

本章要点：二进制幅移键控(2ASK)、二进制频移键控(2FSK)、二进制相移键控(2PSK)和二进制差分相移键控(2DPSK)等几种常见的数字调制信号的产生、表示式、解调方法、频谱特性以及抗噪声性能比较。

5.1 引言

数字基带信号可以直接在数字基带传输系统中进行传输,然而现实中大多数信道具有带通传输特性,因而不能直接进行数字基带信号的传输。为了有效地利用传输媒介,必须使信号与信道匹配。与模拟调制系统一样,普遍使用并行之有效的匹配方法是,借助载波调制把具有低通频谱特性的基带信号进行频谱搬移,使它能在一定的频带内传输。这种在发送端把数字基带信号变成适合于信道传输的频谱搬移过程称为数字调制,在接收端恢复原始数字基带信号的过程称为数字解调。整个的传输过程称为数字信号的频带传输。

利用数字信号取值离散的特点通过开关键控载波,从而实现数字调制的方法称为键控法。对载波振幅进行键控可获得幅移键控(Amplitude Shift Keying, ASK),对载波频率进行键控可获得频移键控(Frequency Shift Keying, FSK),对载波相位进行键控可获得相移键控(Phase Shift Keying, PSK)。

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。在二进制调制中,信号参量只有两种可能的取值;在多进制(如 M 进制, $M > 2$)调制中,信号参量可能有 M 种取值。

用数字基带信号控制载波,把数字基带信号变换为数字带通信号的过程称为数字调制。调制信号为二进制数字基带信号时,这种调制称为二进制数字调制。在二进制数字

调制中,载波的振幅、频率或相位只有两种变化状态,对应于数字“0”和“1”。

5.2 二进制幅移键控

学习目标: 掌握二进制幅移键控(2ASK)信号的数学表示式及波形图,理解 2ASK 信号产生方式,掌握 2ASK 信号的解调方式、频谱特性。

内容点睛:

- (1) 2ASK 信号的数学表示式: $e_0(t) = s(t) \cos \omega_c t$ 。
- (2) ASK 信号的产生方法(调制方法)有模拟调制法和键控法两种。
- (3) ASK 信号的解调方法有相干解调法和非相干解调法。
- (4) ASK 信号的功率谱密度表示式如下:

$$P_E(f) = \frac{T_s}{16} \left[\left| \frac{\sin \pi(f + f_c)T_s}{\pi(f + f_c)T_s} \right|^2 + \left| \frac{\sin \pi(f - f_c)T_s}{\pi(f - f_c)T_s} \right|^2 \right] + \frac{1}{16} [\delta(f + f_c) + \delta(f - f_c)]$$

- (5) 2ASK 信号的频谱性质如下:
 - ① 2ASK 信号由离散谱和连续谱构成。
 - ② 2ASK 信号带宽是基带信号脉冲带宽的两倍。

5.2.1 2ASK 调制原理

二进制幅移键控(2ASK)是用二进制数字信号去控制正弦载波的振幅参量,用载波振幅的 2 种不同取值来表示“1”或“0”。

2ASK 信号可表示为

$$e_0(t) = s(t) \cos \omega_c t \quad (5-1)$$

式中, ω_c 为载波角频率, $s(t)$ 为单极性 NRZ 矩形脉冲序列,如下:

$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s) \quad (5-2)$$

式中, $g(t)$ 是持续时间为 T_s 、高度为 1 的矩形脉冲(门函数); a_n 为二进制数字序列,如下:

$$a_n = \begin{cases} 1, & P \\ 0, & 1 - P \end{cases} \quad (5-3)$$

5.2.2 2ASK 信号的产生方法

通常,二进制幅移键控信号的产生方法(调制方法)有两种,如图 5-1 所示。

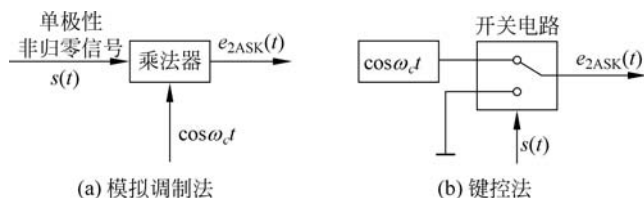


图 5-1 2ASK 产生方法

一是相乘法。由 2ASK 信号的表达式可知,2ASK 信号是调制信号和载波信号的乘积,因此与一般的模拟幅度调制方法类似,可用相乘法产生 2ASK 信号,如图 5-1(a)所示。

