



## 第4章 信息传输技术基础

4.1 信息传输和信道

4.2 传输技术基础

4.3 多路信号传输技术



# 4.1 信息传输和信道

## 4.1.1 信息传输的基本概念

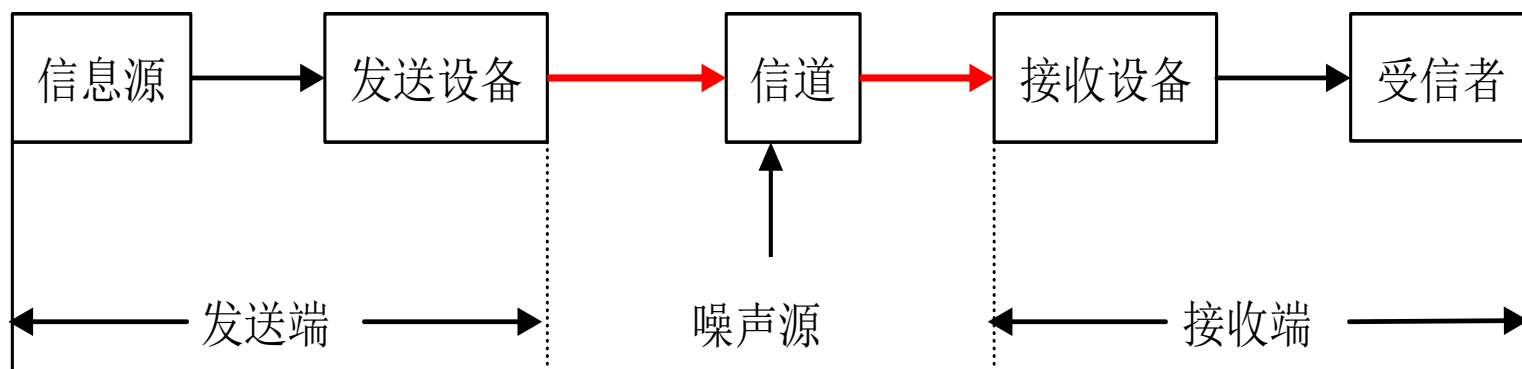
- 信息传输就是将携带信息的信号通过媒体传送到目的地的过程。
- 信源提供的语音、数据、图像等需要传递的信息由用户终端设备变换成需要的信号形式，经传输终端设备进行调制，将其频谱搬移到对应传输媒质的传输频段内，通过传输媒质传输到对方后，再经解调等逆变换，恢复成信宿适合的消息形式。



### 1. 信道

信道是信号传输的通道，是连接发送端和接收端的通信设备，其功能是将信号从发送端传送到接收端。

从系统的角度看，通信系统一般由信源、信道、信宿、发送设备、接收设备和噪声源组成，如图所示。



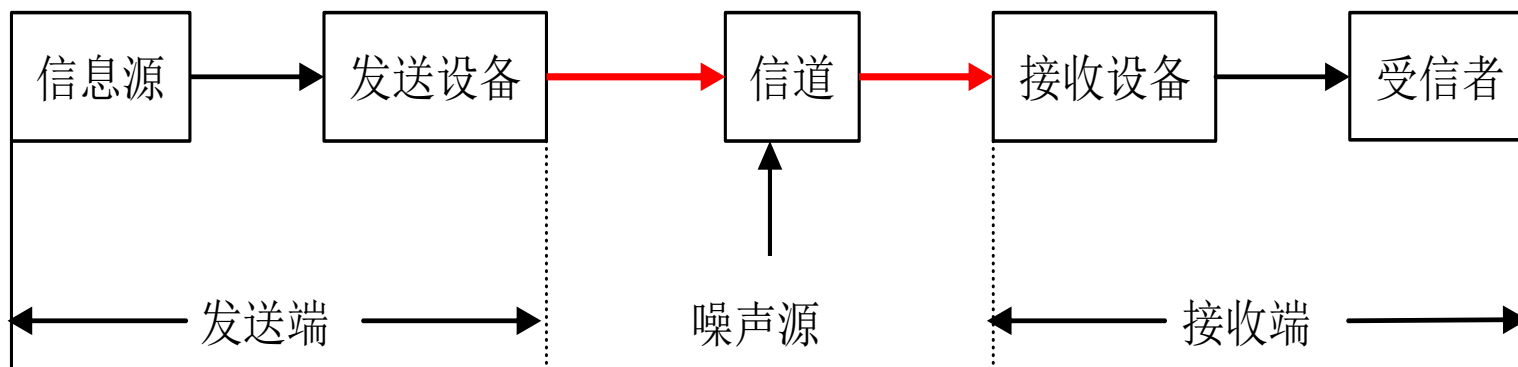


图4.1 通信系统的基本模型

- **信息源**是产生消息的源。
- **发送设备**是将信源端送出的信号变换或匹配成适合于特定信道介质传输信号的设备。
- 接收端的**接收设备**与发送设备实现功能相反，是将从信道接收的信号相应地恢复、还原成终端设备能识别信号的设备。



### 信道分类:

□ 根据传输信号的特性，分为：

- 模拟信道
- 数字信道

□ 根据传输距离的远近及作用，分为

- 用户线或接入信道
- 中继或长途传输信道

□ 根据传输介质是否有形，分为

- 无线信道：利用电磁波（含光波）在空间中的传播来传输信号
- 有线信道：利用人造的传导电或光信道的媒体传输信号（如电线、光纤）



### 2. 信息容量

信息容量是在一个给定时间内，通过一个通信系统可以传输多少信息的一种度量。

信息容量可以是系统容纳的用户数目或系统交换、传输及处理的信息比特数。

数学上，香农信息容量极限表述为：

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

它论述了通信信道的信息容量C与带宽B和信噪比S/N的关系。



# 香农信息容量极限公式

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (b/s)$$

式中  $C$  — 信息容量 (b/s) ;

$B$  — 带宽(Hz);

$S/N$  — 信号与噪声功率之比, 简称信噪比(无单位)。

设噪声单边功率谱密度为  $n_0$ , 则  $N = n_0 B$ ;

故上式可以改写成:

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (b/s)$$

由上式可见, 信息容量  $C$  和信道带宽  $B$ 、信号功率  $S$  及噪声功率谱密度  $n_0$  三个因素有关。



$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (b / s)$$

C是信道带宽和信噪比的函数，B增大的同时，噪声功率N也增大，S/N减小，C是有限的。

给定 $n_0$ 、S，增加信道带宽B，则信息容量也增加，但当带宽趋于无穷大时，信道容量存在极限值：

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \frac{S}{n_0} \log_2 e \approx 1.44 \frac{S}{n_0}$$



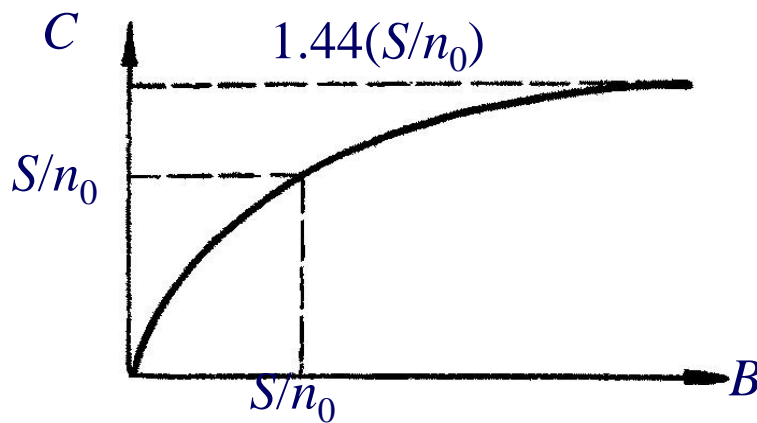


$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = 1.44 \frac{S}{n_0}$$

上式表明，当给定 $S / n_0$ 时，若带宽 $B$ 趋于无穷大，信息容量不会趋于无限大，而只是 $S / n_0$ 的1.44倍。

这是因为当带宽 $B$ 增大时，噪声功率也随之增大。

$C$ 和带宽 $B$ 的关系曲线：



信息容量和带宽关系



**【例4.2】** 已知某系统的信噪比为30 dB，标准话音 频带通信信道带宽为3.4 kHz，试求该系统的信息速率极限值。

解

根据信息容量的香农极限公式

$$\begin{aligned} C &= B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \\ &= 3400 \times \log_2 (1 + 1000) \\ &= 33.89 \text{ kb/s} \end{aligned}$$

$$(S/N)_{\text{dB}} = 10 * \log_{10}(S/N)$$

这个值就是该信道传输信息的理论极限速率值。



# 分贝的计算

我们用分贝表示增益、损耗及相对值

分贝是两个信号电平之间的比值的一种度量

分贝增益的计算

– **Pin:** 输入功率

– **Pout:** 输出功率

$$G_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

**dB**是一个相对值

分贝损耗  $L_{dB} = -10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}$

例：如果输入线上假如一个功率为10mW的信号，而100米外测得该信号功率降为5mW,那么传输损耗就可以表示为

$$L_{dB} = 10 \log_{10} (10/5) = 3 \text{ dB}$$



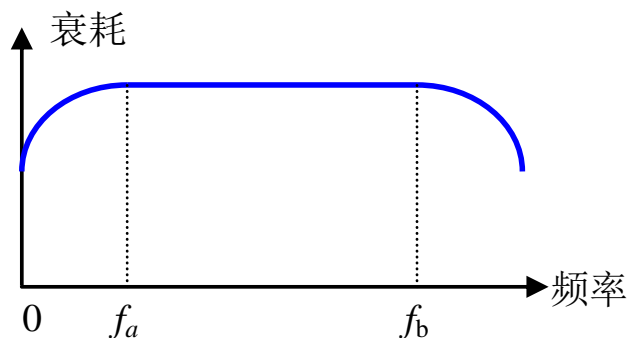
### 3. 信道传输特性

根据传输介质是否有形，信道可以分为有线信道和无线信道。

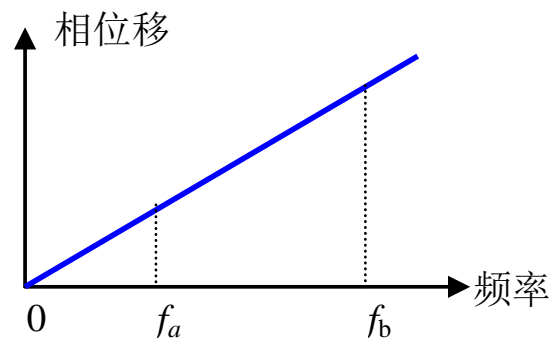
#### (1) 有线信道的传输特性

1) **幅频传输特性**：是信道在各频率下的衰耗与频率的关系曲线，它将影响信号的幅度衰减量。信道的理想幅频特性要求其通带内特性平稳，否则将导致信号幅度失真。

2) **相频传输特性**：是信道在各频率下的相位移与频率的关系曲线，它将影响被传输信号的相位移。



(a) 理想信道幅频特性



(b) 理想信道相频特性

图4.2 理想有线信道的传输特性



### (2) 无线信道传输特性

无线信道的传输媒介是自由空间，由电磁波携带信号。

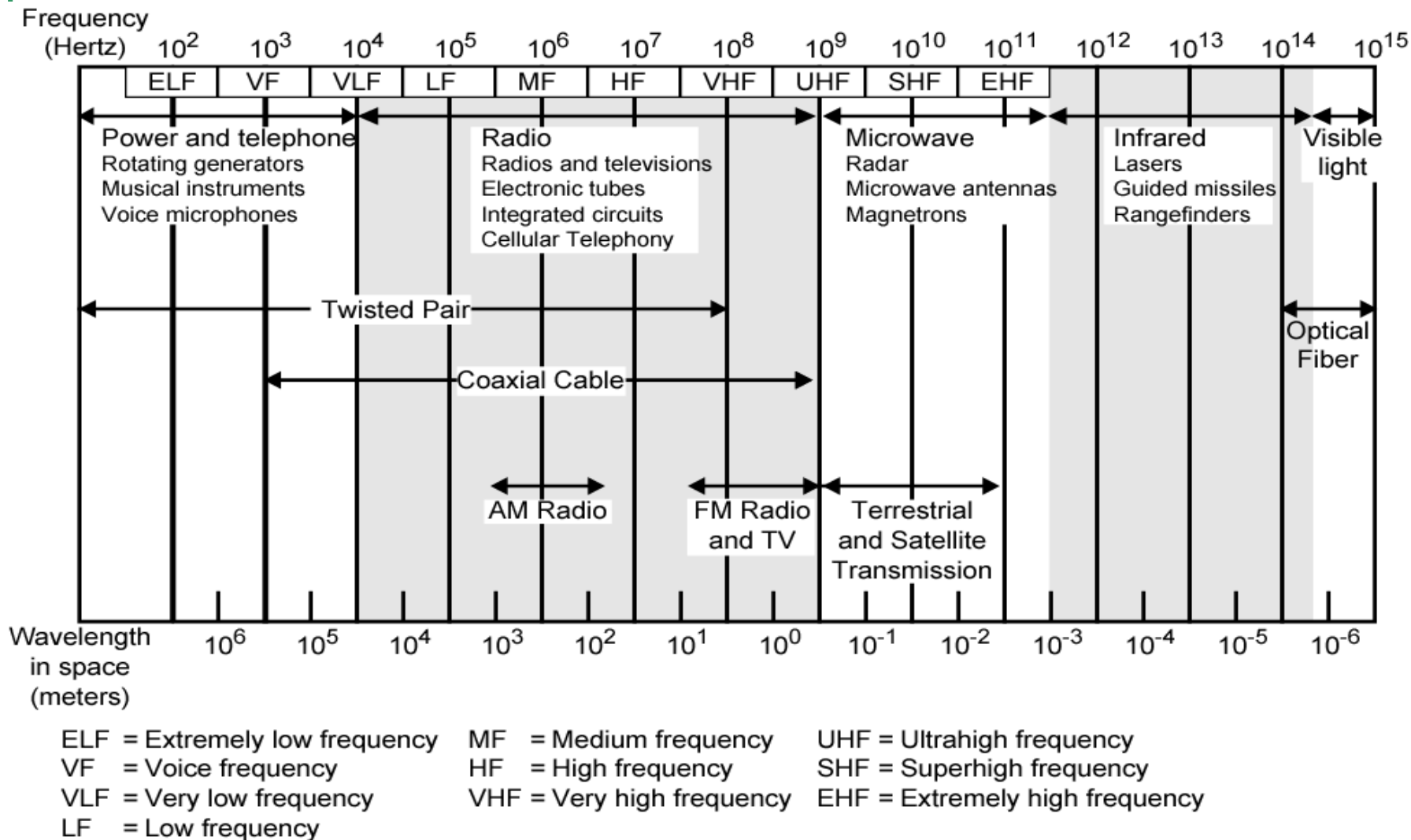
常用无线信道的通信方式有：调幅、调频广播、无线电视、微波通信、卫星通信、移动电话、无线寻呼等。

