表“0”，二极管 VD_1 、 VD_3 导通， VD_2 、 VD_4 截止，载波经变压器正向输出 $e(t) = \cos \omega_c t$ 。A 点电位低于 B 点电位时， $s(t)$ 代表“1”，二极管 VD_2 、 VD_4 导通， VD_1 、 VD_3 截止，载波经变压

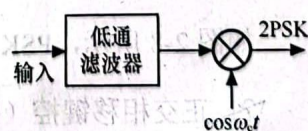


图 2-5 PSK 调制框图



器反向输出, $e(t) = -\cos \omega_c t = \cos(\omega_c t - \pi)$, 即绝对移相 π 。

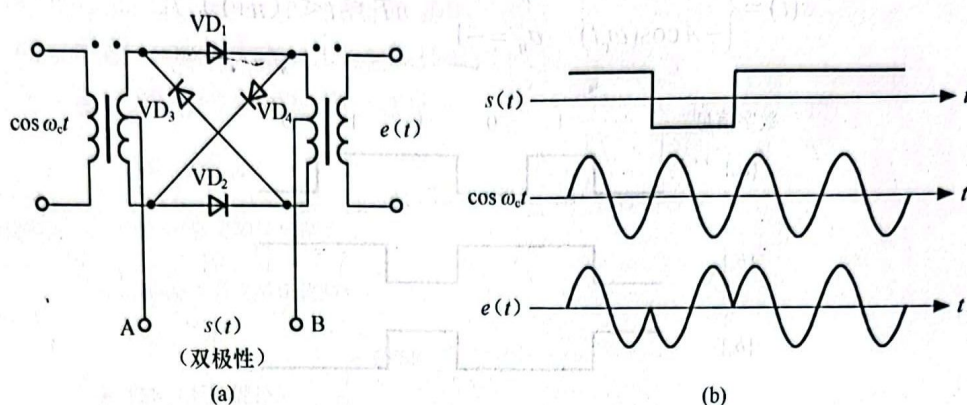


图 2-6 直接调相法产生 2PSK 信号

DPSK 是相移键控的非相干形式, 它不需要以参考载波的相位为基准, 所以称为差分移键控, 或相对相移键控。非相干接收机比较容易实现且价格低廉, 因此, 在无线通信中被广泛使用。DPSK 调制器框图如图 2-7 所示。

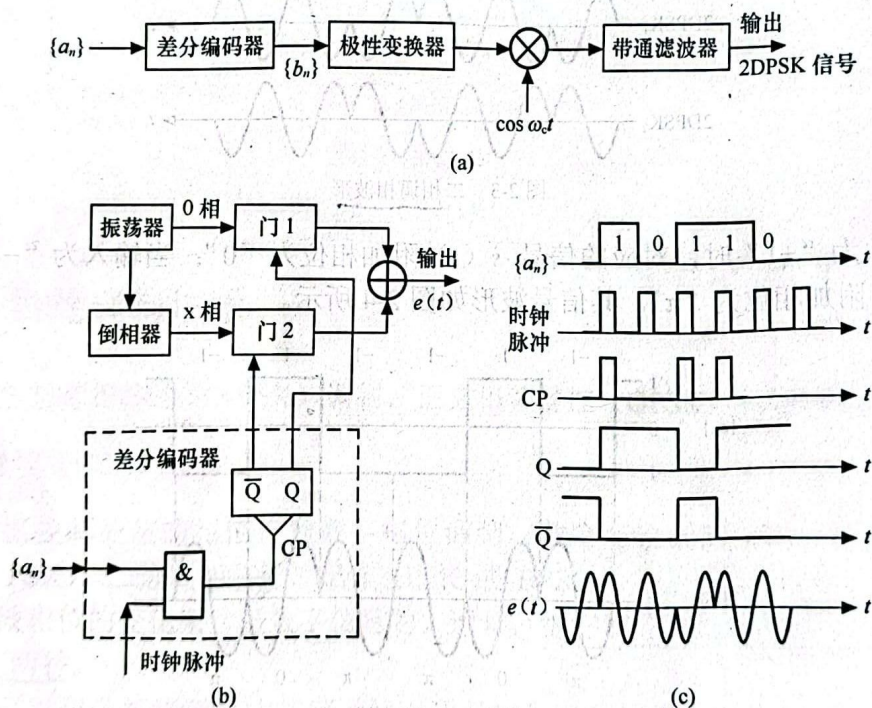


图 2-7 DPSK 调制器框图

如图 2-8 所示, PSK 可采用相干解调和差分相干解调。

2. 正交相移键控 (QPSK) 调制和交错正交相移键控 (OQPSK) 调制

图 2-9 所示为典型正交相移键控调制 (QPSK) 原理框图。图 2-9 (a) 所示为正交相移键控 (QPSK) 调制原理框图, 图 2-9 (b) 所示为交错正交相移键控 (OQPSK) 调制原理框图。

QPSK 又称四相键控, 可记为 4PSK, 它有 4 种相位状态, 各自对应于四进制的 4 种数

据(码元),即 00、01、10、11。由于每一种载波相位代表两个比特信息,所以每个四进制码元又被称为双比特码元。从图 2-9 (a) 中可以看到, QPSK 调制信号可视为 2 路正交载波经 PSK 调制后的信号叠加,在这种叠加过程中所占用的带宽将保持不变。因此在一个调制符号中传输两个比特,正交相移键控(QPSK)比 PSK 的带宽效率高两倍。载波的相位为 4 个间隔相等的值 $\pm\pi/4$, $\pm3\pi/4$, 其相位的星座图如图 2-10 (a) 所示;也可以将相位的星座图旋转 45° , 得到图 2-10 (b), 其相位值是 $0, \pm\pi/2, \pi$, 为交错正交相移键控(OQPSK)调制相位的星座图。