二是键控法。由 2ASK 信号的波形图(如图 5-2 所示)可看出,2ASK 信号是用载波信号的有无来表示的,因此可用开关电路控制载波的通断来产生 2ASK 信号,如图 5-1(b)所示。

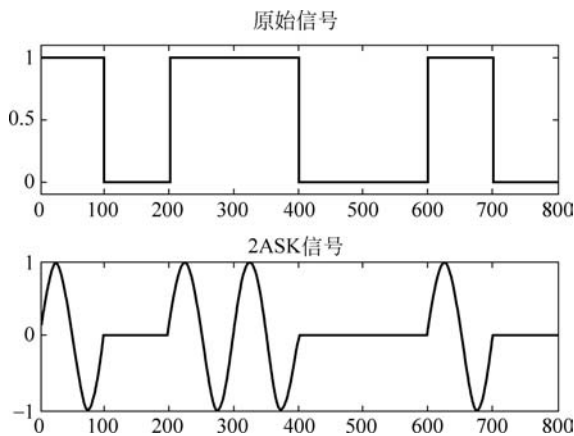


图 5-2 2ASK 信号波形图

5.2.3 2ASK 信号的解调方法

2ASK 信号解调的常用方法主要有两种:非相干解调法和相干解调法,如图 5-3 和图 5-4 所示。

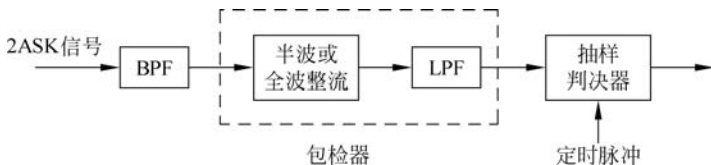


图 5-3 2ASK 信号的非相干解调

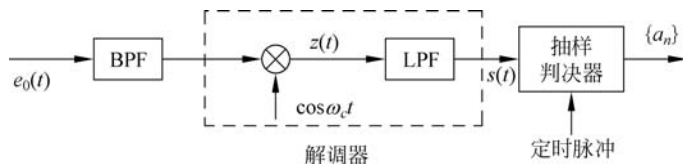


图 5-4 2ASK 信号的相干解调

5.2.4 2ASK 频谱特性

2ASK 的功率谱密度表示式为

$$P_E(f) = \frac{T_s}{16} \left[\left| \frac{\sin \pi(f + f_c)T_s}{\pi(f + f_c)T_s} \right|^2 + \left| \frac{\sin \pi(f - f_c)T_s}{\pi(f - f_c)T_s} \right|^2 \right] + \frac{1}{16} [\delta(f + f_c) + \delta(f - f_c)] \quad (5-4)$$

由式(5-4)可以看出,2ASK 的频谱具有如下性质:

- (1) 2ASK 信号由离散谱和连续谱构成。
- (2) 2ASK 信号带宽是基带信号脉冲带宽的两倍。

5.3 二进制频移键控

学习目标: 掌握二进制频移键控(2FSK)信号的数学表示式及波形图,理解 2FSK 信号产生方式,掌握 2FSK 信号的解调方式、功率谱密度表示式以及 2FSK 信号的频谱性质。

内容点睛:

- (1) 2FSK 信号的数学表示式: $e_0(t) = s(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_n) + \overline{s(t)} \cos(\omega_2 t + \theta_n)$ 。
- (2) 2FSK 信号的产生方法(调制方法)有模拟调制法和键控法两种。
- (3) 2FSK 信号的解调方法有包络检波法和相干检测法。
- (4) 2FSK 信号的功率谱密度表示式如下:

$$P_E(f) = \frac{T_s}{16} \left[\left| \frac{\sin \pi(f + f_1)T_s}{\pi(f + f_1)T_s} \right|^2 + \left| \frac{\sin \pi(f - f_1)T_s}{\pi(f - f_1)T_s} \right|^2 + \left| \frac{\sin \pi(f + f_2)T_s}{\pi(f + f_2)T_s} \right|^2 + \left| \frac{\sin \pi(f - f_2)T_s}{\pi(f - f_2)T_s} \right|^2 \right] + \frac{1}{16} [\delta(f + f_1) + \delta(f - f_1) + \delta(f + f_2) + \delta(f - f_2)]$$