无线通信所用的电磁波，根据频率的高低，或波长的长短，划分为不同的频段。

各波长段的频率不同，波长不同，其空间传播特性就不一样，用途也就不同。



## 电磁波频段划分





- **长波：**频率为100~300KHz。绕射能力最强，靠地波传输。常用电台进行海上通信。
- **中波：**频率为300KHz~3MHz。较稳定。主要用于短距离广播。
- **短波：**频率为3~30MHz。利用空间电离层反射，进行长距离传输，主要用于短波通信和短波广播。
- **超短波：**频率为30~300MHz。主要用于调频广播、电视。
- **微波：**频率为300MHz~300GHz。波长较短，接近于光波，是直线传播。实现点到点间无遮挡的视距传播。主要用于移动通信、卫星通信。



### (3) 信道的衰减与失真

在信道中传递的信号，由于介质的特性，信号传输中必然会产生能量的损失，这种能量的损失，我们称之为衰减或衰耗。在通信工程中称之为固有衰减，这种衰减随信道种类不同而不同，传输信道距离越长衰减越大。

通信信道由于干扰和噪声影响，常见的信号衰减与失真度量参数有：幅度衰减、幅度突变、相位抖动、群时延—频率失真、频率偏移等。





### 信道的衰减与失真

- **幅度衰减**是指信道对不同频率信号的幅度衰减变化。用于信道的频带是有限的，不同频率的信号通过信道时的衰减值往往是不一样的。
  - 为了减小幅度衰减，在设计信道的传输特性时，一般要求把幅度-频率失真控制在允许范围内，使衰减的特性曲线变得平坦，这种措施称为“均衡”。
- **幅度突变**是指接收信号幅度突然变化（增加或减小）的数值，一般要求门限值在1~6dB范围内选择。
- **相位抖动**是指接收信号的时间位置和码元标准参考时间位置的短时偏离
  - 在模拟通信中影响不明显；在数字通信中会引起码间干扰，严重时会造成误码。



### (4) 信道的损伤

#### 1) 信道中的噪声与干扰

信号在信道传输过程中，会遇到各种情况的干扰和噪声，包括各种各样来自系统内部的噪声与外部的干扰。

##### ① 系统内部噪声：

- 系统内部半导体器件中的少数载流子的随机扩散与电子-空穴对的随机复合运动产生散弹噪声；
- 通信设备中的元器件的热运动（绝对温度零度以上都有）产生白噪声。

以上两种噪声是不可避免的，只能通过改良通信设备的工艺来改善。



### ②系统外部的干扰:

通信设备工作时，处于强电磁环境中：

- 一方面受到自然界雷电、太阳黑子活动等引起的电磁暴；
- 另一方面受其它无线电设备发射电磁波的干扰。

这种外界干扰，可通过降低外界干扰源的干扰和增强通信设备的屏蔽能力来改善。

**加性噪声：**叠加在信号上面传输的噪声，它与信道中传输的信号存在着相加的关系，与信道内信号有无没有关系。

传输技术不仅是为了传输信号，更需要提高信息传输的有效性和可靠性。



### 2) 数字传输系统性能指标

从数字信号传输的角度上看，数字通信系统的主要性能指标分为有效性和可靠性指标。

- 有效性指标常用信息传输速率、码元传输速率(符号速率)、频带利用率等表示；
- 可靠性指标常用误码率和抖动容限表示。

#### ① 信息传输速率：

指在单位时间(每秒)传送的信息量，也称**比特率**。单位是比特/秒(bit/s)，用符号 $f_b$ 表示。

**【例4.3】** 某数字通信系统，它每秒钟传输 $2048 \times 10^3$ 个二进制码元，则它的信息传输速率为多少？

**解** 该系统信息速率为： $f_b = 2048 \times 10^3$  比特/秒。



### ② 码元（符号）传输速率：

指单位时间(每秒)所传输的码元数目，也称为符号传输速率，或码元速率、波特率。其单位称为波特（Bd，或Baud）。

码元速率可折合为信息速率进行计算。其转换公式为：

$$f_b = f_B \log_2 M$$

式中， $f_b$ 为信息传输速率(二进制传输速率)； $f_B$ 表示码元传输速率，其单位为波特； $M$ 为码元进制数(符号进制数)。

对于二进制数字信号： $M=2$ ，码元速率和信息速率在数量上相等。

**【例4.4】** 已知某系统的码元传输速率为600 Baud，如果系统传输二进制和四进制码元时对应的信息速率分别为多少？

**解：** 二进制码元时， $M=2$ ，信息传输速率 $f_b=600 \text{ bit/s}$ ；

四进制码元时， $M=4$ ，信息传输速率 $f_b=600 \cdot \log_2 4=1200 \text{ bit/s}$ 。



### ③ 频带利用率:

指单位频带内的传输速率。传输的速率愈高，所占用的信道频带愈宽。

通常用 $\eta$ 来表示数字信道频带的利用情况，即频带利用率为:

$$\eta = \frac{\text{传输速率}}{\text{频带宽度}}$$

当传输速率是码元传输速率时，其单位为波特/赫兹(Baud/Hz)；当传输速率是信息传输速率时，其单位为比特/秒/赫兹(b/s/Hz)。



### ④ 误码率

在数字通信中是用脉冲信号，即用“1”和“0”携带信息。由于通信系统中噪声、串音及码间干扰以及其它突发因素的影响，当干扰幅度超过脉冲信号再生判决的某一门限值时，将会造成误判成为误码。

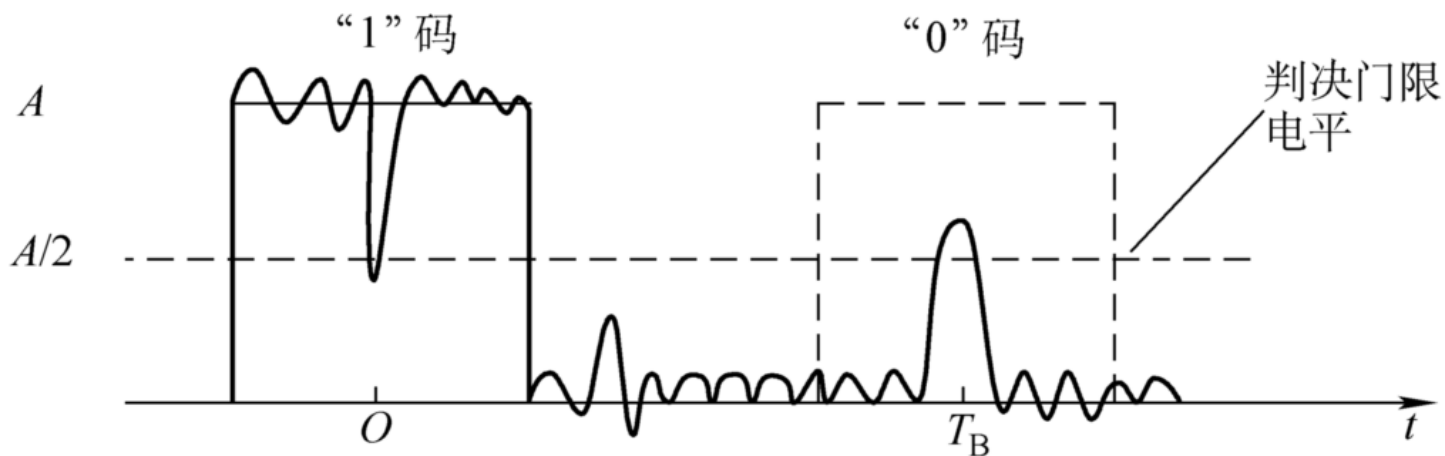


图4.3 噪声叠加在数字信号上的波形



### 误码率定义：

数字通信系统中在一定统计时间内，数字信号在传输过程中，发生错误的码元数与传输的总码元数之比，用符号 $P_e$ 表示

$$P_e = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\text{产生错误码元（个数）}}{\text{传输的总码元（个数）}}$$

误码率越小，通信的质量越高。





**【例4.5】** 某数字通信系统中传输“1”和“0”等概率的码元，则每码元含有的信息量为1bit。现有一数据通信系统每秒传送144kb的“1”和“0”码元，则此系统传信率多少比特/秒？如果此系统在传输过程中每5秒传错2码元，则系统的误码率又为多少？

**解**

在二进制码系统中，直接计算系统传信率 $f_b = 144 \text{ Kbit/s}$ ；由于系统5秒钟内传送的信息比特数为： $144\text{Kb} \times 5 = 720 \text{ kbit}$ ，系统误码率为：

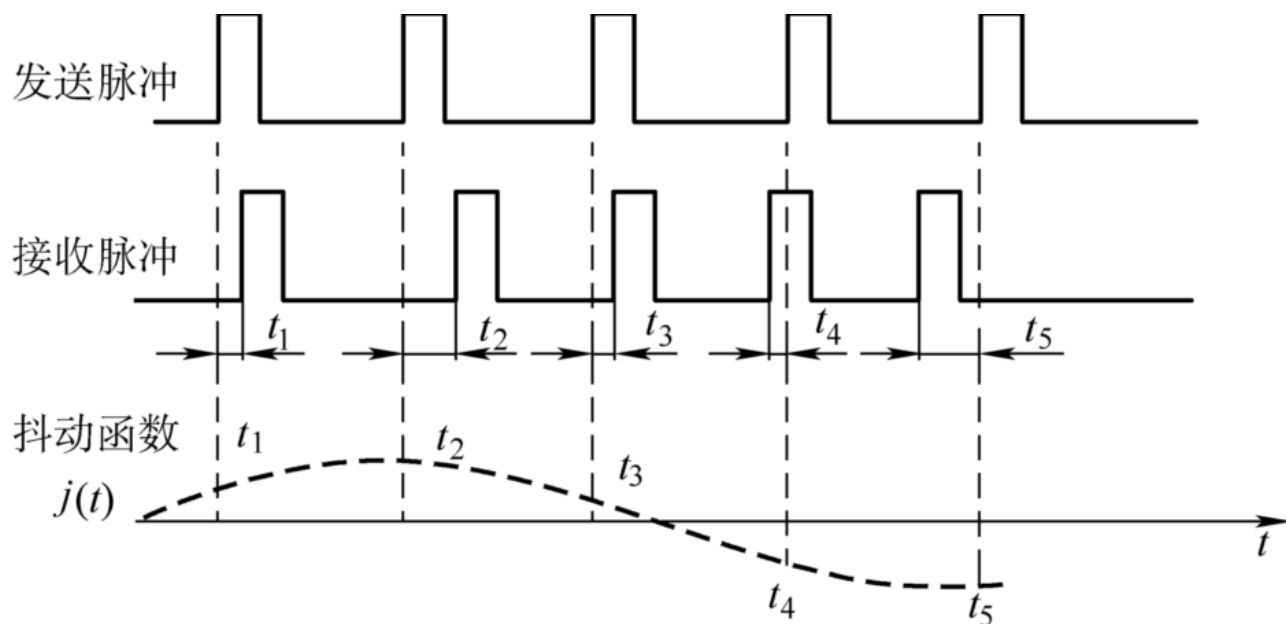
$$P_e = \frac{2}{720 \times 10^3} = 2.778 \times 10^{-6}$$



### ⑤ 抖动容限

所谓**抖动**，是指数字信号的有效瞬间与其理想时间位置的短时偏离。

一般说抖动称为相位抖动、定时抖动。它是数字通信系统中数字信号传输的一种不稳定现象。也即数字信号在传输过程中，脉冲信号在时间间隔上不再是等间隔的，而是随时间变化的一种现象。



脉冲抖动示意图



【例】已知黑白电视图像信号每帧有30万个像素；每个像素有8个亮度电平；各电平独立地以等概率出现；图像每秒发送25帧。若要求接收图像信噪比达到30dB，试求所需传输带宽。

【解】因为每个像素独立地以等概率取8个亮度电平，故每个像素的信

息量为  $I_p = -\log_2(1/8) = 3$  (b/pix)

并且每帧图像的信息量为

$$I_F = 300,000 \times 3 = 900,000 \text{ (b/F)}$$

因为每秒传输25帧图像，所以要求传输速率为

$$f_b = 900,000 \times 25 = 22,500,000 = 22.5 \times 10^6 \text{ (b/s)}$$

信道的容量C必须不小于此 $f_b$ 值。将上述数值代入式：

$$C = B \log_2(1+S/N)$$

$$\text{得到 } 22.5 \times 10^6 = B \log_2(1 + 1000) \approx 9.97 B$$

最后得出所需带宽

$$B = (22.5 \times 10^6) / 9.97 \approx 2.26 \text{ (MHz)}$$



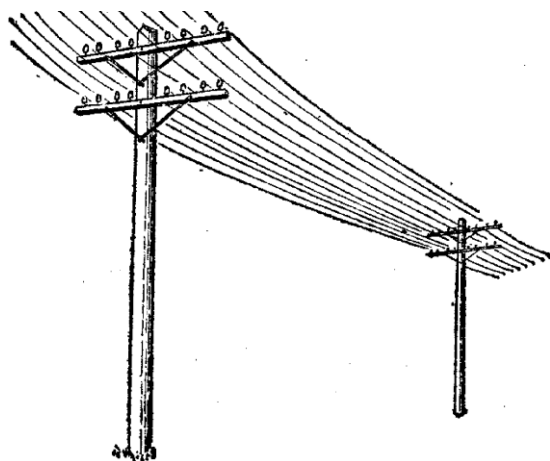
### 4.1.2 有线传输信道

有线信道的电磁能量被约束在某种传输线上传输，包括平行导体传输线、同轴电缆传输线、微带传输线、波导传输线、光纤传输线等。

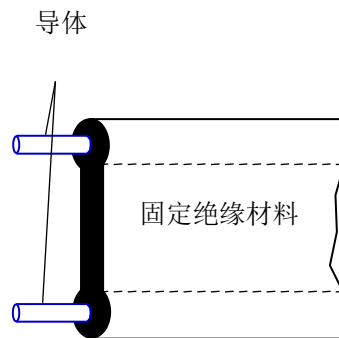
#### 1. 架空明线和平行双绞电缆

**架空明线**是利用金属裸导线捆扎在固定的线担上的绝缘子上，是架设在电线杆上的一种通信线路。它主要由导线、电杆、线担、绝缘子和拉线等组成。

**平行双绞电缆**是一种双线平行导体传输线，两个导体承载电流，其中一个导体承载发出的信号，另一个承载返回的信号，任何一对传输线都可以在平衡模式下工作。



(a) 架空明线



(b) 平行双绞电缆

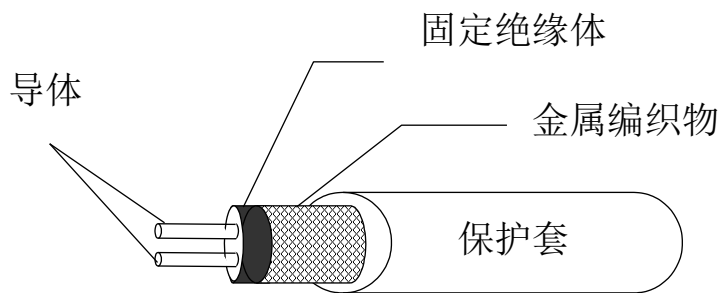


### 2. 对称电缆

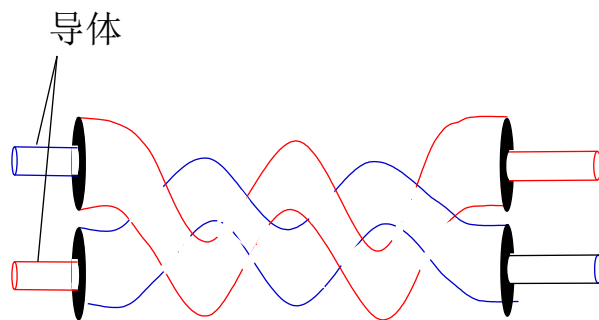
**对称电缆**是由若干条扭绞成对（或组）的导电芯线加绝缘层组合而成的缆芯，在缆芯外面加上金属编织物。