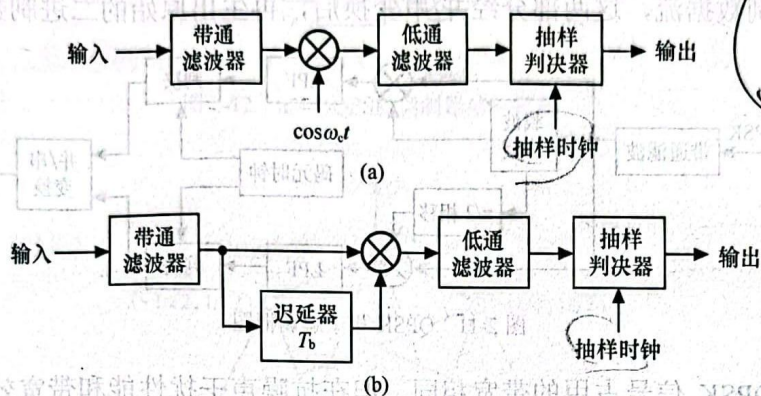


图 2-8 PSK 解调框图

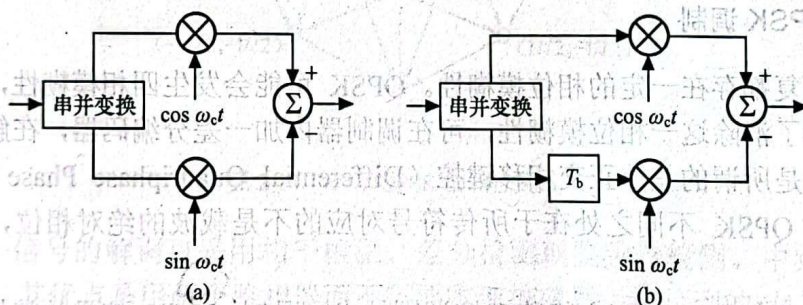


图 2-9 QPSK 和 OQPSK 信号的产生

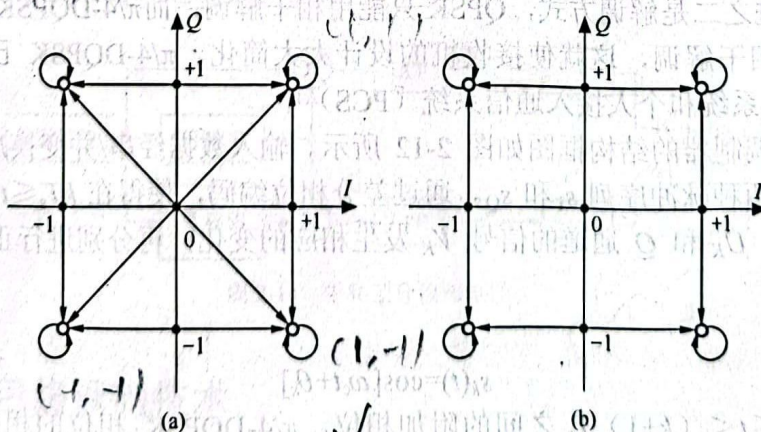


图 2-10 QPSK 和 OQPSK 相位星座图

OQPSK 是 Offset QPSK 的缩写,称为交错 QPSK,也称偏移四相相移键控。它的 I 、 Q 两支路在时间上错开一个码元的时间 T_b 进行调制,这样可避免在 QPSK 中,码元转换在两



支路总是同时的,因而在转换时刻,载波可能会产生 180° 的相位跳变,在 OQPSK 中,两支路码元不可能同时转换,因而它最多只能有 $\pm 90^\circ$ 的相位跳变。相位跳变小,所以它的频谱特性要比 QPSK 的好,对出现边瓣和频带加宽等有害现象不敏感,可以得到高效率的放大,其他特性均与 QPSK 差不多,其相位的星座图如图 2-10 (b) 所示。

QPSK 和 OQPSK 信号的解调与 PSK 解调相同,都可以采用相干解调。QPSK 系统解调器原理框图如图 2-11 所示。图中对输入 QPSK 信号分别用同相和正交载波进行解调。解调用的相干载波用载波恢复电路从接收信号中恢复。解调器的输出提供一个判决电路,产生同相和正交的 2 进制数据流,这两部分经并/串变换后,再生出原始的二进制数据流。

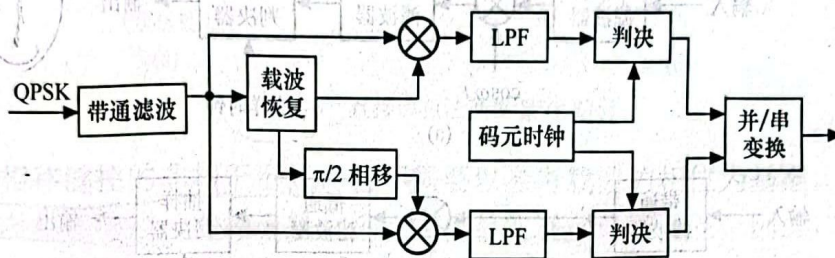


图 2-11 QPSK 相干解调框图

QPSK 和 OQPSK 信号占用的带宽相同,但在抗噪声干扰性能和带宽效率、带限性上, OQPSK 均优于 QPSK, 所以 OQPSK 信号非常适合于移动通信系统。

3. $\pi/4$ -DQPSK 调制

通常载波恢复都存在一定的相位模糊性。QPSK 可能会发生四相模糊性,从而引起相当大的误码率。为了消除这一相位模糊性,可在调制器内加一差分编码器,在解调器中加一差分译码器,这就是所谓的差分正交相移键控 (Differential Quadriphase Phase Shift Keying, DQPSK),它与 QPSK 不同之处在于所传符号对应的不是载波的绝对相位,而是相位的改变,即相位差。

$\pi/4$ -DQPSK 调制是一种正交相移键控调制技术,是对 QPSK 信号的特性进行改进的一种调制方式。改进之一是将 QPSK 的最大相位跳变从 $\pm\pi$ 降为 $\pm 3\pi/4$,从而改善了 $\pi/4$ -DQPSK 的频谱特性。改进之二是解调方式, QPSK 只能用相干解调,而 $\pi/4$ -DQPSK 既可以用相干解调,也可以用非相干解调,这就使接收机的设计大大简化。 $\pi/4$ -DQPSK 已用于美国的 IS 136 数字蜂窝通信系统和个人接入通信系统 (PCS) 中。

$\pi/4$ -DQPSK 调制器的结构框图如图 2-12 所示。输入数据经串/并变换后得到同相通道和正交通道 Q 的两种脉冲序列 s_I 和 s_Q 。通过差分相位编码,使得在 $kT_s \leq t < (k+1)T_s$ 时间内, I 通道的信号 U_k 和 Q 通道的信号 V_k 发生相应的变化,再分别进行正交调制后合成为 $\pi/4$ -DQPSK 信号。