(5) 2FSK 信号的频谱性质如下:

- ① 2FSK 信号由离散谱和连续谱构成。
- ② 若 $|f_2 - f_1| < f_s$, 连续谱出现单峰值; 若 $|f_2 - f_1| > f_s$, 连续谱出现双峰值。
- ③ 2FSK 的信号带宽 $B = |f_2 - f_1| + 2f_s$ 。

5.3.1 2FSK 调制原理

二进制频移键控(2FSK)用两个不同频率(f_1 和 f_2)的正弦信号分别表示二进制数字 1 和 0。从原理上讲,数字调频可用模拟调频法来实现,也可用键控法来实现。模拟调频法是利用一个矩形脉冲序列对一个载波进行调频,是频移键控通信方式早期采用的实现方法。2FSK 键控法则是利用受矩形脉冲序列控制的开关电路对两个不同的独立频率源进行选通。键控法的特点是转换速度快、波形好、稳定度高且易于实现,故应用广泛。

2FSK 信号的数字表达式可以表示为

$$e_0(t) = s(t)\cos(\omega_1 t + \varphi_n) + \overline{s(t)}\cos(\omega_2 t + \theta_n) \quad (5-5)$$

式中, $s(t)$ 为单极性非归零矩形脉冲序列,如下:

$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_b) \quad (5-6)$$

$$a_n = \begin{cases} 1, & P \\ 0, & 1 - P \end{cases} \quad (5-7)$$

式中, $g(t)$ 是持续时间为 T_s 、高度为 1 的矩形脉冲(门函数); a_n 为二进制数字序列, $\overline{s(t)}$ 为 $s(t)$ 的反码形式。

5.3.2 2FSK 信号的产生方法

2FSK 信号的键控法示例如图 5-5 所示。图中 $s(t)$ 为基带信号,输出为 2FSK 信号。

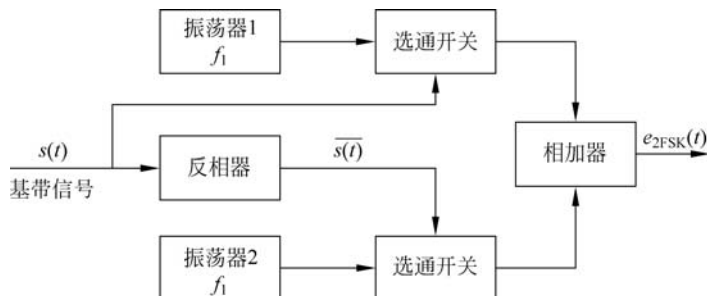


图 5-5 2FSK 信号键控法

输出波形如图 5-6 所示。

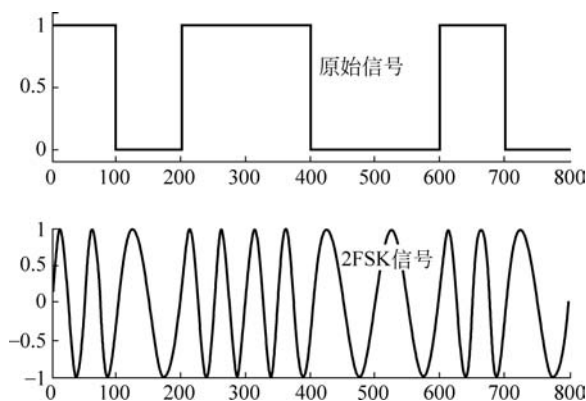


图 5-6 2FSK 信号输出波形

5.3.3 2FSK 信号的解调

数字调频信号的解调方法有很多,如鉴频法、相干检测法、包络检波法、过零检测法、差分检测法等,此处仅简要介绍相干检测法和包络检波法两种较为典型的解调方法。

2FSK 信号的包络检波法解调框图如图 5-7 所示,可视为由两路 2ASK 解调电路组成。这里,两个带通滤波器起分路作用,带宽相同,皆为相应的 2ASK 信号带宽;用以分开两路 2ASK 信号,抽样判决器起比较器作用,把两路包络信号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。