### 3. 双绞线

**双绞线电缆**是由两根绝缘的导体扭绞封装在一个绝缘外套中而形成的一种传输介质，通常以对为单位，并把它作为电缆的内核，根据用途不同，其芯线要覆以不同的护套。



(a) 对称电缆

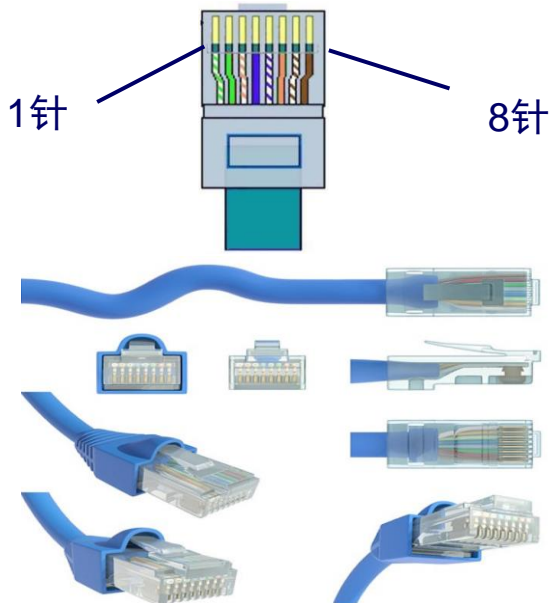


(b) 双绞线电缆

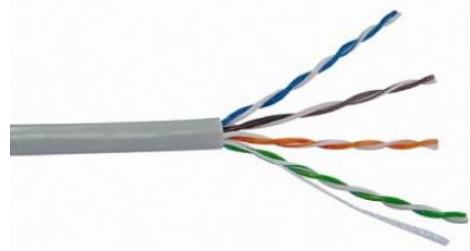


## 双绞线的种类

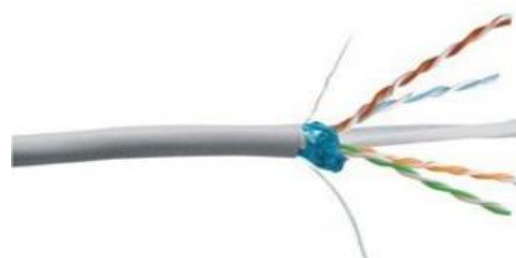
RJ45（网线水晶头）



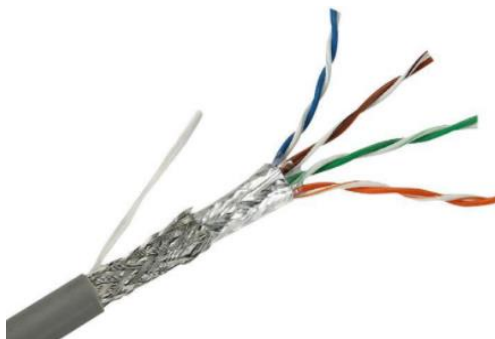
传输介质



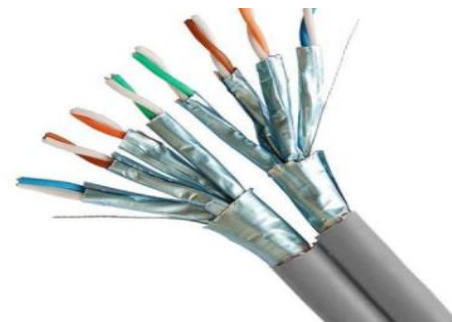
UTP无屏蔽双绞线



FTP屏蔽双绞线



SFTP屏蔽金属箔双绞线



STP屏蔽双绞线



## 常用的绞合线的典型应用

类别	带宽 (MHz)	典型应用
3	16	低速网络，如模拟电话网
4	20	短距离的以太网，如10BASE-T
5	100	10BASE-T以太网 某些100BASE-T快速以太网
5E(超5类)	100	100BASE-T快速以太网 某些1000BASE-T吉比特以太网
6	250	1000BASE-T吉比特以太网，ATM网
7	600	可用于10吉比特以太网(只使用STP)

- 上面类别是按照频率和信噪比进行分类
- 常用3类线和5类线区别在于单位长度的绞合次数不同







### 4. 同轴电缆

同轴电缆包括一个中心导体，直径1.2mm至5mm，周围是同心共轴的外部导体，外管直径4.4mm至18mm，外部导体被物理隔绝，由间隔器与中心导体隔离，属于不对称的结构。

图4-7给出的是固态柔韧型同轴电缆，外部导体是柔韧的编织物，并与中心导体同轴，绝缘体是固态绝缘聚乙烯材料，以保证内外导体的电隔离。

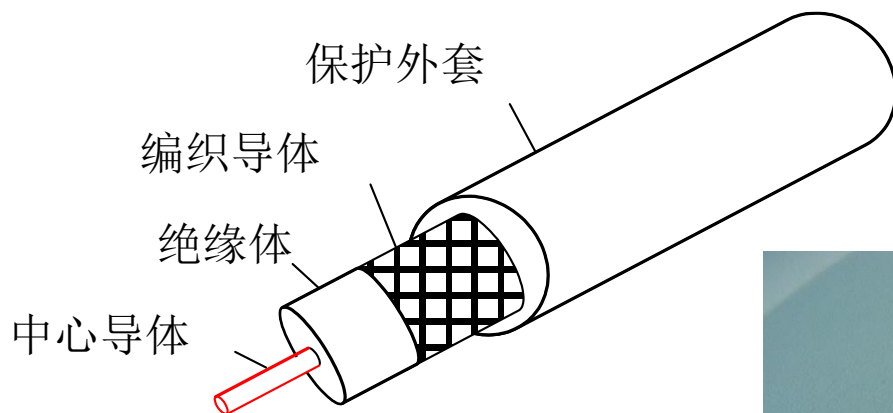


图4-7 同轴电缆（固态柔韧型）



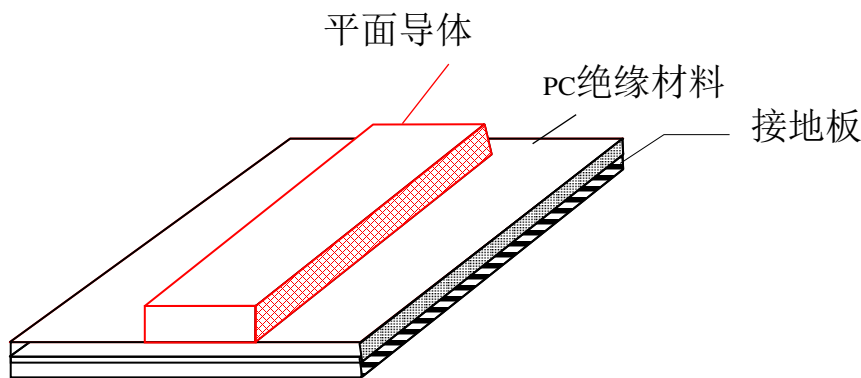




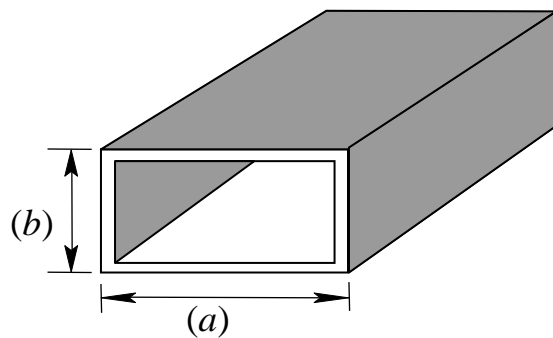
### 5. 微带线和矩形波导

微带线应用于高频(300~3000 MHz)。在印制电路板(PCB, Printed Circuit Board)上使用铜线构成的特殊传输线称为微带线或带状线, 已在PCB板上被用于元件的连接。图4.8(a)给出了一个简化的单轨微带线路。

波导(Wave Guide)的最简单形式是一个空心导管, 其横截面通常是矩形, 如图4.8(b)所示, 可以限定电磁波能量的边界。由于波导管的管壁是导体, 因此在他们的内表面可以反射电磁波。



(a) 微带线



(b) 矩形波导

图4-8 微带线和矩形波导



金属电缆具有使用方便、较便宜、寿命长、技术成熟等特点，主要用于速率较低的短距离信息传输。

但是金属电缆具有传输损耗大，容易受噪声干扰等缺点。

光纤具有重量轻、传输容量大、频带宽、抗干扰能力强等优点。

光纤已在长途通信网、市话通信网中取代原用的电缆，并努力实现全网光纤化。



### 6. 光纤

光纤（Optical Fiber）是由中心的纤芯和外围的包层同轴组成的圆柱形细丝，其结构图见图4.9所示。纤芯的折射率比包层稍高，损耗比包层更低，光能量主要在纤芯内传输，包层为光的传输提供反射面和光隔离。

光纤是利用光的全反射特性来导光的。



光纤

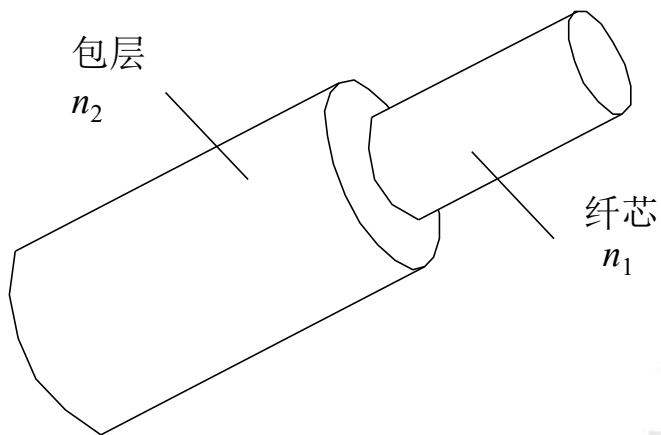


图4.9 光纤结构图

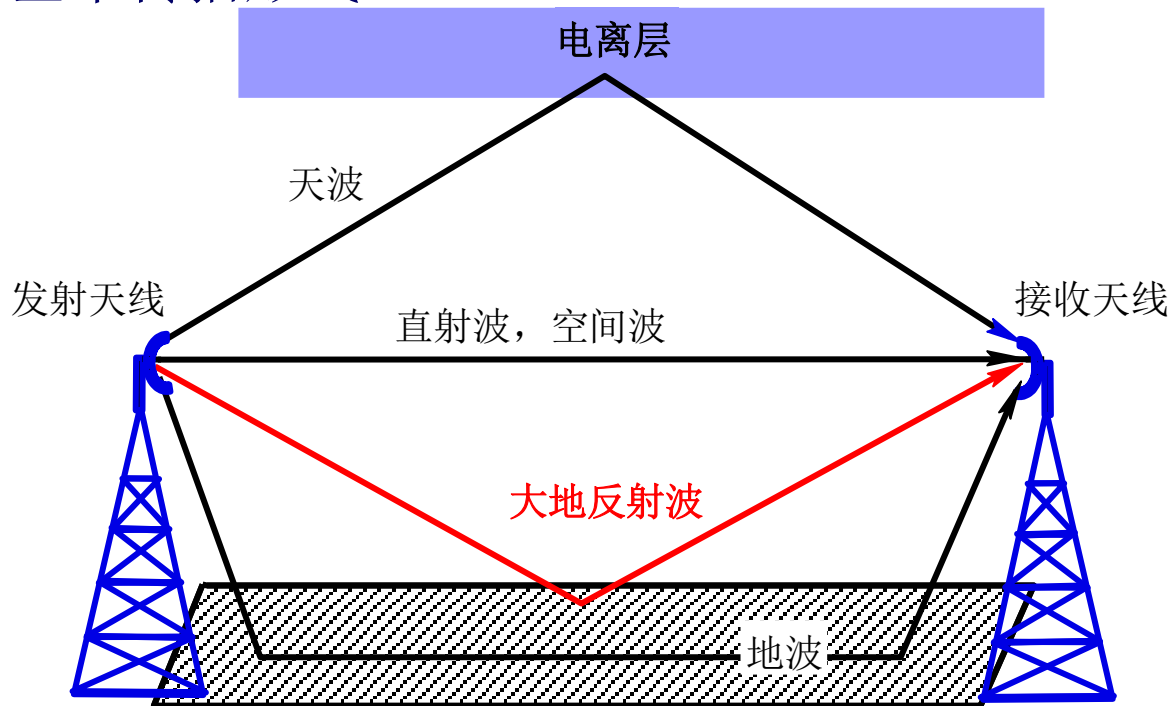


由多根光纤  
构成的光缆



### 4.1.3 无线传输信道

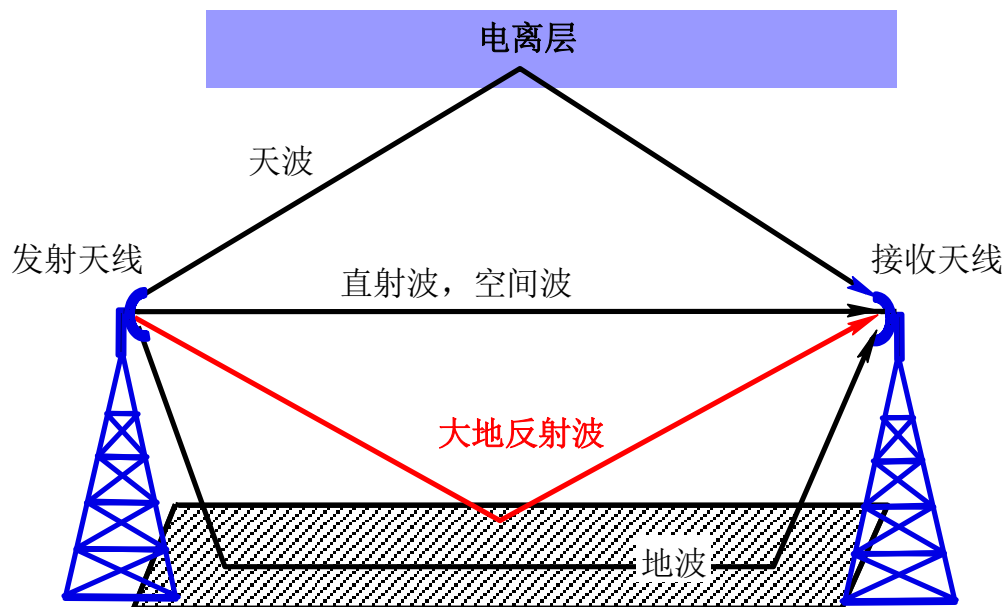
无线信道的介质是自由空间，电磁波在大气层、电离层或外层空间传送，如短波电离层、散射信道、微波视距信道、卫星远程自由空间的恒定参数信道等。图4.12显示了在两个天线之间的基本传播形式。