设已调信号

$$s_k(t) = \cos[\omega_c t + \theta_k]$$

式中, θ_k 为 $kT_s \leq t < (k+1)T_s$ 之间的附加相位。 $\pi/4$ -DQPSK 相位的相位关系如图 2-13 所示。

在码元转换时刻, $\pi/4$ -DQPSK 的相位跳变量只有 $\pm\pi/4$ 和 $\pm 3\pi/4$ 四种取值。从图 2-13 中可看出相位跳变必定在“○”组和“◎”组之间跳变。即在相邻码元,仅由“○”组



到“◎”组相位点（或“◎”组到“○”组）的跳变，而不会在同组内跳变。 $\pi/4$ -DQPSK 调制是一种包络不恒定的线性调制。

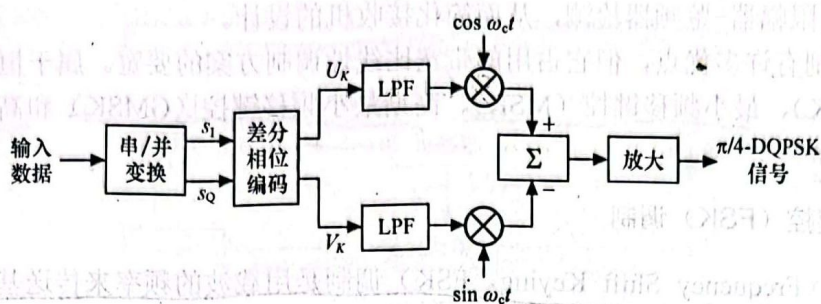


图 2-12 $\pi/4$ -DQPSK 调制器结构框图

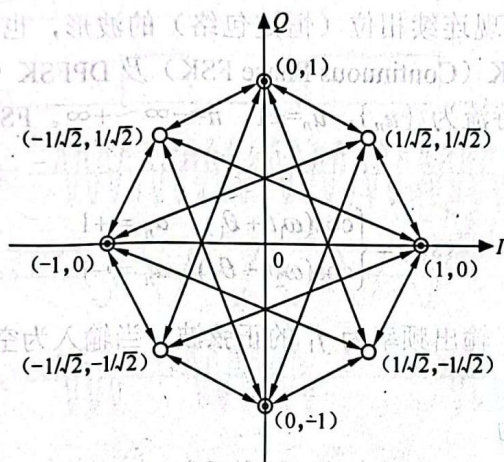


图 2-13 $\pi/4$ -DQPSK 的相位关系

$\pi/4$ -DQPSK 信号的解调可采用相干检测、差分检测或鉴频器检测。中频差分检测框图如图 2-14 所示。其优点是用两个鉴相器而不需要本地振荡器。接收到的 $\pi/4$ -DQPSK 信号先变频到中频 (IF)，然后经带通滤波器，由 X_k 和 Y_k 抽样、判决后获得的结果再经限幅器和并/串变换后，再生出原始的二进制数据流。

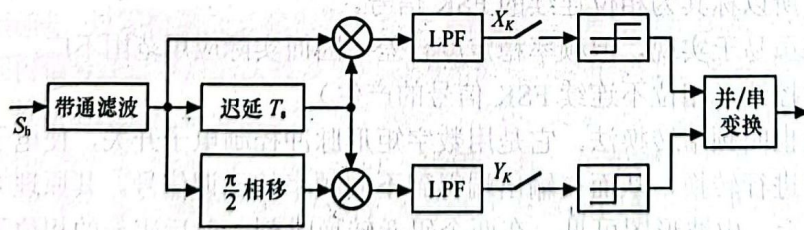


图 2-14 中频差分检测框图

2.1.3 恒包络调制技术

移动通信系统在许多实际应用时都采用非线性调制方法，所谓的恒包络调制 (Constant Envelope Modulation) 就是不管调制信号如何改变，都保持载波的幅度恒定。恒包络调制具有可以满足多种应用环境的优点：



- ① 可使用功率高的 C 类放大器, 不致引起发射信号占用频谱增大;
- ② 带外辐射低, 可达 $-60 \sim -70$ dB;
- ③ 可使用限幅器-鉴频器检测, 从而简化接收机的设计。

恒包络调制有许多优点, 但它占用的带宽比线性调制方案的要宽。属于恒包络调制的频移键控 (FSK)、最小频移键控 (MSK)、高斯最小频移键控 (GMSK) 和高斯滤波的频移键控 (GFSK)。

1. 频移键控 (FSK) 调制

频移键控 (Frequency Shift Keying, FSK) 调制是用载波的频率来传送基带数据信号, 也就是用所传送的基带数据信号控制载波的频率。在频移键控调制中, 载波的幅度恒定不变, 其载波信号的频率随着两种可能的状态 (高频率和低频率即二进制的 “1” 和 “0”) 切换。FSK 信号有可能呈现连续相位 (恒定包络) 的波形, 也可能呈现不连续相位的波形, 将它们分别记为 CPFSK (Continuous Phase FSK) 及 DPFSK (Discrete Phase FSK)。

设输入到调制器的比特流为 $\{u_n\}$, $u_n = \pm 1$, $n = -\infty \sim +\infty$ 。FSK 的输出信号形式 (第 n 个比特区间) 为

$$s(t) = \begin{cases} \cos(\omega_1 t + \theta_1) & a_n = +1 \\ \cos(\omega_2 t + \theta_2) & a_n = -1 \end{cases}$$

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 f_2 的正弦波。

FSK 信号的带宽大约为

$$B = |f_2 - f_1| + 2f_s$$

FSK 的调制方法有模拟调制法和数字键控法, 它们分别对应着相位连续的 FSK 和相位不连续的 FSK。

(1) 直接调频法 (相位连续 FSK 信号的产生)

直接调频法是用数字基带矩形脉冲直接改变振荡器的频率, 使输出得到不同频率的已信号。用此方法产生的 FSK 信号对应着两个频率的载波, 在码元转换时刻, 两个载波相能够保持连续, 所以称其为相位连续的 FSK 信号。