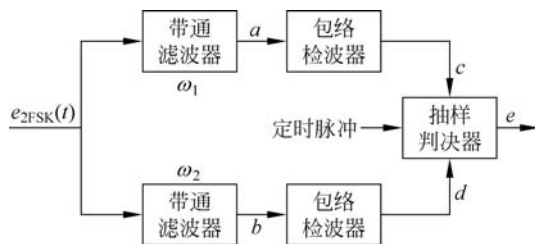


图 5-7 包络检波法框图

相干检测法的具体解调电路是同步检波器,原理方框图如图 5-8 所示。图中两个带通滤波器的作用类似包络检波法,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滤掉二倍频信号,取出含基带数字信息的低频信号,抽样判决器在抽样脉冲到来时对两个低频信号的抽样值进行比较判决,即可还原出基带数字信号。

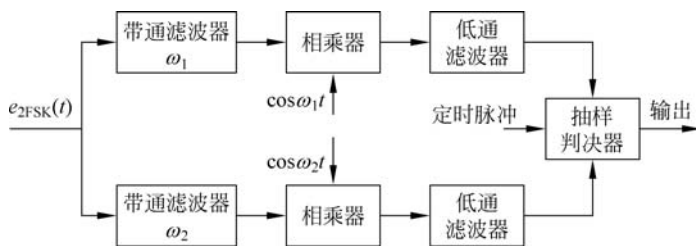


图 5-8 相干检测法框图

5.3.4 2FSK 频谱特性

2FSK 的功率谱密度表示式为

$$P_E(f) = \frac{T_s}{16} \left[\left| \frac{\sin \pi(f + f_1)T_s}{\pi(f + f_1)T_s} \right|^2 + \left| \frac{\sin \pi(f - f_1)T_s}{\pi(f - f_1)T_s} \right|^2 + \right. \\ \left. \left| \frac{\sin \pi(f + f_2)T_s}{\pi(f + f_2)T_s} \right|^2 + \left| \frac{\sin \pi(f - f_2)T_s}{\pi(f - f_2)T_s} \right|^2 \right] + \\ \frac{1}{16} [\delta(f + f_1) + \delta(f - f_1) + \delta(f + f_2) + \delta(f - f_2)] \quad (5-8)$$

由式(5-8)可以看出,2ASK 的频谱具有如下性质:

- (1) 2FSK 信号由离散谱和连续谱构成。
- (2) 若 $|f_2 - f_1| < f_s$, 连续谱出现单峰值; 若 $|f_2 - f_1| > f_s$, 连续谱出现双峰值。
- (3) 2FSK 的信号带宽 $B = |f_2 - f_1| + 2f_s$ 。

5.4 二进制相移键控与二进制差分相移键控

学习目标: 掌握二进制相移键控(2PSK)信号的数学表示式,理解 2PSK 信号产生方式,掌握 2PSK 信号的解调方式、功率谱密度表示式以及 2PSK 信号的频谱性质;掌握二进制差分相移键控(2DPSK)信号与 2PSK 信号原理的不同,了解 2DPSK 信号的解调方式。

内容点睛:

- (1) 2PSK 信号的数学表示式: $e_0(t) = s(t) \cos \omega_c t$ 。
- (2) 2PSK 信号的产生方法(调制方法)有模拟调制法和键控法两种。
- (3) 2PSK 信号的解调方法: 不能采用包络检测的方法,只能进行相干解调。
- (4) 2PSK 信号的频谱特性。

(5) 2DPSK 信号与 2PSK 信号原理的不同。

(6) 2DPSK 信号的解调方式。

二进制相移键控也称作 BPSK(Binary-Phase Shift Keying)。它是用两个频率相同但相位不同的载波信号来表示二进制数字 1 和 0,通常这两个信号的相位相差 180° 。