根据通信距离、频率和位置的不同，电磁波的传播分为地波、空间波（包括直射波和大地反射波）和天波。

频率低于1.5MHz以下时，地波将提供最好的覆盖，随着频率的增高，地波损耗会迅速增加。高频波的传播主要利用天波，甚高频以上的频率借助于空间波进行传播。





### 1) 地波传播

地波(Ground Wave)是沿地球表面传播的一种电磁波，很容易穿过一般建筑物，地波有时也称为表面波(Surface Wave)。

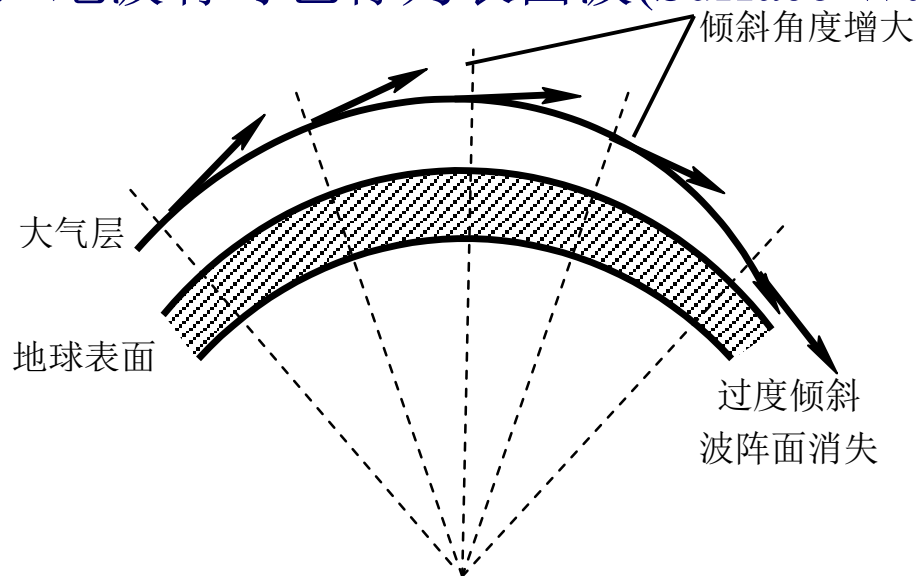


图4.13 地波传播

地球的大气密度存在着密度梯度，即随着离开地球表面距离增大大气密度逐渐减小，由此造成波阵面的倾斜，随着向前传播，波阵面的倾斜逐渐增大。因此，地波能够保持贴近地球表面并绕着地球表面传播。



地波传播的优点如下：

- (1) 地波传播可提供足够大的功率，地波用于世界上任何两地之间的长距离通信。
- (2) 大气条件的改变对地波传播基本上不产生影响。

地波传播的缺点如下：

- (1) 地波传播需要很大的发射功率。
- (2) 地波传播的频率限制在甚低频(VLF)、低频(LF)以及中频(MF)范围内，并且需要大尺寸的天线。
- (3) 地面损耗随表面材料不同会发生明显变化。

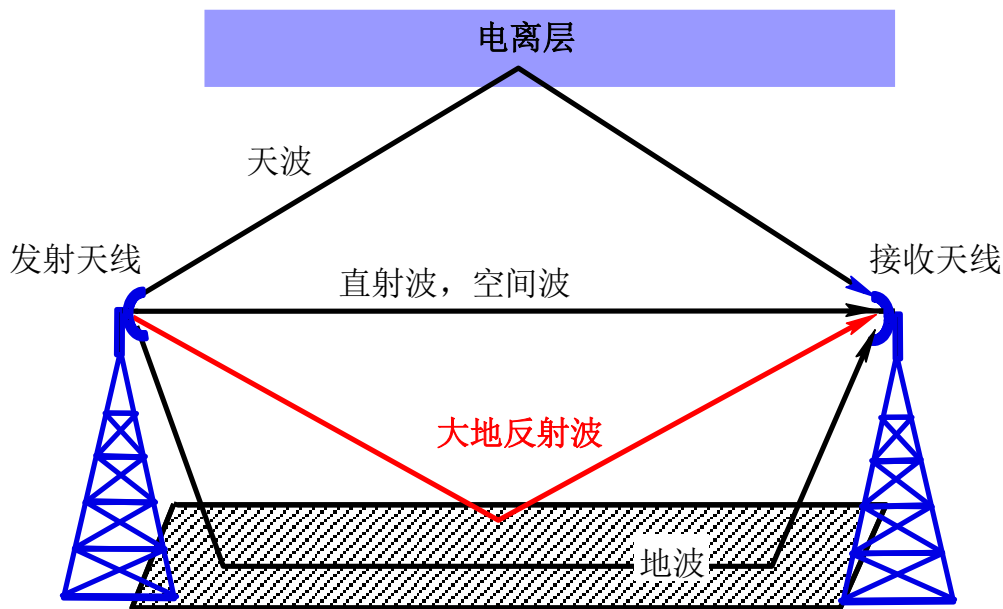


### 2) 空间波

空间波包括直射波和地面反射波。

- 直射波(Direct Wave)在发射天线与接收天线之间以直线传播。以直射波传播的空间波称为视距传输(Line of Sight, LOS)。
- 地面反射波(Ground Reflected Wave)是在发射机和接收机之间靠地球表面对波的反射进行传播的。

为了增加在地面上的传播距离，最简单的办法是提高天线的高度，从而增大视线距离。





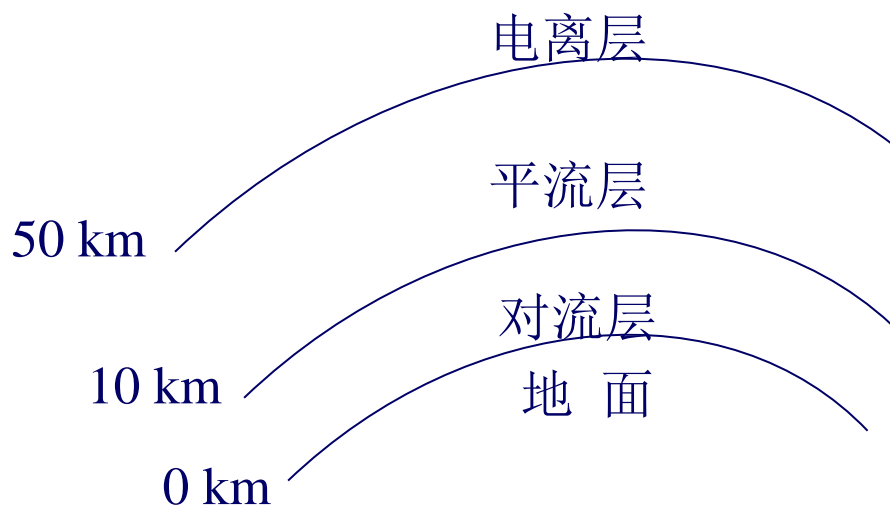


### 3) 天波

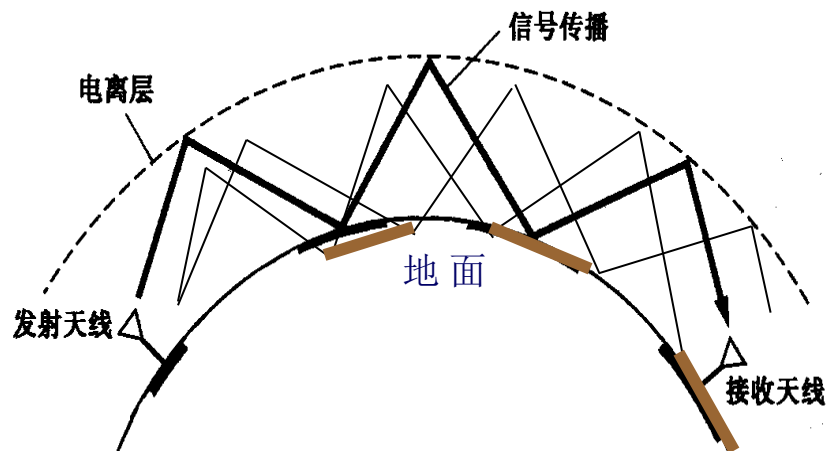
天波是朝着天空辐射并凭借电离层反射或折射回地面的。

一般天波(Sky Wave)是在某一方向上相对于地球仰起一个很大的角度来辐射的电磁波。

正是由于这个原因，天波传播的这种形式有时也称为电离层传播。



地球大气层的结构



天波传播



# 4.2 传输技术基础

信息传输技术依据被传信号是模拟信号还是数字信号分成模拟传输技术和数字传输技术两大类。

## 4.2.1 模拟传输技术基础

依据信号在传输时是否经过调制（即载波频率搬移），完成模拟信号传输的系统分为：基带模拟传输系统和高频窄带模拟传输系统。

### 1. 模拟基带传输系统

如果模拟传输系统不对传输的信号进行任何频率变换（调制），则称该系统为基带传输系统。



自然界的任何非电量信息 $m(t)$ ，经过非电/电量变换后的通信信号 $f(t)$ ，其频率成分分布在接近0Hz频率到某一频率的有限频段范围内，因此称为**基带信号**。

如人类的语音信号大部分频率成份在300Hz~3.4KHz范围内，是有限带宽的信号。

若某传输系统直接传输 $f(t)$ 信号，不再进行其它变换，这种传输系统就称为**基带模拟传输系统**，如图4.15所示。



图4.15 基带模拟传输系统



### 2. 高频窄带模拟传输系统

对信源端发出的电信号进行一些调制的变换，将频率搬到某高频率载波附近，使 $f(t)$ 成为已调信号 $S(t)$ 的传输系统，称为高频窄带模拟传输系统，如图4.16所示。

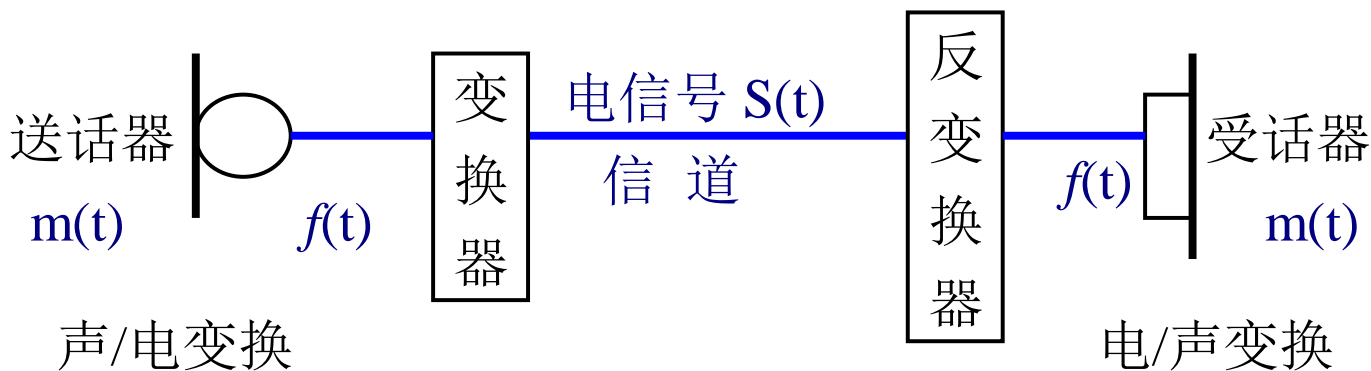


图4.16高频窄带模拟传输系统



从消息变换过来的原始信号具有频率较低的频谱分量，这种信号在许多信道中不能直接传输。因此，在通信系统的发送端通常需要调制过程，在接收端需要解调过程。

### 基本概念：

- **调制信号**：指来自信源的基带信号。
- **载波**：未受调制的周期性振荡信号，它可以是正弦波，也可以是非正弦波。
- **已调信号**：载波受调制后称为已调信号。
- **解调（检波）**：调制的逆过程，其作用是将已调信号中的调制信号恢复出来。
- **载波调制**：用调制信号去控制载波的参数的过程。



# 调制的目的

- 对基带信号进行频率搬移使其适合在特定信道中传输
  - 便于无线发射，减小天线尺寸。
  - 把多个基带信号分别搬移到不同的载频处，以实现信道的多路复用，提高信道利用率。
  - 扩展信号带宽，提高系统抗干扰、抗衰落能力，还可实现传输带宽与信噪比之间的互换。
- 常见的模拟调制
  - 幅度调制：调幅、双边带、单边带和残留边带
  - 角度调制：频率调制、相位调制