直接调频法虽易于实现, 但频率稳定度较差, 因而实际应用范围不广。

(2) 频率键控法 (相位不连续 FSK 信号的产生)

频率键控法也叫频率转换法, 它是用数字矩形脉冲控制电子开关, 使电子开关在两个立的振荡器之间进行转换, 从而在输出端得到不同频率的已调信号。其原理方框图及各点形如图 2-15 所示。由波形图可见, 在两个码元转换时刻, 前后码元的相位不连续, 这种型的信号为相位不连续的 FSK 信号。

由图 2-15 可知, 数字信号 “1” 时, 正脉冲使门电路 1 接通, 门 2 断开, 输出频率 f_1 ; 数字信号为 “0” 时, 门 1 断开, 门 2 接通, 输出频率为 f_2 。如果产生 f_1 和 f_2 的两个荡器是独立的, 则输出的 FSK 信号的相位是不连续的。这种方法的特点是转换速度快、形好、频率稳定度高、电路不很复杂, 所以得到广泛应用。

数字调频信号的解调方法很多, 可以分为线性鉴频法和分离滤波法两大类。线性鉴频有模拟鉴频法、过零检测法、差分检测法等; 分离滤波法又包括相干检测法、非相干检



法、动态滤波法等。非相干检测的具体解调电路是包络检测法，相干检测的具体解调电路是同步检波法。下面对过零检测法、包络检测法及同步检波法加以介绍。

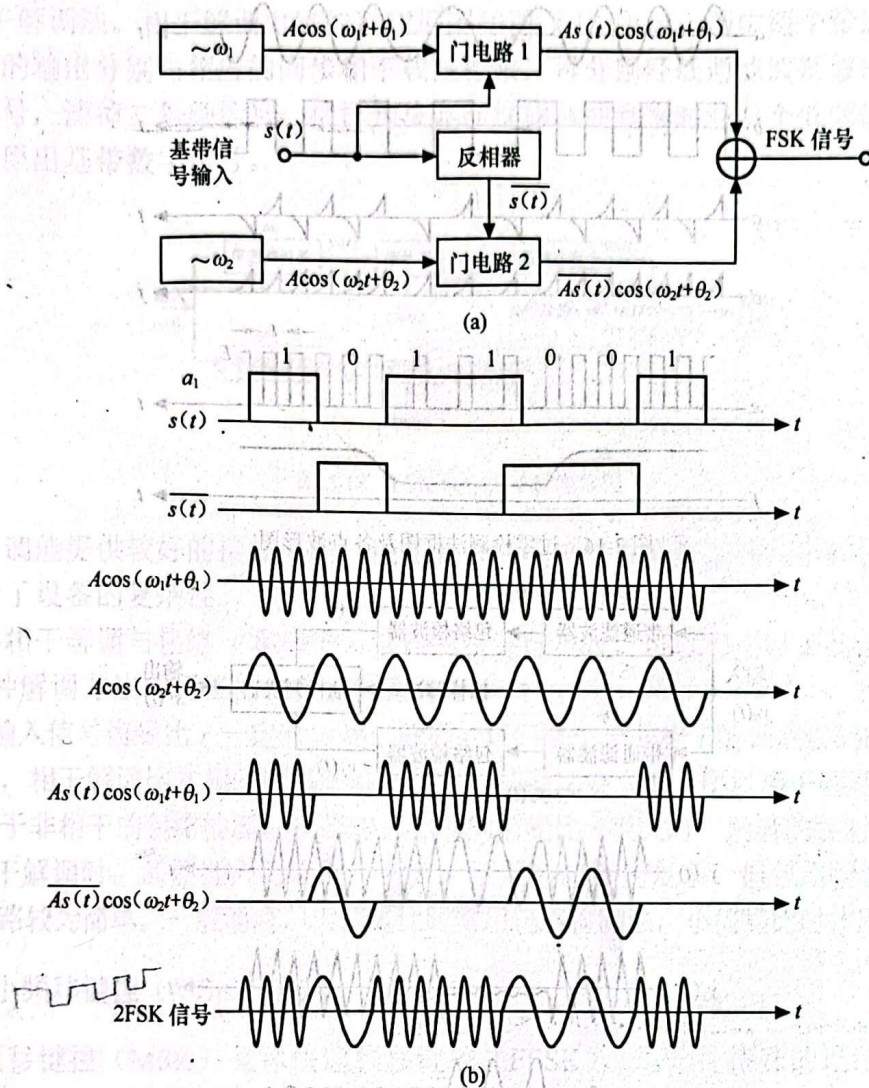


图 2-15 相位不连续 FSK 信号的产生和各点波形

① 过零检测法。过零检测法又称为零交点法、计数法，其原理框图及各点波形图如图 2-16 所示。单位时间内信号经过零点的次数多少可以用来衡量频率的高低。数字调频波的过零点随不同载频而异，故检出过零点可以得到关于频率的差异，这就是过零检测法的基本思想。

考虑一个相位连续的 FSK 信号 a ，经放大限幅得到一个矩形方波 b ，经微分电路得到双向微分脉冲 c ，经全波整流得到单向尖脉冲 d ，单向尖脉冲的密集程度反映了输入信号的频率高低，尖脉冲的个数就是信号过零点的数目。单向脉冲触发一脉冲发生器，产生一串幅度为 E 、宽度为 t 的矩形归零脉冲 e 。脉冲串 e 的直流分量代表着信号的频率，脉冲越密直流分量越大，反映着输入信号的频率越高。经低通滤波器就可得到脉冲串 e 的直流分量 f 。这样，就完成了频率-幅度变换，从而再根据直流分量幅度上的区别还原出数字信号“1”和“0”。

② 非相干（包络）解调法。图 2-17 所示为非相干解调器框图及波形图。用两个窄带的分路滤波器分别滤出中心频率为 f_1 及 f_2 的高频脉冲，经包络检测后分别取出它们的包络。把两路输出同时送到抽样判决器进行比较，从而判决输出基带数字信号。