5.4.1 2PSK 信号的表达式

2PSK 信号的表达式为

$$s_{2\text{PSK}}(t) = s(t) \cos \omega_c t \quad (5-9)$$

这里, $s(t)$ 与 2ASK 及 2FSK 时不同,为双极性数字基带信号,即

$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_b) \quad (5-10)$$

式中, $g(t)$ 是高度为 1、宽度为 T_b 的门函数; a_n 的值如下:

$$a_n = \begin{cases} +1, & P \\ -1, & 1 - P \end{cases} \quad (5-11)$$

因此,在某一个码元持续时间 T_b 内观察时,有

$$s_{2\text{PSK}}(t) = \pm \cos \omega_c t = \cos(\omega_c t + \varphi_i), \quad \varphi_i = 0 \text{ 或 } \pi \quad (5-12)$$

5.4.2 2PSK 信号的产生方法

2PSK 信号的产生方法(调制方法)也有两种,即模拟调制法和键控法,如图 5-9 所示。2PSK 信号波形如图 5-10 所示。

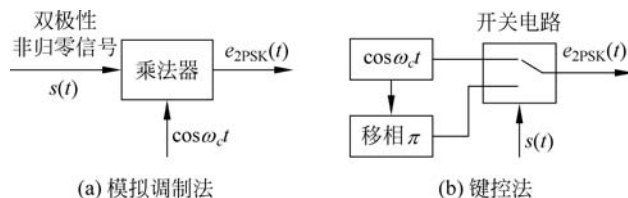


图 5-9 2PSK 信号的产生方法

5.4.3 2PSK 信号的解调方法

2PSK 信号的解调常采用相干解调方法,如图 5-11 所示,除此之外,还可采用“鉴相器”来替代相干解调方法中的“相乘器”和“低通滤波器”。

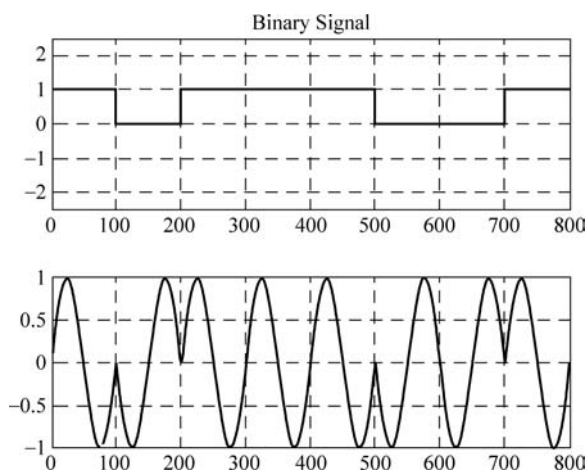


图 5-10 2PSK 信号波形

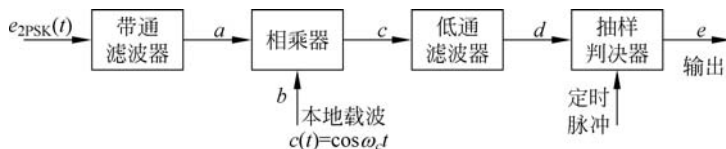


图 5-11 2PSK 信号的相干解调方法

2PSK 信号相干解调的过程实际上是输入已调信号与本地载波信号进行极性比较的过程,故常称为极性比较法解调,其解调过程与 2ASK 和 2FSK 相干解调过程类似,这里不再详细介绍。

5.4.4 2PSK 频谱特性

2PSK 信号的功率谱密度可以写成

$$P_E(f) = \frac{1}{4} [P_s(f + f_c) + P_s(f - f_c)] \quad (5-13)$$

由于 $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n g(t - nT_s)$ 为双极性矩形基带信号,故由上式可得

$$P_E(f) = f_s P(1-P) [|G(f + f_c)|^2 + |G(f - f_c)|^2] + \frac{1}{4} f_s^2 (1-2P)^2 |G(0)|^2 [\delta(f + f_c) + \delta(f - f_c)] \quad (5-14)$$

在等概情况下,有

$$P_E(f) = \frac{T_s}{4} \left[\left| \frac{\sin \pi(f + f_c)T_s}{\pi(f + f_c)T_s} \right|^2 + \left| \frac{\sin \pi(f - f_c)T_s}{\pi(f - f_c)T_s} \right|^2 \right] \quad (5-15)$$

由上式可以得到 2PSK 信号频谱性质如下:

- (1) 2PSK 信号的功率谱密度由离散谱和连续谱两部分构成。
- (2) 当双极性信号以等概($P=1/2$)出现时,将不存在离散谱部分。
- (3) 2PSK 信号的连续谱和 2ASK 信号的连续谱基本相同,故 2PSK 信号与 2ASK 信号的带宽相同。

5.4.5 2DPSK

这种以载波的不同相位直接去表示相应数字信息的相移键控,称为绝对相移方式。采用绝对相移方式,在发送端以某一相位为基准,在接收端必然有一个固定基准相位做参考,如果这个基准相位发生变化,则会造成错误的恢复。因此,采用 2PSK 方式容易在接收端发生错误恢复,该现象称为“倒 π 现象”。为此,实际中一般不采用 2PSK 方式,而采用相对相移(如 2DPSK)方式。

2DPSK 是利用前后相邻码元的相对载波相位值去表示数字信息的一种方式。

假设相位值用相位偏差 $\Delta\phi$ 表示,设

$$\begin{cases} \Delta\phi = \pi, & \text{数字信息“1”} \\ \Delta\phi = 0, & \text{数字信息“0”} \end{cases}$$

那么数字信息序列与 2DPSK 码元相位关系可举例如下。

数字信息为 0011100101, 2DPSK 信号相位为 $000\pi0\pi\pi\pi00\pi$ 。由此所产生的 2PSK 和 2DPSK 波形如图 5-12 所示。

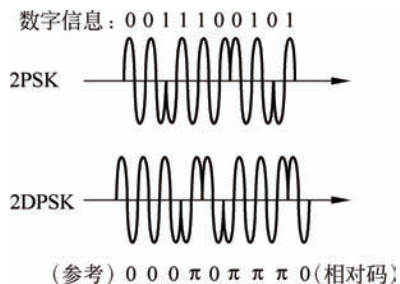


图 5-12 2PSK 和 2DPSK 信号波形举例

由图 5-12 可以看出,2DPSK 波形与 2PSK 波形不同,2DPSK 波形的同一个相位并不对应相同的数字信息符号,而前后码元对应相位的差才决定信息符号,只要鉴别这个相位关系就可以正确恢复数字信息,从而避免了 2PSK 方式中的倒 π 现象的发生。

2DPSK 信号可以采用同步检测法和差分相干解调法两种方法。采用同步检测法解调必须把输出序列变换成绝对码序列,即在图 5-13(a)的框图后接上一个码反变换器。

采用差分相干解调法,如图 5-13(b)所示,由于此时解调已完成码变换作用,故不需要码变换器,因而在实际中常被采用。

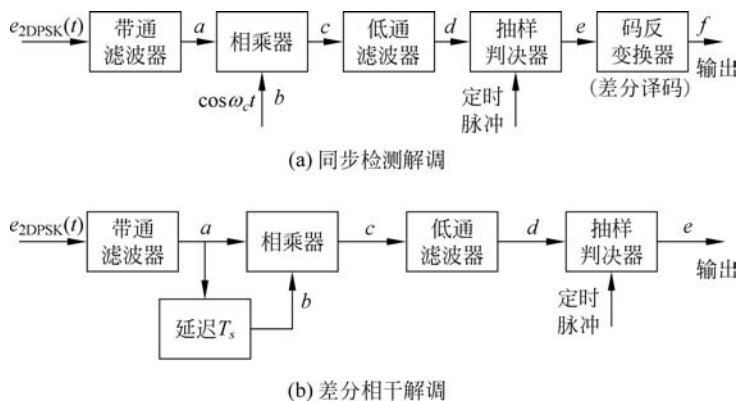
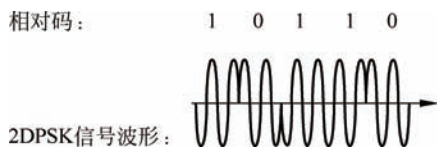


图 5-13 2DPSK 信号解调方式

2DPSK 的频谱与 2PSK 频谱完全相同,可参照 2PSK 频谱特性。

【例 5-1】 在某 2DPSK 系统中,载波频率为 2400Hz,码元速率为 1200Baud,已知相对码为 10110,画出 2DPSK 信号波形。

解: 由于载波频率 $f_c = 2400\text{Hz}$,码元速率 $R_B = 1200\text{Baud}$,所以一个码元含有两个载波。又已知相对码波形,所以 2DPSK 信号波形可以表示如下:



5.5 二进制数字调制系统的性能比较

学习目标: 分别从频带宽度、误码率、设备复杂程度 3 个方面对几种数字调制系统性能进行比较。掌握各数字调制系统的性能。

内容点睛:

分别从以下 3 个方面对几种数字调制系统性能进行比较,掌握各数字调制系统的性能。

- (1) 频带宽度。
- (2) 误码率。
- (3) 设备复杂程度。

下面我们针对以下几方面性能做简要比较。

1. 频带宽度

当码元宽度为 T_s 时,2ASK 系统与 2PSK 系统的频带宽度近似为 $2/T_s$,2FSK 系统的频带宽度近似为 $|f_2 - f_1| + 2/T_s > 2/T_s$ 。因此,从频带利用率上看,2FSK 系统最不可取。

2. 误码率

表 5-1 中列出了各种二进制数字调制系统的误码率与信噪比关系。

表 5-1 二进制系统误码率与信噪比关系

名 称	误码率与信噪比关系
相干 2ASK	$P_e = \frac{1}{\sqrt{\pi r}} e^{-\frac{r}{4}} (r \gg 1)$
非相干 2ASK	$P_e = \frac{1}{2} e^{-\frac{r}{4}}$
相干 2FSK	$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} e^{-\frac{r}{2}} (r \gg 1)$
非相干 2FSK	$P_e = \frac{1}{2} e^{-\frac{r}{2}}$
相干 2PSK	$P_e = \frac{1}{2\sqrt{\pi r}} e^{-r} (r \gg 1)$
差分相干 2DPSK	$P_e = \frac{1}{2} e^{-r}$

3. 设备复杂程度

对于 2ASK、2FSK 及 2PSK 这三种方式来说,发送端设备的复杂程度相差不多,而接收端的复杂程度则与所选用的调制和解调方式有关。对于同一种调制方式,相干解调的设备要比非相干解调的设备复杂;而同为非相干解调时,2DPSK 的设备最复杂,2FSK 次之,2ASK 最简单。设备越复杂,其造价就越贵。

上面我们从几个方面对各种二进制数字调制系统进行了比较。可以看出,在选择调制和解调方式时,要考虑的因素是比较多的。通常,只有对系统的要求做全面的考虑,并且抓住其中最主要的要求,才能做出比较恰当的抉择。如果抗噪声性能是主要的,则应考虑相干 2PSK 和极性比较 2DPSK,而 2ASK 最不可取;如果带宽是主要的要求,则应考虑 2PSK、2DPSK 及 2ASK,而 2FSK 最不可取;如果设备的复杂性是一个必须考虑的重要因素,则非相干方式比相干方式更为适宜。目前用得最多的数字调制方式是 2DPSK 和非相干 2FSK。2DPSK 主要用于高速数据传输,而非相干 2FSK 则用于中、低速数据

传输,特别是在衰落信道中传送数据时,有着广泛的应用。

【例 5-2】 设某 2ASK 信号的码元速率 $R_B = 4.8 \times 10^6 \text{ Baud}$, 采用包络检波法或同步检波法解调。已知接收端输入信号的幅度 $a = 1 \text{ mV}$, 信道中加性高斯白噪声的单边功率谱密度 $n_0 = 2 \times 10^{-15} \text{ W/Hz}$ 。试求:

(1) 包络检波法解调时系统的误码率;

(2) 同步检波法解调时系统的误码率。

解: 因为 2ASK 信号的码元速率 $R_B = 4.8 \times 10^6 \text{ Baud}$, 所以接收端带通滤波器的带宽近似为 $B \approx 2R_B = 9.6 \times 10^6 \text{ Hz}$ 。

噪声功率 $N = n_0 B = 1.92 \times 10^{-8} \text{ W}$, 信噪比 $r = a^2 / (2\sigma_n^2) = a^2 / (2n_0 B) = 26 \gg 1$ 。则

$$P_{e\text{包络}} = \frac{1}{2} e^{-\frac{r}{4}} = 7.5 \times 10^{-4}$$

$$P_{e\text{同步}} = \frac{1}{\sqrt{\pi r}} e^{-\frac{r}{4}} = 1.6 \times 10^{-4}$$