高频窄带调制/解调技术所用的典型技术是调制/解调技术。调制/解调技术的基本部件是调制/解调器，结构如图4.17所示，由本地振荡器、低通滤波器、乘法器组成。

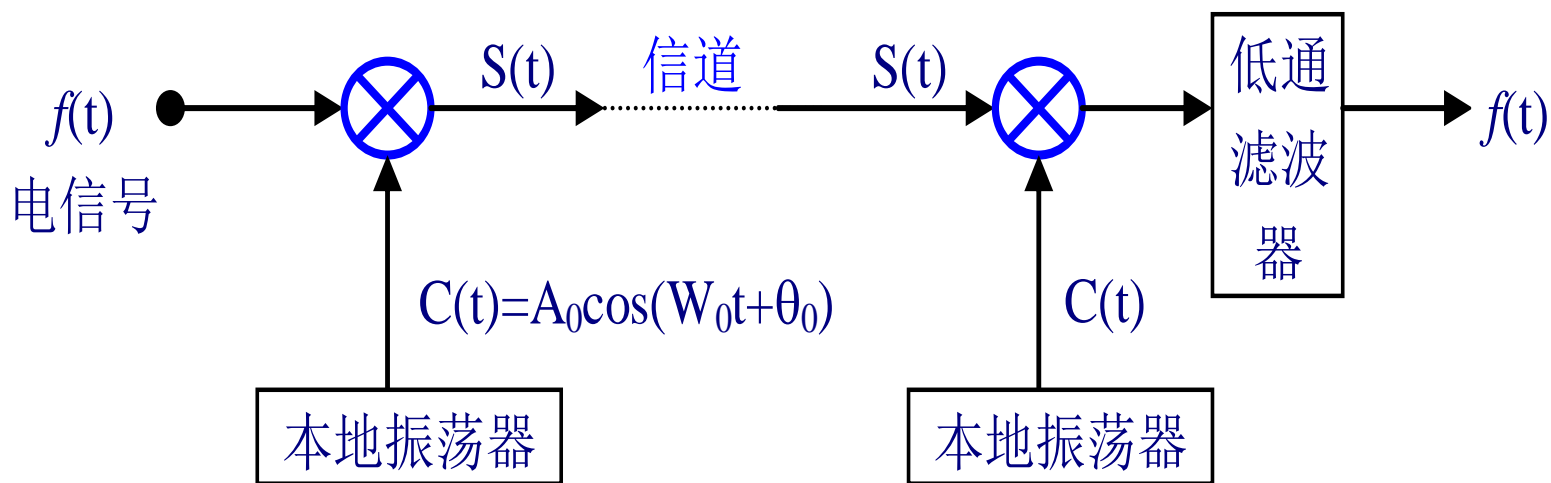


图4.17调制/解调器系统



设消息信号为 $m(t)$ ，经非电/电变换后信号为 $f(t)$ 。

在调制/解调技术中：

- 调制信号： $f(t)$ ，来自信源的基带信号。
- 载波信号：本地振荡器产生的正弦信号 $C(t)=A_0\cos(\omega_c t+\theta_0)$ ，其中 $A_0$ 、 $\omega_c$ 、 $\theta_0$ 这三个分别为振幅、频率和相位参数。
- 载波调制：用调制信号去控制载波的参数的过程：
  - ①调幅：用电信号 $f(t)$ 去调制载波信号 $C(t)$ 的振幅 $A_0$ 的调制技术。
  - ②调频：用电信号 $f(t)$ 去调制载波信号 $C(t)$ 的角频率 $\omega_c$ 的调制技术。
  - ③调相：用电信号 $f(t)$ 去调制载波信号 $C(t)$ 的相位 $\theta_0$ 的调制技术。





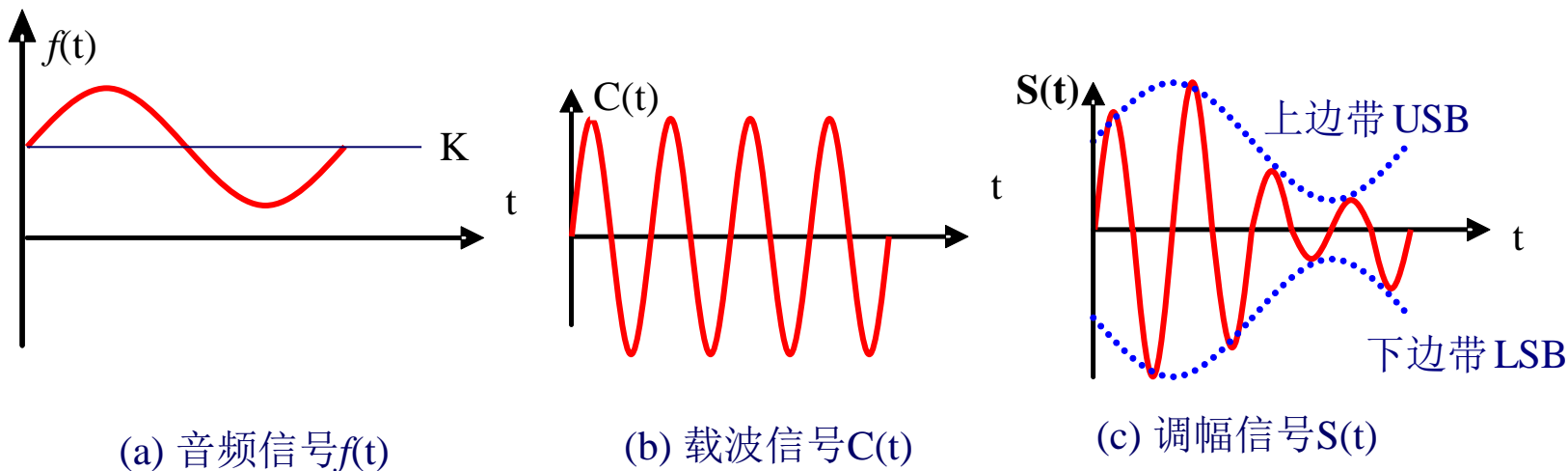
### (1) 调幅 (AM) Amplitude Modulation

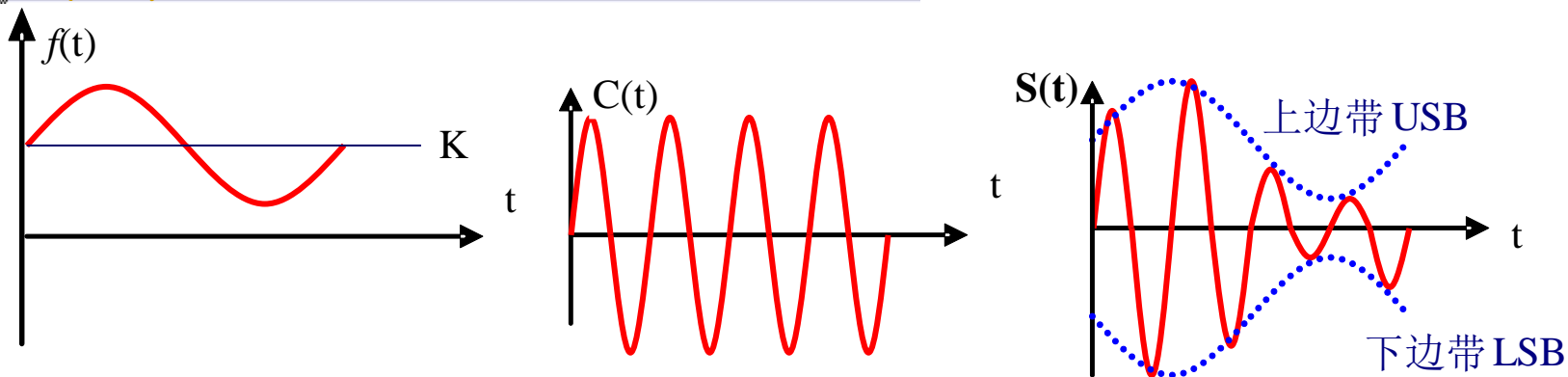
设载波信号为 $C(t) = A_0 \cos(\omega_c t + \theta_0)$ ，调制信号为 $f(t)$ ，其对应的频谱为 $F(\omega)$ ，当这两个信号同时送到乘法器上相乘，所产生的输出信号称为已调信号 $S(t)$ 。

$$S(t) = C(t) \cdot f(t) = A_0 f(t) \cdot \cos(\omega_c t + \theta_0)$$

音频信号 $f(t) = K + m(t)$ ， $K$ 为外加的直流分量。

载波信号 $C(t)$ 和已调信号 $S(t)$ 的波形如图4.18所示。





从图中看出，在时域上已调信号 $S(t)$ 的包络与 $f(t)$ 的波形变化一致，因此称调幅。

如果对 $f(t)$ 和 $s(t)$ 分别作傅里叶变换分析，设 $S(t)$ 对应的频谱为 $S(\omega)$ ，信号 $f(t)$ 对应频谱为 $F(\omega)$ ，信号 $m(t)$ 对应频谱为 $M(\omega)$ 。

根据信号傅里叶变换性质，在频域上有：

$$S_{AM}(\omega) = \pi A_1 [\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)] + \pi A_0 [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

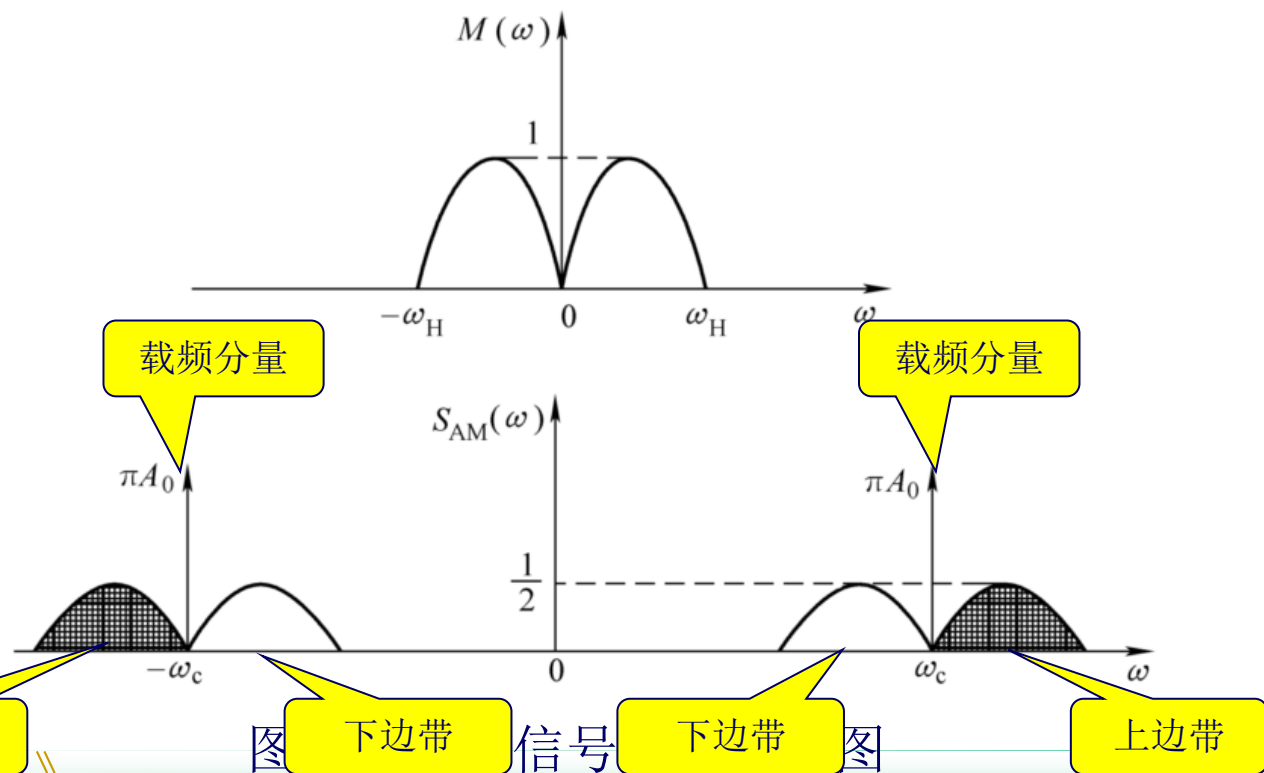
其中，直流部分分量 $A_1 = KA_0$



$S(t)$ 对应的频谱 $S(\omega)$ 是信号 $m(t)$ 对应频谱 $M(\omega)$ 在频域上的简单搬移。

$M(\omega)$ 在频域被搬移到载波频率 $\omega_c$ 附近形成双边带。

$S(\omega)$ 由集中于附近的上边带（图4.19中加黑部分）和下边带组成，且下边带是上边带的反褶，如图4.19所示。





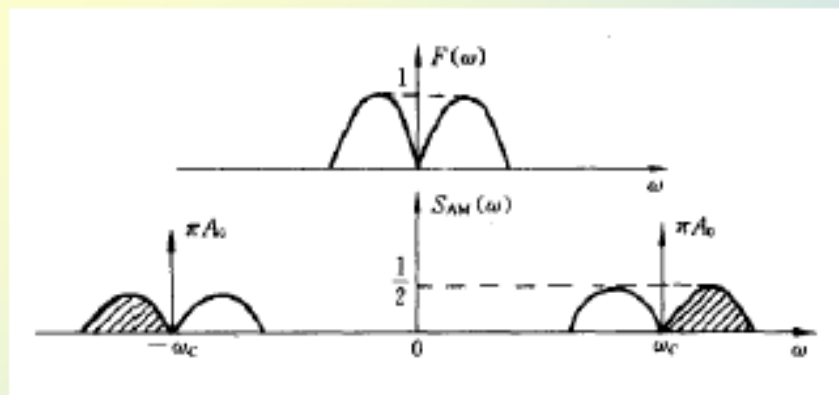
## AM信号的特点

● 优点：结构简单，实现容易，适用于广播通信。

● 缺点：

■ 功率效率非常低，最大为 $1/3$

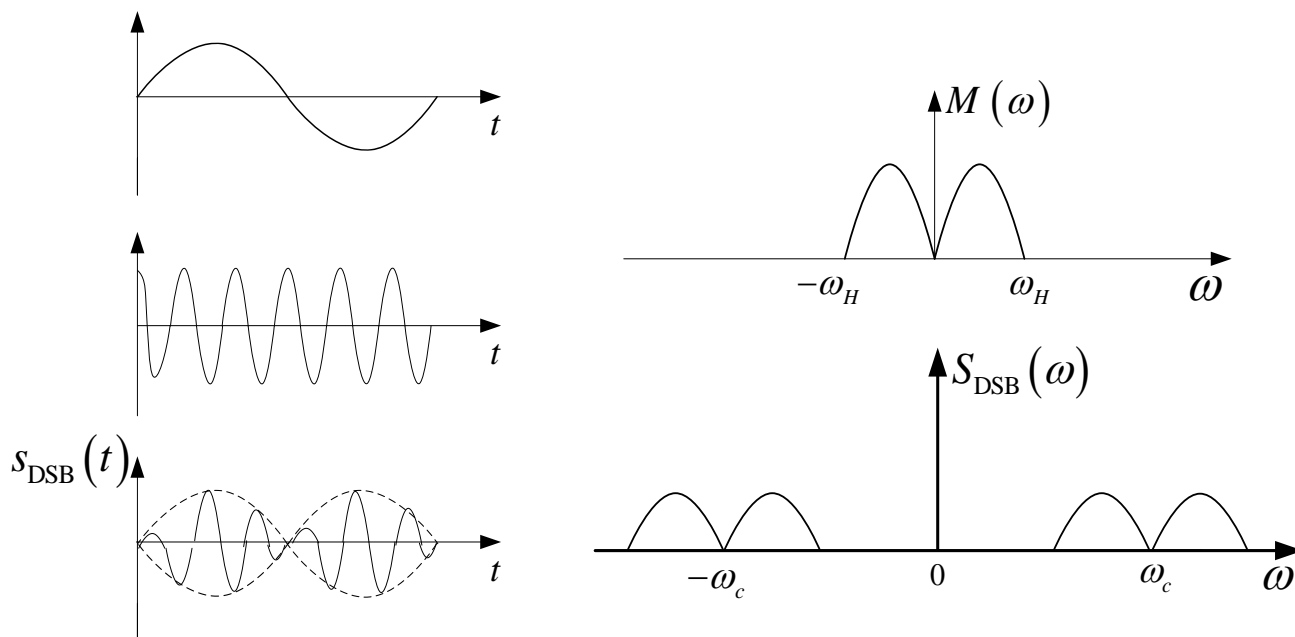
■ 频谱效率也不高，为信号最高频率的2倍。





### (2) 抑制载波双边带调幅 (DSB)

在调幅信号中，载波分量并不携带信息，信息完全由边带传送，如果将载波抑制掉，只需将 $f(t)$ 信号中的直流分量 $K$ 抑制掉，即可输出抑制载波的双边带调幅信号。