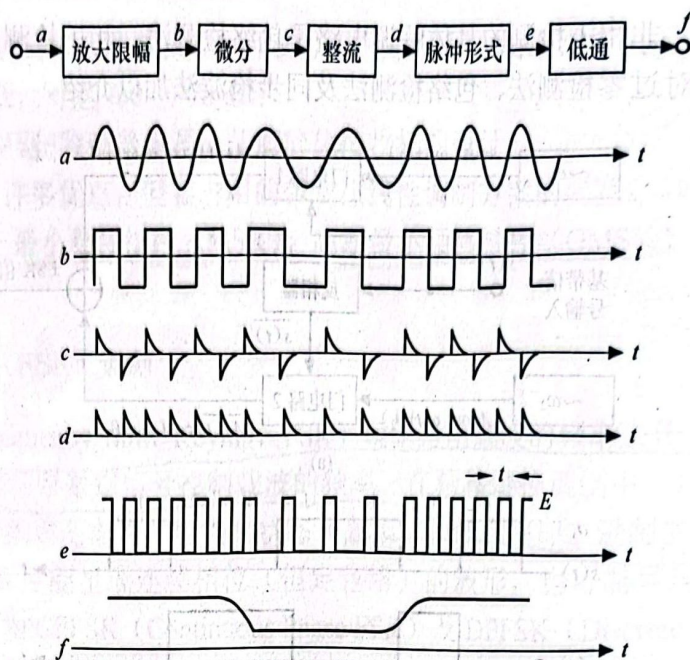


图 2-16 过零检测法框图及各点波形图

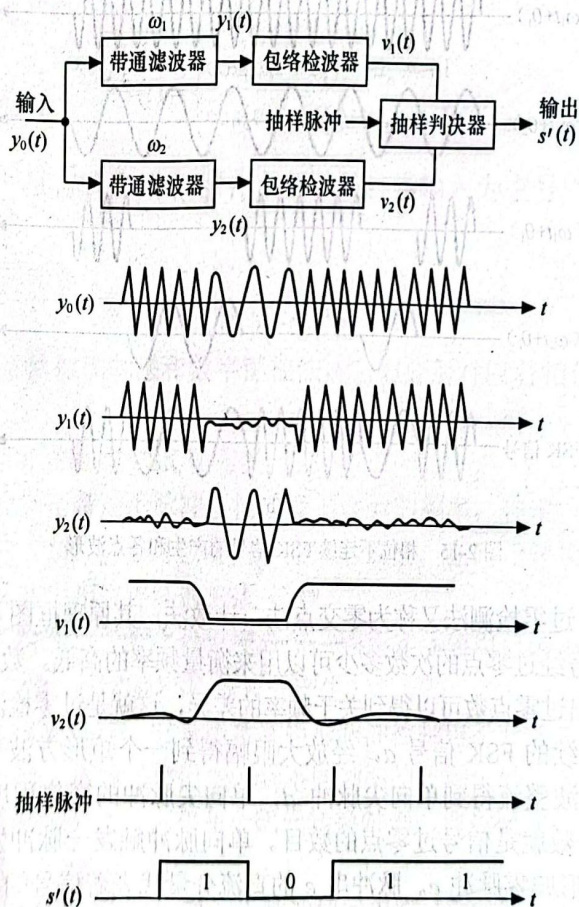


图 2-17 FSK 信号包络检波框图及波形图

设频率 f_1 代表数字信号“1”， f_2 代表数字信号“0”，则抽样判决器的判决准则应为

$$\begin{cases} v_1 > v_2 & \text{即 } v_1 - v_2 > 0, \text{ 判为 } 1 \\ v_1 < v_2 & \text{即 } v_1 - v_2 < 0, \text{ 判为 } 0 \end{cases}$$



式中, v_1 、 v_2 分别为抽样时刻两个包络检波器的输出值。这里, 抽样判决器要比较 v_1 、 v_2 大小, 或者说把差值 ($v_1 - v_2$) 与零电平比较, 因此, 有时称这种比较判决器的判决门限为零电平。

③ 相干解调法。相干解调电路的原理框图如图 2-18 所示。图中两个带通滤波器起分路作用。它们的输出分别与相应的同步相干载波相乘, 再分别经低通滤波器取出含基带数字信息的低频信号, 滤掉二倍频信号, 抽样判决器在抽样脉冲到来时对两个低频信号进行比较判决, 即可还原出基带数字信号。

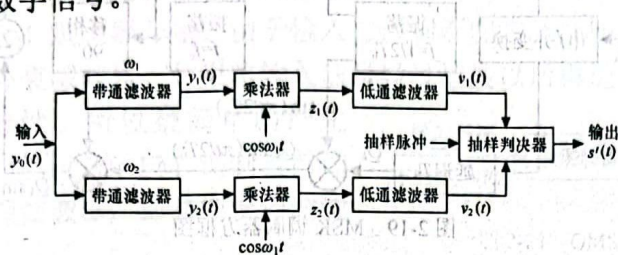


图 2-18 FSK 信号相干检测框图

相干解调能提供较好的接收性能, 但是要求接收机提供具有准确频率和相应的相干参考电压, 增加了设备的复杂性。

通过将相干解调与包络 (非相干) 解调系统进行比较, 可以得出以下几点。

① 两种解调方法均可工作在最佳门限电平。

② 在输入信号信噪比 r 一定时, 相干解调的误码率小于非相干解调的误码率; 当系统的误码率一定时, 相干解调比非相干解调对输入信号的信噪比要求低。所以相干解调 FSK 系统的抗噪声性能优于非相干的包络检测。但当输入信号的信噪比 r 很大时, 两者的相对差别不明显。

③ 相干解调时, 需要插入两个相干载波, 因此电路较为复杂, 但包络检测就无需相干载波, 因而电路较为简单。一般而言, 大信噪比时常用包络检测法, 小信噪比时才用相干解调法。

2. 最小频移键控 (MSK) 调制

最小频移键控 (MSK) 又称快速频移键控 (FFSK), 是一种特殊的连续相位的频移键控 (FSK) 调制。所谓“快速”二字, 是指这种调制方式对于给定的频带, 它能比 2PSK 传输更高速的数据; 而“最小”二字指的是这种调制方式能以最小的调制指数 ($h=0.5$) 获得正交的调制信号。