5.6 多进制数字信号

学习目标: 熟悉多进制频移键控(MFSK)的解调方式。

内容点睛:

多进制频移键控(MFSK)的解调原理。

多进制数字振幅调制又称为多电平调制。 M 进制振幅调制信号中, 正弦载波有 M 种不同的取值, 每个符号间隔内发送某一种幅度的载波信号。这里仅对多进制频移键控(MFSK)进行介绍。

多进制频移键控(MFSK)简称多频制, 是 2FSK 方式的推广。它是用 M 个不同的载波频率代表 M 种数字信息, 例如: 4FSK 信号波形如图 5-14 所示。

MFSK 系统的组成方框图如 5-15 所示。发送端采用键控选频的方式, 接收端采用非相干解调方式。

图 5-15 中, 串/并变换器和逻辑电路 1 将一组组输入的二进制码(每 k 个码元为一组)对应地转换成有 $M(M=2^k)$ 种状态的一个个多进制码。这 M 个状态分别对应 M 个不同的载波频率($f_1, f_2, \dots, f_M$)。当某组 k 位二进制码到来时, 逻辑电路 1 的输出一方面接通某个门电路, 让相应的载频发送出去, 另一方面同时关闭其余所有的门电路。于是当一组组二进制码元输入时, 经相加器组合输出的便是一个 M 进制调频波形。

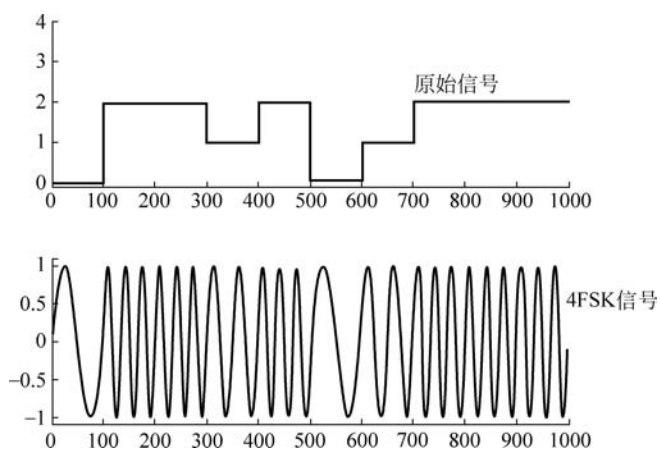


图 5-14 4FSK 信号波形

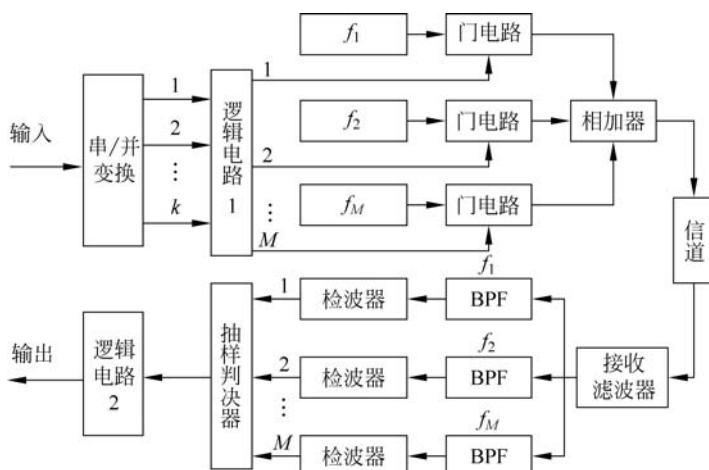


图 5-15 MFSK 系统的组成方框图

M 频制的解调部分由 M 个带通滤波器、包络检波器及一个抽样判决器、逻辑电路 2 组成。各带通滤波器的中心频率分别对应发送端各个载频。因而,当某一个已调载频信号到来时,在任一个码元持续时间内,只有与发送端频率相应的一个带通滤波器能收到信号,其他带通滤波器只有噪声通过。抽样判决器的任务是比较所有包络检波器输出的电压,并选出最大者作为输出,这个输出是一位与发端载频相应的 M 进制数。逻辑电路 2 把这 M 个进制数译成 k 位二进制并行码,并进一步做串/并变换恢复二进制信息输出,从而完成数字信号的传输。