### DSB特点

$$S_{DSB}(\omega) = \frac{1}{2}[M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

频谱不存在载波分量；

- 调制效率：100%
- 优点：节省了载波功率
- 缺点：不能用包络检波，需用相干检波，较复杂。

**DSB信号的带宽仍然是基带信号的两倍，与AM信号带宽相同。**



### (3) 单边带调幅 (SSB)

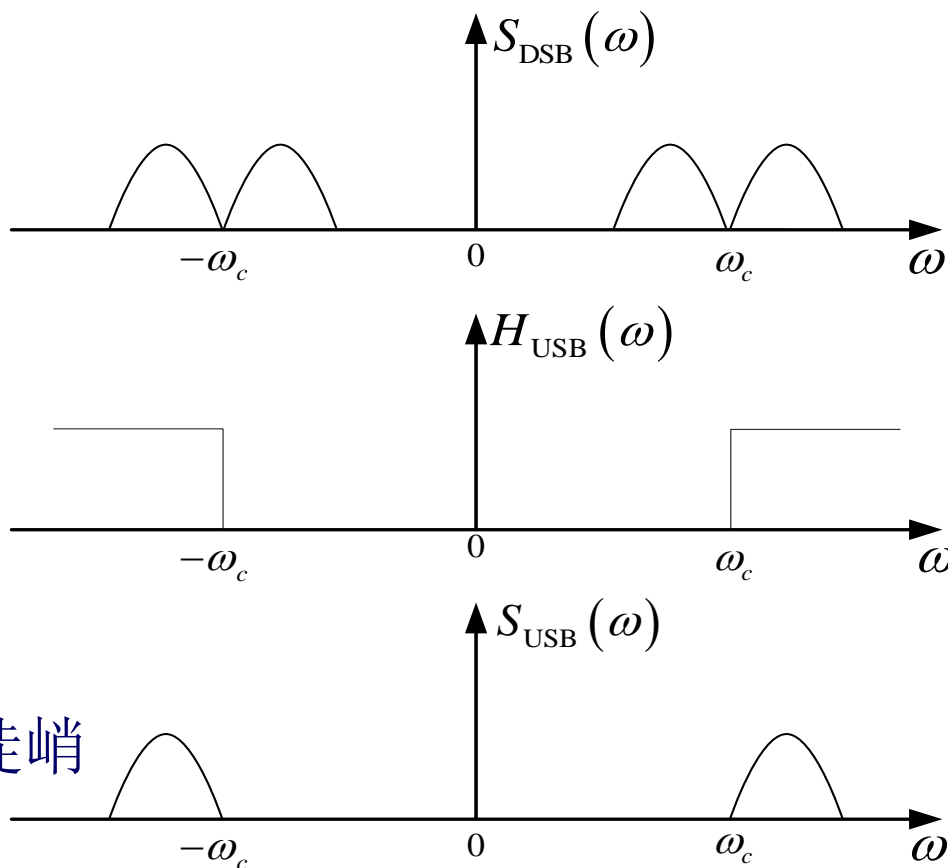
- 双边带信号两个边带中的任意一个都包含了调制信号频谱  $M(\omega)$  的所有频谱成分，因此仅传输其中一个边带即可。这样既节省发送功率，还可节省一半传输频带，这种方式称为单边带调制。
- 产生SSB信号的方法有两种：滤波法和相移法。



## SSB信号的频谱

$$S_{SSB}(\omega) = S_{DSB}(\omega) \cdot H(\omega) \quad H(\omega) \text{ 为高通滤波器}$$

上边带频谱图:



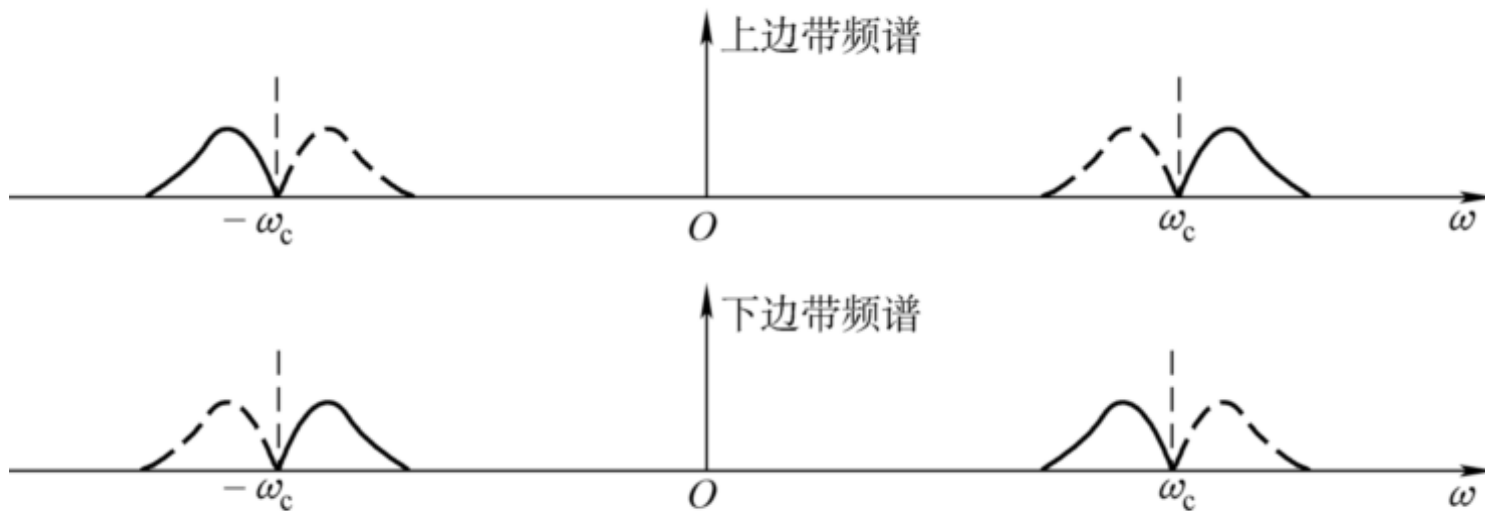
滤波法的技术难点:  
边带滤波器的制作  
滤波特性很难做到具有陡峭  
的截止特性





### 单边带调幅SSB的特点

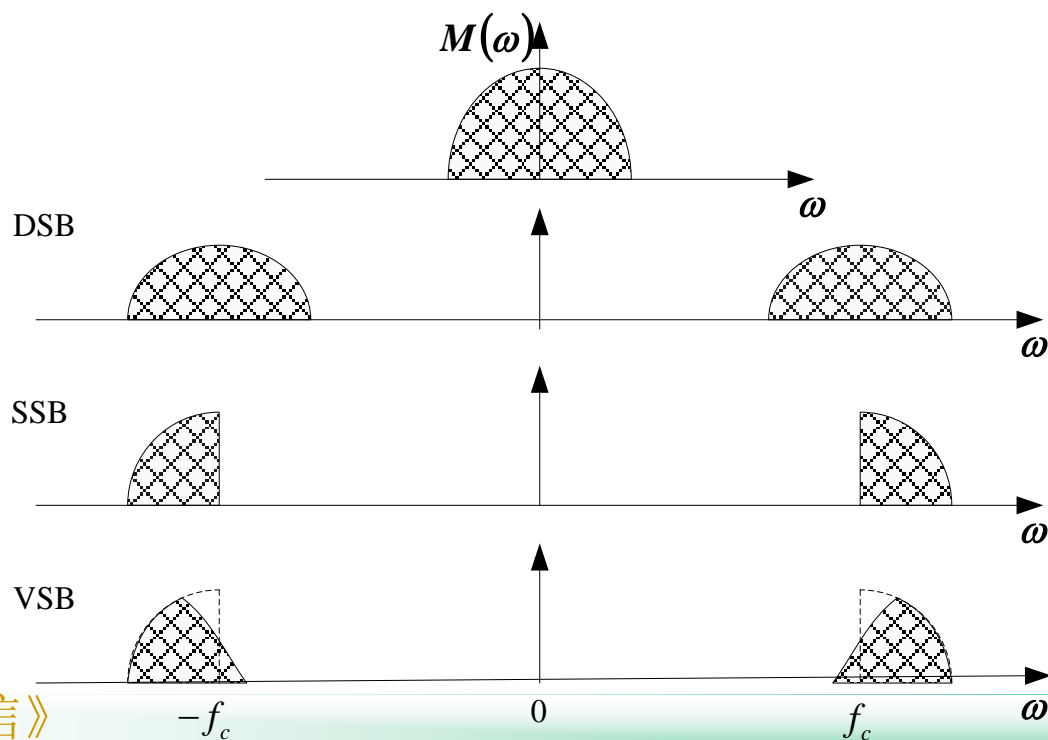
SSB信号的实现比AM、DSB要复杂，但SSB调制方式在传输信息时，不仅可节省发射功率，而且它所占用的频带宽度比AM、DSB减少了一半。它目前已成为短波通信中一种重要的调制方式。





### (4)残留边带调制 (VSB)

残留边带调制是介于SSB与DSB之间的一种折衷方式，既克服了DSB信号占用频带宽的缺点，又解决了SSB信号实现中的困难。在这种调制方式中，不像SSB那样完全抑制DSB信号的一个边带，而是逐渐切割，使其残留一小部分，如下图所示：



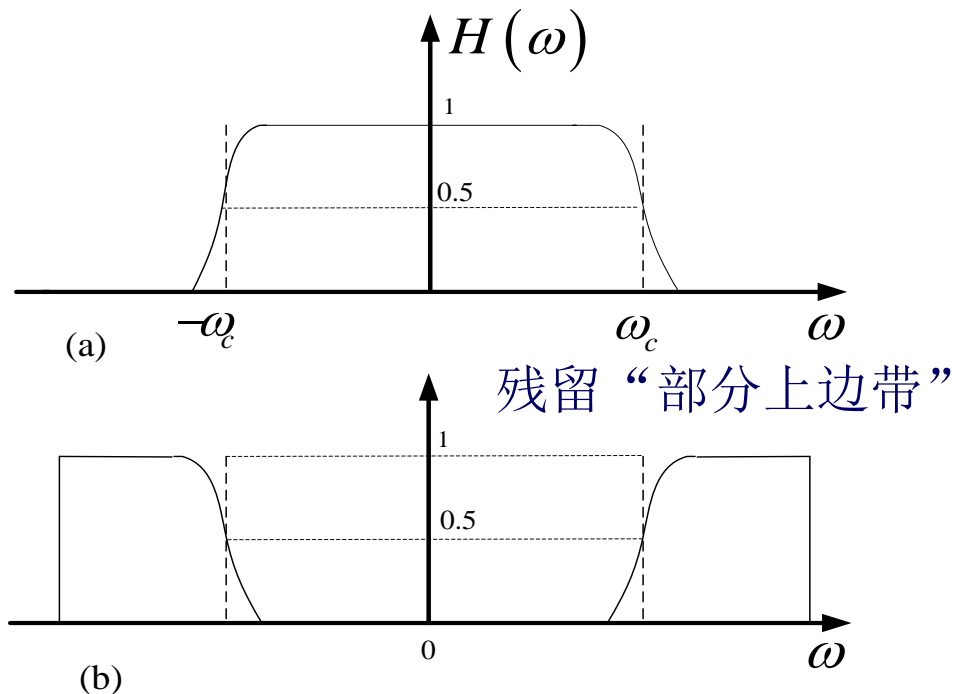


### 对残留边带滤波器特性的要求

残留边带信号的频谱为

$$S_{VSB}(\omega) = S_{DSB}(\omega) \cdot H(\omega) = \frac{1}{2}[M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]H(\omega)$$

残留边带滤波器传输特性 $H(\omega)$



残留边带滤波器的特性 $H(\omega)$ 在 $\omega_c$ 处必须具有**互补对称（奇对称）特性**, 相干解调时才能无失真地从残留边带信号中恢复所需的调制信号。

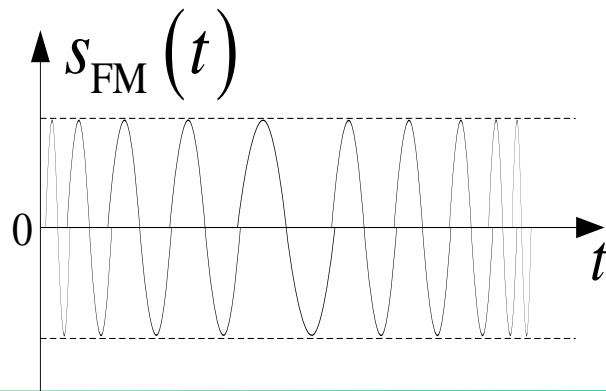


### (5) 调频 (FM)

用载波的角频率 $\omega$ 来携带信源的信息。将信源端 $f(t)$ 幅度的变化用于控制压控振荡器控制载波频率的变化，其输出就为调频波 $S(t)$ ，调频波的疏和密与 $f(t)$ 的幅度大小有关。