MSK 是一种特殊形式的 FSK, 其频差是满足两个频率相互正交 (即相关函数等于 0) 的最小频差, 并要求 FSK 信号的相位连续, 其频差 $\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{1}{2T_b}$, 调制指数为

$$h = \frac{\Delta f}{1/T_b} = 0.5$$

$$h = \frac{\Delta f}{1/T_b} = 0.5$$

式中, T_b 为输入数据流的比特宽度。

MSK 的信号表达式为

$$s(t) = \cos \left[\omega_c t + \frac{\pi}{2T_b} a_k t + X_k \right]$$

式中, X_k 是保证 $t=kT_b$ 时相位连续而加入的相位常量。

$$s(t) = \cos \left[\omega_c t + \frac{\pi}{2T_b} a_k t + X_k \right]$$





MSK 信号调制器框图如图 2-19 所示。MSK 是一种高效的调制方法, 特别适合通信系统中使用。它有很好的特性, 如恒包络、频谱利用率高、误码低和自同步性能

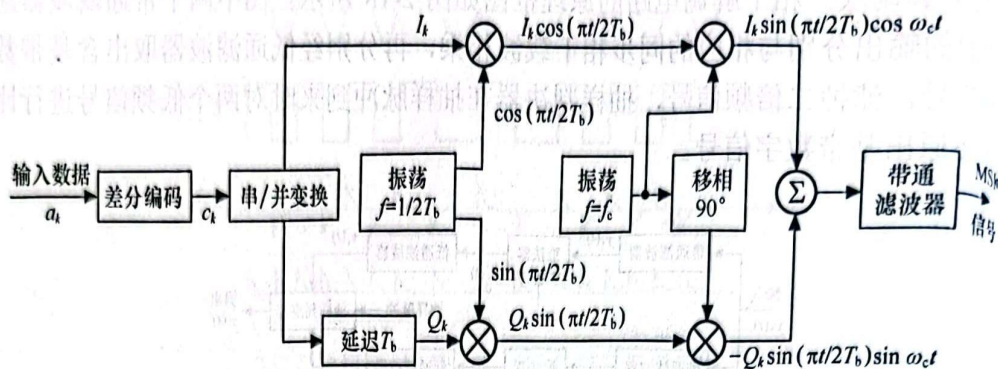


图 2-19 MSK 调制器方框图

产生 MSK 信号的步骤如下:

- ① 对输入数据序列进行差分编码;
- ② 把差分编码器的输出数据用串/并变换器分成两路, 并相互交错一个比特宽度 T ;
- ③ 用加权函数 $\cos(\pi t/2T_b)$ 和 $\sin(\pi t/2T_b)$ 分别对两路数据进行加权;
- ④ 用两路加权后的数据分别对正交载波 $\cos \omega_c t$ 和 $\sin \omega_c t$ 进行调制;
- ⑤ 把两路输出信号进行叠加。

综合以上分析可知, MSK 信号必须具有以下特性:

- ① 已调信号的振幅是恒定的;
- ② 信号的频率偏移严格地等于 $\pm 1/(4T_b)$, 相应的调制指数 $h = \Delta f T_b = (f_2 - f_1) T_b = 1/2$;
- ③ 以载波相位为基准的信号相位在一个码元期间内准确地线性变化 $\pm \pi/2$;
- ④ 在一个码元期间内, 信号应包括 $1/4$ 载波周期的整数倍;
- ⑤ 在码元转换时刻, 信号的相位是连续的, 或者说信号的波形没有突跳。

MSK 信号可以采用鉴频器解调, 也可以采用相干解调。相干解调的框图如图 2-20 示, 图中采用平方环来提取相干载波。

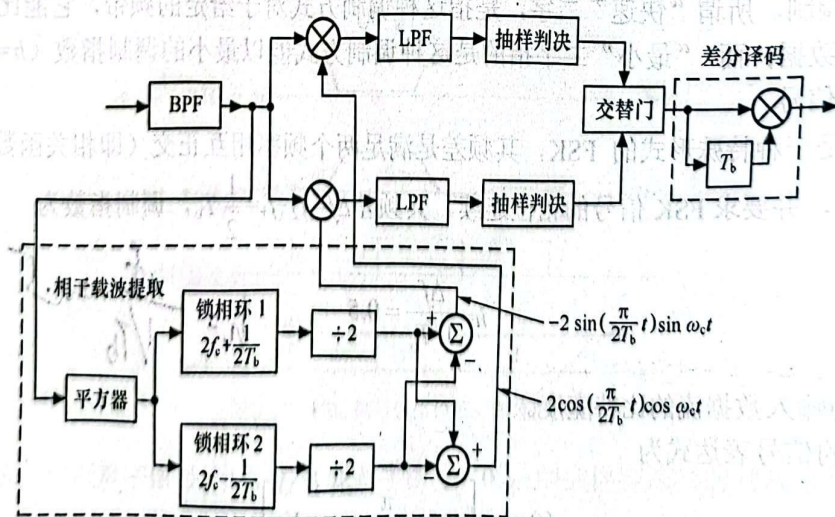


图 2-20 MSK 相干解调框图

MSK 与 FSK 性能相比, 由于各支路的实际码元宽度为 $2T_b$, 其对应的低通滤波器





减少为原带宽的 1/2, 从而使 MSK 的输出信噪比为原来的两倍。

3. 高斯型最小频移键控 (GMSK) 调制

GMSK 调制方式能满足移动通信环境下对邻道干扰的严格要求, 通常将输入端接有低通滤波器的 MSK 调制器称为高斯最小频移键控 (GMSK)。GMSK 是由 MSK 演变来的一种简单的二进制调制方法, 是连续相位的恒包络调制。

MSK 信号可由 FM 调制器产生, 由于输入二进制不归零脉冲序列具有较宽的频谱, 从而导致已调信号的带外衰减较慢。如果将输入信号经过滤波以后再送入 FM 调制, 必然会改善已调信号的带外特性。所以最简单的产生 GMSK 信号的方法就是通过 FM 调制器前加入一个基带信号预处理滤波器, 即高斯低通滤波器, 如图 2-21 所示。



图 2-21 GMSK 信号产生的原理图

这种 GMSK 调制技术能将基带信号变换成高斯脉冲信号, 其包络无陡峭沿, 亦无拐点, 因此相位路径得以进一步平滑, 如图 2-22 所示, GMSK 早已被确定为欧洲新一代移动通信的标准调制方式, 应用在 GSM 等系统中。

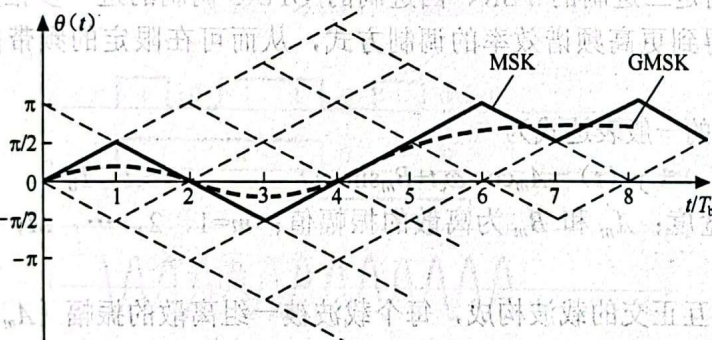


图 2-22 GMSK 信号的相位轨迹

GMSK 信号的解调可以用同 MSK 一样的正交相干解调。在相干解调中最为重要的是相干载波的提取, 这在移动通信的环境中是比较困难的, 因而移动通信系统通常采用差分解调和鉴频器解调等非相干解调的方法。图 2-23 所示为 1 bit 延迟差分检测解调器的原理框图。

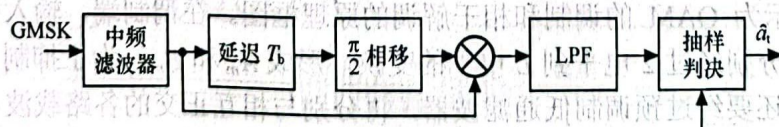


图 2-23 1 bit 延迟差分检测解调器的框图

4. 高斯滤波的频移键控 (GFSK)

高斯滤波的频移键控 (GFSK) 的原理框图如图 2-24 所示。

GFSK 与 GMSK 类似, 从图 2-24 可以看出, 它是连续相位的恒包络调制。GFSK 汲取了 GMSK 的优点, 但放松了对调制指数的要求, 没有 MSK 和 GMSK 那样严格 (MSK 和 GMSK 要求调制指数 $h=0.5$), 通常调制指数 $h=0.4\sim 0.7$ 即可。GFSK 调制方式主要应用于



数字无绳电话系统 CT-2 中。

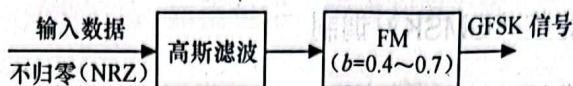


图 2-24 GFSK 调制的原理框图

2.1.4 正交振幅调制技术

通过前面的学习可知，单独使用振幅或相位携带信息时，不能最充分地利用信号平面。多进制振幅调制时，矢量端点在一条轴上分布；多进制相位调制时，矢量端点在一个圆上分布。随着进制数 M 的增大，这些矢量端点之间的最小距离也随之减小，但如果我们充分利用整个平面，将矢量端点重新合理地分布，则有可能在不减小最小距离的情况下，增加号矢量的端点数目。从上述概念出发，引出振幅与相位相结合的调制方式，这种方式通常为数字复合调制方式。一般的复合调制称为幅相键控 (APK)，两个正交载波幅相键控称正交振幅调制 (QAM)。

正交振幅调制是二进制的 PSK、四进制的 QPSK 调制的进一步推广，是通过相位、振幅的联合控制得到更高频谱效率的调制方式，从而可在限定的频带内传输更高速率的数据。

正交振幅调制的一般表达式为

$$y(t) = A_m \cos \omega_c t + B_m \sin \omega_c t \quad 0 \leq t < T_b$$

式中， T_b 为码元宽度； A_m 和 B_m 为离散的振幅值； $m=1, 2, \dots, M$ ； M 为 A_m 和 B_m 的个数。

上式由两个相互正交的载波构成，每个载波被一组离散的振幅 $\{A_m\}$ 、 $\{B_m\}$ 所调制，故称这种调制方式为正交振幅调制。QAM 中的振幅 A_m 和 B_m 可以表示为

$$\begin{cases} A_m = d_m A \\ B_m = e_m A \end{cases}$$

式中， A 是固定的振幅， (d_m, e_m) 由输入数据确定。 (d_m, e_m) 决定了已调 QAM 信号在信号空间中的坐标点。

图 2-25 所示为 QAM 的调制和相干解调的原理框图。在调制端，输入数据经过串并转换后分为两路，分别经过 2 电平到 L 电平的变换，形成 A_m 和 B_m 。为了抑制已调信号的带外辐射， A_m 和 B_m 还要经过预调制低通滤波器，再分别与相互正交的各路载波相乘，形成两路 ASK 调制信号。最后将两路信号相加就可以得到已调输出信号 $y(t)$ 。

在接收端，输入信号与本地恢复的两个正交载波信号相乘以后，经过低通滤波器，多电平判决， L 电平到 2 电平转换，再经过并串变换就得到输出数据序列。

对 QAM 调制而言，常用的设计准则是在信号功率相同的条件下，选择信号空间中信号点之间距离最大的信号结构，当然还要考虑解调的复杂性。所以如何设计 QAM 信号的结构，不仅影响到已调信号的功率谱特性，而且影响已调信号的解调及其性能。