### (6) 调相 (PM)

由载波的相位分量来携带信源的消息，以载波相位的变化表示信号 $f(t)$ 幅度的变化。





# 非线性调制

- 频率调制简称调频(FM)，相位调制简称调相(PM)。
- 这两种调制中，载波的幅度都保持恒定，而频率和相位的变化都表现为载波瞬时相位的变化。
- 已调信号频谱不再是原调制信号频谱的线性搬移，而是频谱的非线性变换，会产生与频谱搬移不同的新的频率成分，故又称为**非线性调制**。
- 非线性调制：**频率调制和相位调制的总称**。
- 与幅度调制技术相比，非线性最突出的优势是其较高的抗噪声性能。



# 模拟传输系统的特点与应用

- **AM**: 优点是接收设备简单; 缺点是功率利用率低, 抗干扰能力差。主要用在中波和短波调幅广播。
- **DSB**调制: 优点是功率利用率高, 且带宽与AM相同, 但设备较复杂。应用较少, 一般用于点对点专用通信。
- **SSB**调制: 优点是功率利用率和频带利用率都较高, 抗干扰能力和抗选择性衰落能力均优于AM, 而带宽只有AM的一半; 缺点是发送和接收设备都复杂。**SSB**常用于频分多路复用系统中。
- **VSB**调制: 抗噪声性能和频带利用率与SSB相当。在电视广播等系统中得到了广泛应用。
- **FM**: FM的抗干扰能力强, 广泛应用于长距离高质量的通信系统中。缺点是频带利用率低。



### 4.2.2 数字传输技术基础

数字通信抗噪声干扰能力强，无噪声积累。数字信号便于集成、加密和处理。

数字传输技术可以分为数字基带传输和数字频带传输两大类。

#### 1. 数字基带传输

所谓**基带传输**，是指不经过调制而直接将原始基带信号送到线路上进行传输的一种方式。

信源端的模拟信号经过PCM数字化编码后，输出的数字信号是以基群（低次群）的码流，该码流可不经调制，直接在电缆上作短距离传输，我们称之为**基带传输**。

在此信道上传输的数字信号称为数字基带信号。常用于传输距离不太远的情况下。



### (1) 数字基带信号

1) 单极性不归零 (NRZ) 码：设消息代码由二进制符号0、1组成，基带信号的0电位及正电位分别对应数字信号0和1，NRZ码的基带信号及频谱可用图4.22表示：

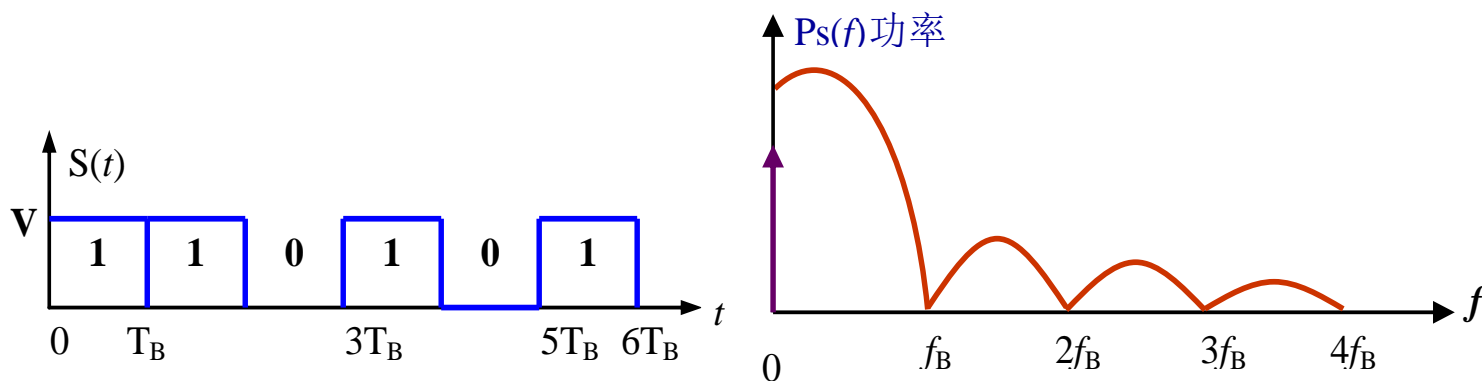


图4.22单极性 (NRZ) 不归零码及功率谱图

NRZ频谱含有直流分量和丰富的低频分量，因此不适合做基带传输码型。只适用于计算机内部或极近距离的传输。





### 2) 双极性不归零码:

双极性波形就是二进制符号0、1分别与正、负电位对应的波形，如图4.23所示：

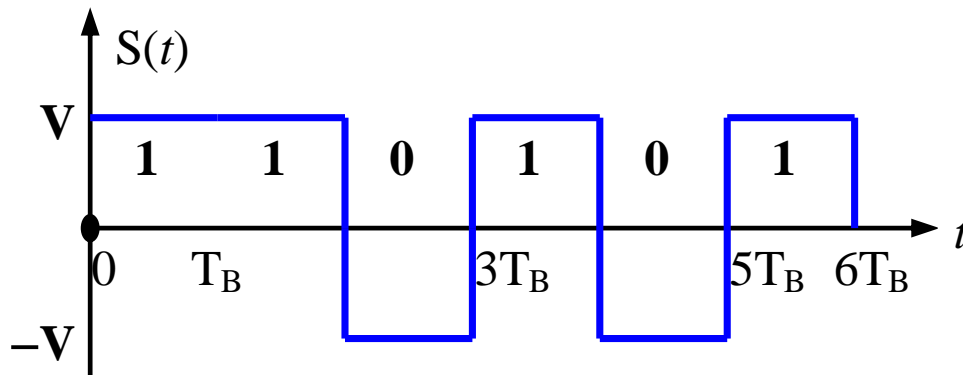


图4.23 双极性不归零码

当“1”和“0”等概率出现时无直流分量，有利于在信道中传输，并且在接收端恢复信号的判决电平为零值，因而不受信道特性变化的影响，抗干扰能力也较强。



### 3)单极性归零码:

单极性波形就是二进制符号0、1分别与零、正电位对应，且有电脉冲宽度比码元宽度窄的波形，每个脉冲都回到零电位，如图4.24所示。

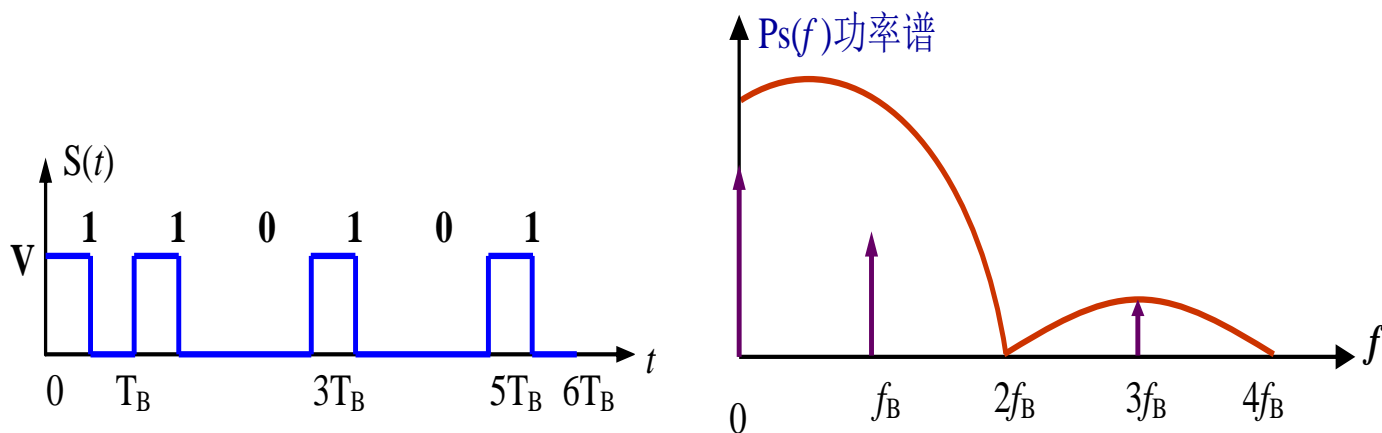


图4.24 单极性归零码（RZ）及功率谱

归零波形使用半占空码，即占空比为50%。从单极性RZ波形可以直接提取定时信息。



### 4) 双极性归零码:

双极性波形就是二进制符号0、1分别与正、负电位对应的波形，如图4.25所示。

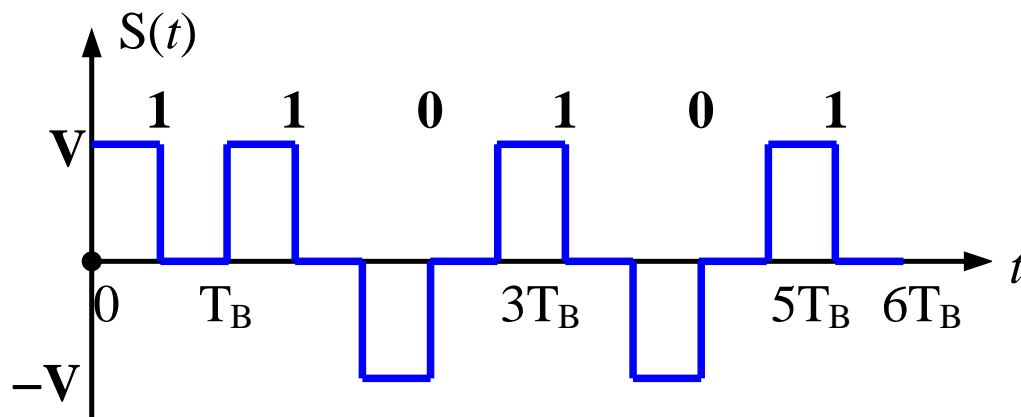


图4.25 双极性归零（RZ）码

双极性归零码兼有双极性和归零波形的特点。相邻脉冲之间必定留有零电位的间隔。使得接收端很容易识别出每个码元的起止时刻，便于同步。



### (2) 常用的数字基带传输码型

根据电缆信道的特点及传输数字信号的要求，为了不使在信道中传输的数字信号产生严重畸变，选择的数字基带码要满足以下几个条件：

- ①不含直流，且低频分量尽量少；
  - ②应含有丰富的定时信息，以便于从接收码流中提取定时信号。
  - ③ 码型应具有一定的检错(检测误码)能力，即码型应具有一定规律性，以便利用这一规律性进行宏观监测。
  - ④ 设备简单、易于实现。编译码简单，以降低通信延时和成本。
- 满足或部分满足以上特性的传输码型种类繁多，下面介绍常见的几种码型。



### 1) 双极性半占空码(AMI)码:

也称为双极性半占空交替反转码

编码规则：将消息码的“1”(传号)交替地变换为“+1”和“-1”，而“0”(空号)保持不变。

例：

消息码： 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 ...

AMI码： 0 1<sub>-</sub> 1<sub>+</sub> 0 0 0 0 0 0 0 1<sub>-</sub> 1<sub>+</sub> 0 0 1<sub>-</sub> 1<sub>+</sub> ...

AMI码对应的波形是具有正、负、零三种电平的脉冲序列。



**【例4.7】** 已知二进制代码为110101，按AMI编码规则编出信道码。

**解** 编出的AMI码为：  $1_+ 1_- 0 1_+ 0 1_-$ 。其编码波形及频谱图如4.26所示。

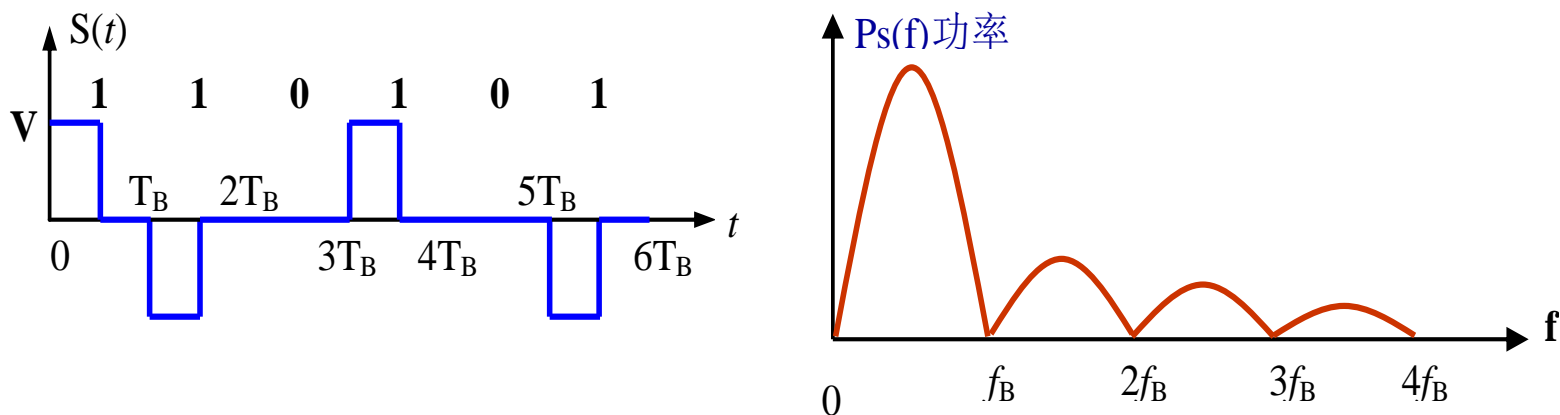


图4.26 AMI码及功率谱



- ✓AMI码的优点：没有直流成分，且低频分量少，编译码电路简单，且可利用传号极性交替这一规律观察误码情况；如果它是AMI-RZ波形，接收后只要全波整流，就可变为单极性RZ波形，从中可以提取位定时分量。
- ✓AMI码的缺点：当原信码出现长连“0”串时，信号的电平长时间不跳变，造成提取定时信号的困难。
- ✓解决连“0”码问题的有效方法之一是采用HDB3码。



### 2) HDB3码:

三阶高密度双极性码的简称，是一种改进的AMI码。

普通二进制码流变换为HDB3码的编码规则如下：

- ①在数码流中当连续出现四个以上连“0”时，从第一个“0”起到四个连“0”中，最后一个“0”用“V”码取代，此位码称极性破坏点。
- ②各“V”码必须进行极性交替(为保证传号码极性交替不引入直流成分)。
- ③相邻“V”码间，前一“V”码与后相邻的原传号“1”码，应使之符合极性交替原则(符合AMI码变换规律)。
- ④要使“V”码前面相邻一定出现一个与之极性相同的码位(满足“V”码为极性破坏点要求)。按前三步骤变换后也可能会出现与“V”码同极性的码，当没有出现时，就将四连“0”中的第一个“0”用B码取代，使B与它后邻的取代V码同极性(为了在收端能识别出哪个是取代码以便消除)。