为便于分析，图 2-26 所示为四电平 QAM 的调制解调原理框图中各点的基本波形。

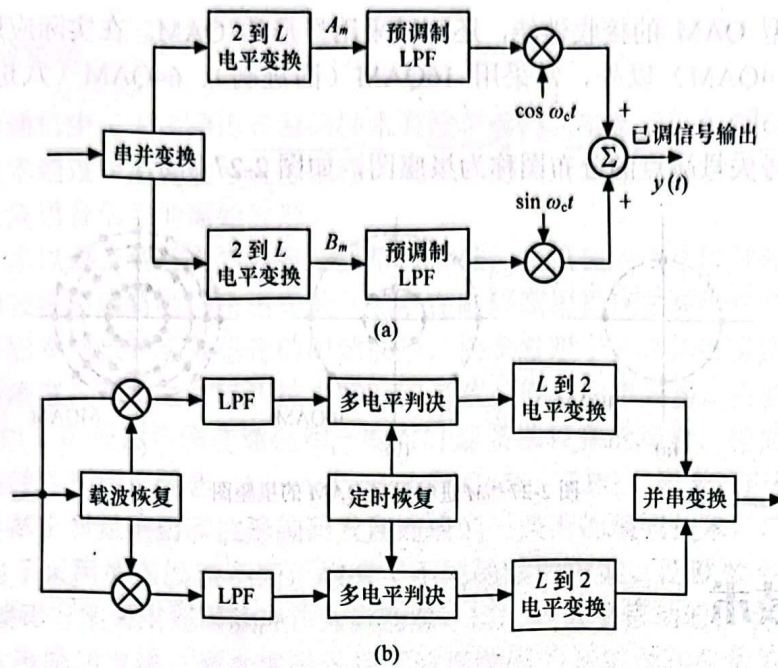


图 2-25 QAM 调制解调原理图

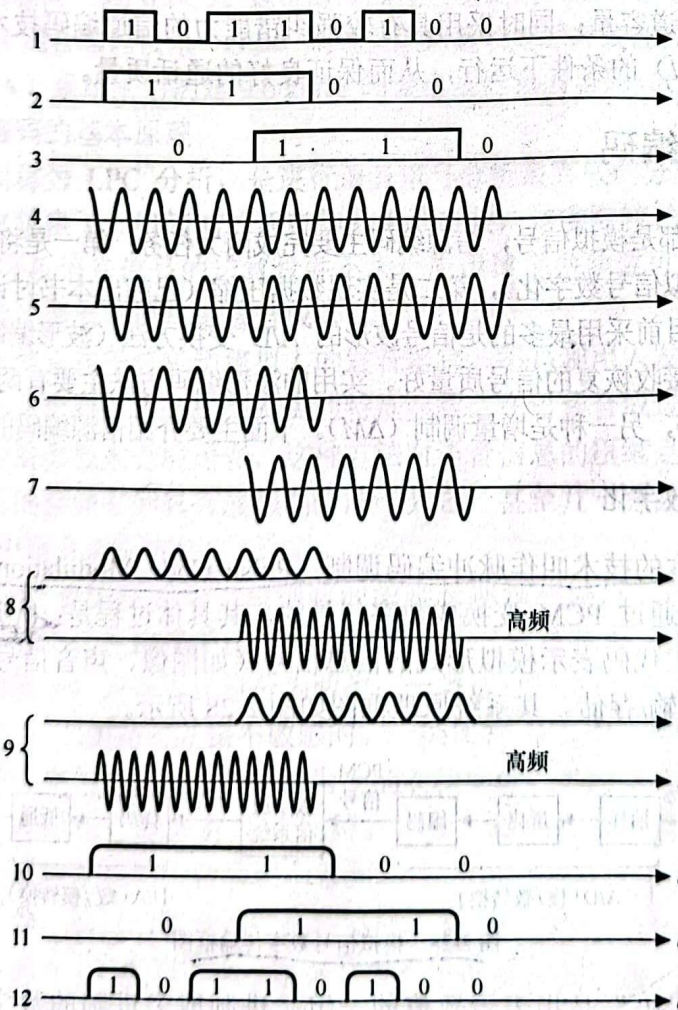


图 2-26 4QAM 调制解调过程中各点的基本波形



为了改善方型 QAM 的接收性能,还可以采用星形的 QAM。在实际应用中,除了二制 QAM (简称 4QAM) 以外,常采用 16QAM (四进制)、64QAM (八进制)、256Q (十六进制) 等方式。

通常,把信号矢量端点的分布图称为星座图,如图 2-27 所示。

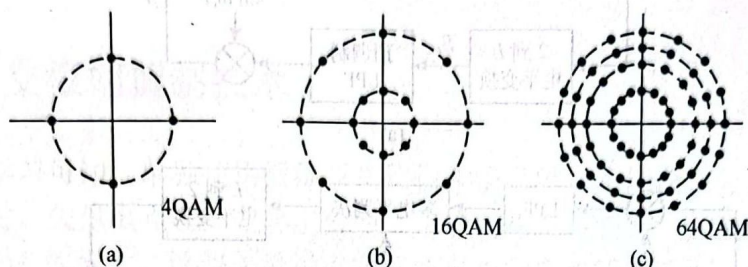


图 2-27 M 进制星形 QAM 的星座图

2.2 编码技术

信源编码和信道编码是通信数字化的两个重要技术领域。在移动通信数字化中,首先模拟语音信号的数字化。对于语音信号进行数字化处理,采用低码率数字语音编码,可以提高频带的利用率和信道容量;同时采用具有较强纠错能力的信道编码技术,可使移动通信系统在较低载干比 (C/I) 的条件下运行,从而保证良好的通话质量。

2.2.1 信源编码

信源输出的信号都是模拟信号,信源编码主要完成两大任务:第一是将模拟信号转换成数字信号(也就是实现模拟信号数字化),第二是实现数据压缩(已超出本书讨论范围)。模拟信号数字化的方法有多种,目前采用最多的是信号波形的 A/D 变换方法(波形编码)。它直接把时域波形变换为数字序列,接收恢复的信号质量好。实用的波形编码方法主要有两种基本形式:一种脉冲编码调制 (PCM),另一种是增量调制 (ΔM)。下面主要介绍信源编码的工作原理。

1. 信源信号的数字化

“数字化”最基本的技术叫作脉冲编码调制 (Pulse Code Modulation, PCM), 简称脉冲调制。模拟信号正是通过 PCM 变换成数字信号的,其具体过程是:先通过抽样、量化和码 3 个步骤,用若干代码表示模拟形式的信息信号(如图像、声音信号),再用脉冲信号示这些代码来进行传输/存储。其系统原理框图如图 2-28 所示。

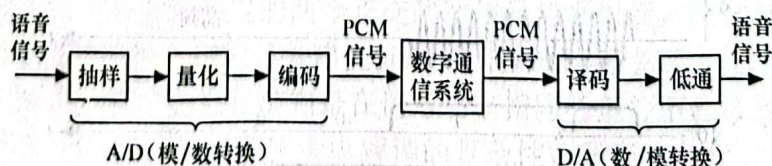


图 2-28 模拟信号数字传输框图

这里所说的“代码”是指表示数值的一组二进制或多进制的数字符号,如表示数“五”的十进制代码是“5”,二进制代码是“101”。PCM 技术中通常使用二进制代码。