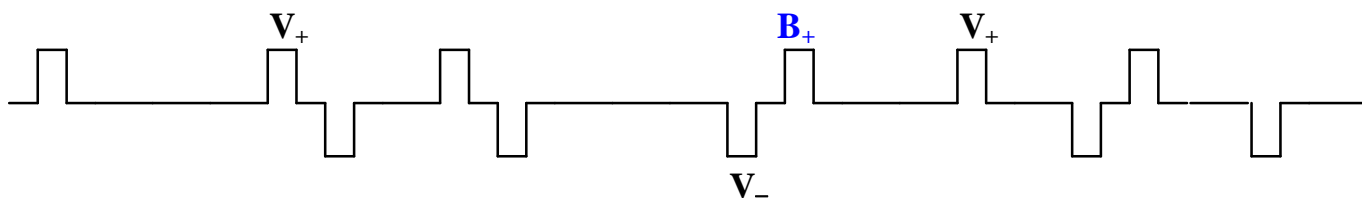




【例】已知二进制码10 0001 0110 0000 0001 1010，试编出其HDB3码。

解：按照HDB3编码规则，首先找出连0码足4个0的码串，码串中4个0用破坏码V取代，然后确定V码正负交替，最后就可以编出HDB3码，编码过程和HDB3码波形如下：

消息代码:	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
					V								V				V					
					V <sub>+</sub>								V <sub>-</sub>				V <sub>+</sub>					
	1 <sub>+</sub>				V <sub>+</sub>	1 <sub>-</sub>		1 <sub>+</sub>	1 <sub>-</sub>				V <sub>-</sub>				V <sub>+</sub>	0	1 <sub>-</sub>	1 <sub>+</sub>		1 <sub>-</sub>
HDB <sub>3</sub> (V <sub>-</sub> ):	1 <sub>+</sub>	0	0	0	V <sub>+</sub>	1 <sub>-</sub>	0	1 <sub>+</sub>	1 <sub>-</sub>	0	0	0	V <sub>-</sub>	B <sub>+</sub>	0	0	V <sub>+</sub>	0	1 <sub>-</sub>	1 <sub>+</sub>	0	1 <sub>-</sub>





### HDB3码的解码规则:

从收到的码序列中检出相邻两个传号脉冲为同极性的破坏码，找到破坏点；

若相邻同极性码间连“0”个数为3，则第一个通信码为原传号码，解码时只将“V”码变成“0”；

若两相邻同极性码间连“0”个数为2，则此两个连“0”前后原码均恢复为“0”，这样就能将HDB3码中连0取代节取消。

例:    1<sub>+</sub> 0 0 0 1<sub>+</sub> 1<sub>-</sub> 0 1<sub>+</sub> 1<sub>-</sub> 0 0 0 1<sub>-</sub> 1<sub>+</sub> 0 0 1<sub>+</sub> 0 1<sub>-</sub> 1<sub>+</sub> 0 1<sub>-</sub> 0  
         1 0 0 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0



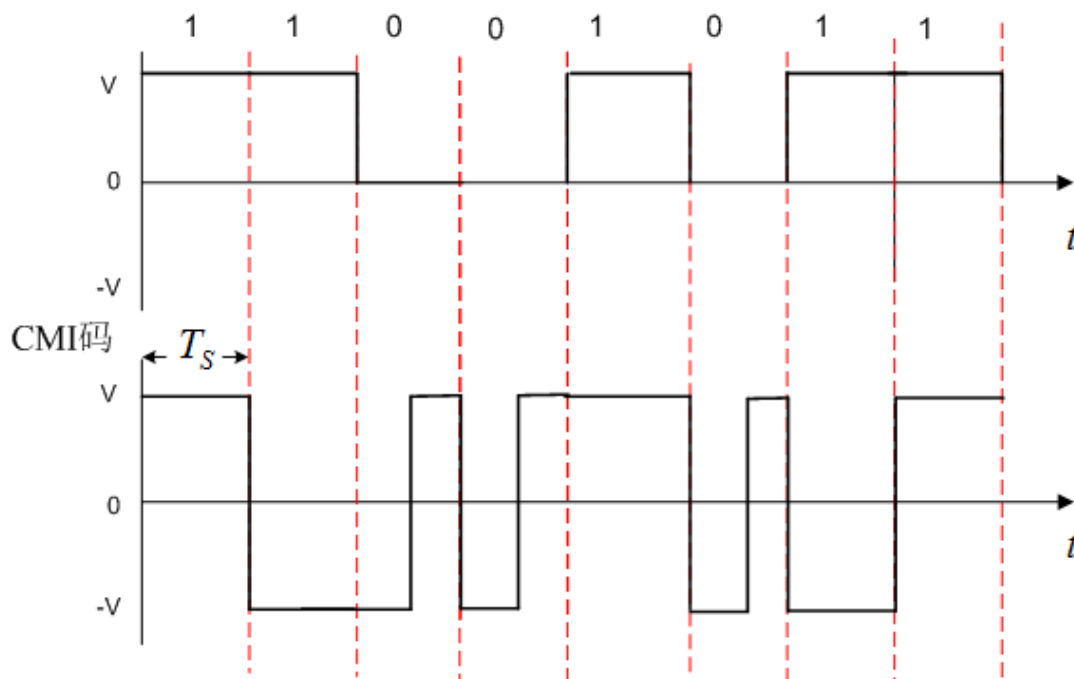
### 3) CMI码:

是传号反转码的简称，其编码规则为：“1”码交替用“11”和“00”表示，“0”码用“01”表示，其中“10”则为禁字不准出现，接收端可据此判决为误码。

**【例4-8】** 二进制码为11001011，编出其CMI码。

**解:** 按CMI码编码规则，则CMI码为1100010111010011。其波形图是一种二电平不归零码，如图所示。

单极性不归零码



教材中P94 图4-27 b)  
CMI码型图错!



### 3) Manchester码:

又称双相码。

- 对每个二进制码分别利用两个具有不同相位的二进制新码取代。
- “0”码用“01”两位码表示，“1”码用“10”两位码表示

例:

消息码: 1 1 0 0 1 0 1

双相码: 10 10 01 01 10 01 10

优缺点:

双相码波形是一种双极性NRZ波形，只有极性相反的两个电平。它在每个码元间隔的中心点都存在电平跳变，所以含有丰富的位定时信息，且没有直流分量，编码过程也简单。缺点是占用带宽加倍，使频带利用率降低。



### 5) 密勒码:

又称延迟调制码

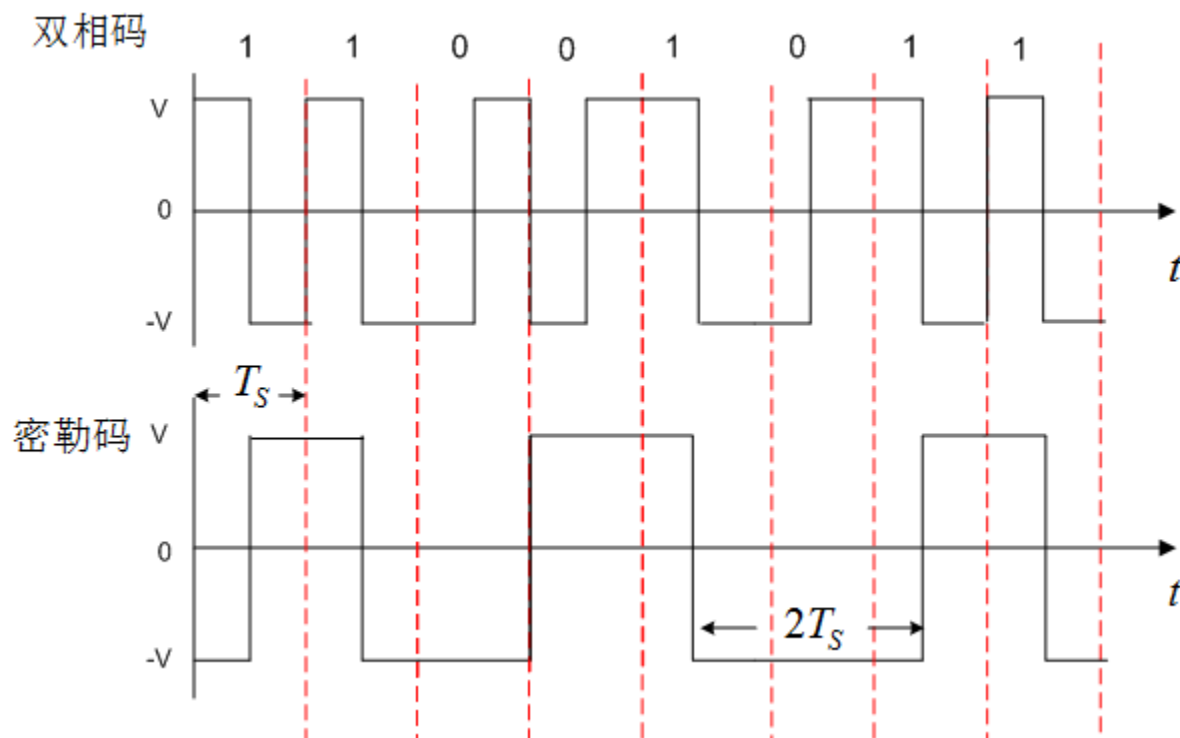
编码规则:

- “1”码用码元中心点出现跃变来表示, 即用 “10”或 “01”表示。
- “0”码有两种情况:
  - 单个 “0”时, 在码元持续时间内不出现电平跃变, 且与相邻码元的边界处也不跃变;
  - 连 “0”时, 在两个 “0”码的边界处出现电平跃变, 即“00”与 “11”交替。



例：上图是双相码的波形；下图为密勒码的波形；

- 若两个“1”码中间有一个“0”码时，密勒码流中出现最大宽度为  $2T_s$  的波形，即两个码元周期。这一性质可用来进行误码检测。
- 用双相码的下降沿去触发双稳电路，即可输出密勒码。





### 6) nBmB码

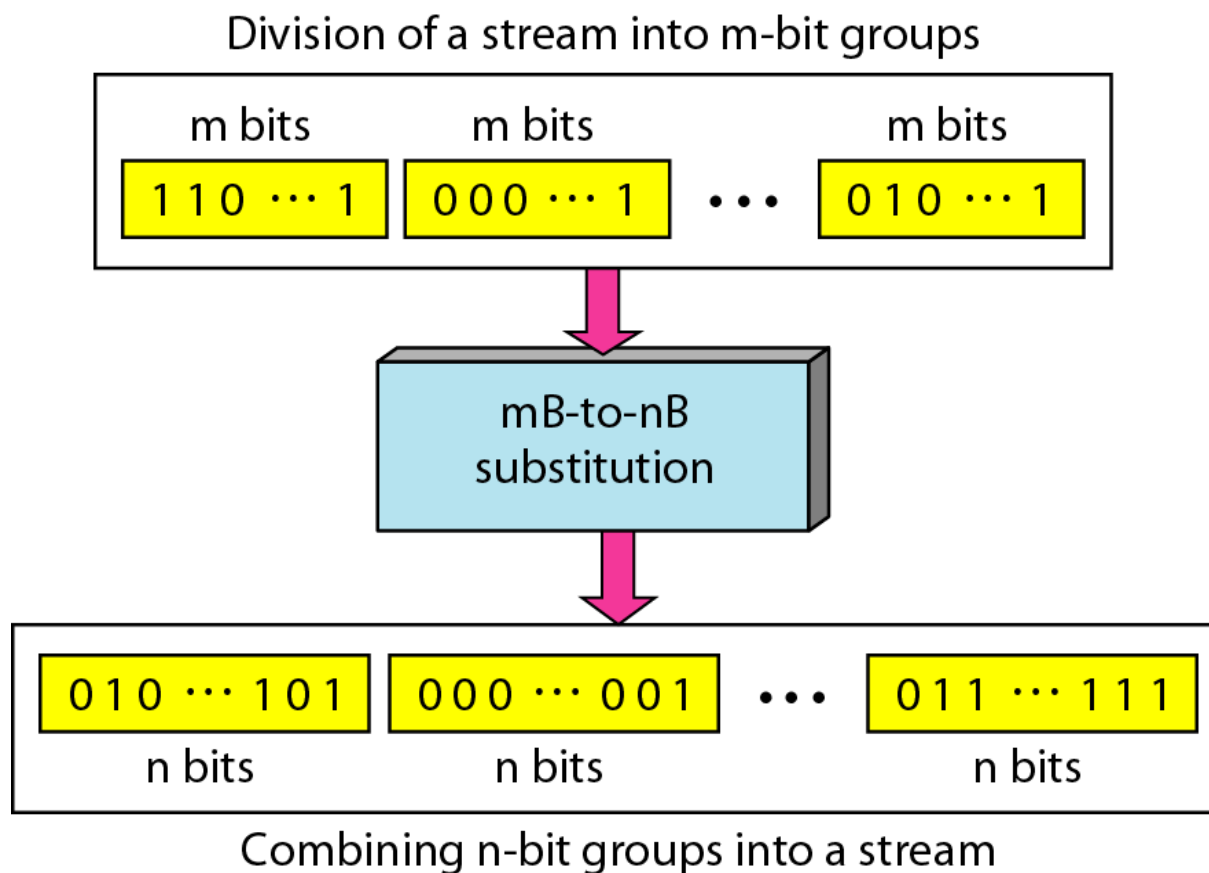
- 为了提高线路编码性能，需要某种冗余来确保码型的同步和检错能力。
- **nBmB码**：把原信息码流的 $n$ 位二进制码分为一组，并置换成 $m$ 位二进制码的新码组。由于 $m > n$ ，新码组可能有 $2^m$ 种组合，故多出 $(2^m - 2^n)$ 种组合。在 $2^m$ 种组合中，以某种方式选择有利码组作为可用码组，其余作为禁用码组，以获得好的编码性能。

例如，在4B5B编码中，用5位的编码代替4位的编码，对于4位分组，只有 $2^4 = 16$ 种不同的组合，对于5位分组，则有 $2^5 = 32$ 种不同的组合。

- ✓ 双相码、密勒码和CMI码都可看作1B2B码。
- ✓ 优缺点：提供了良好的同步和检错功能，但带宽增大。



- Block coding is normally referred to as  $mB/nB$  coding;
- it replaces each  $m$ -bit group with an  $n$ -bit group.

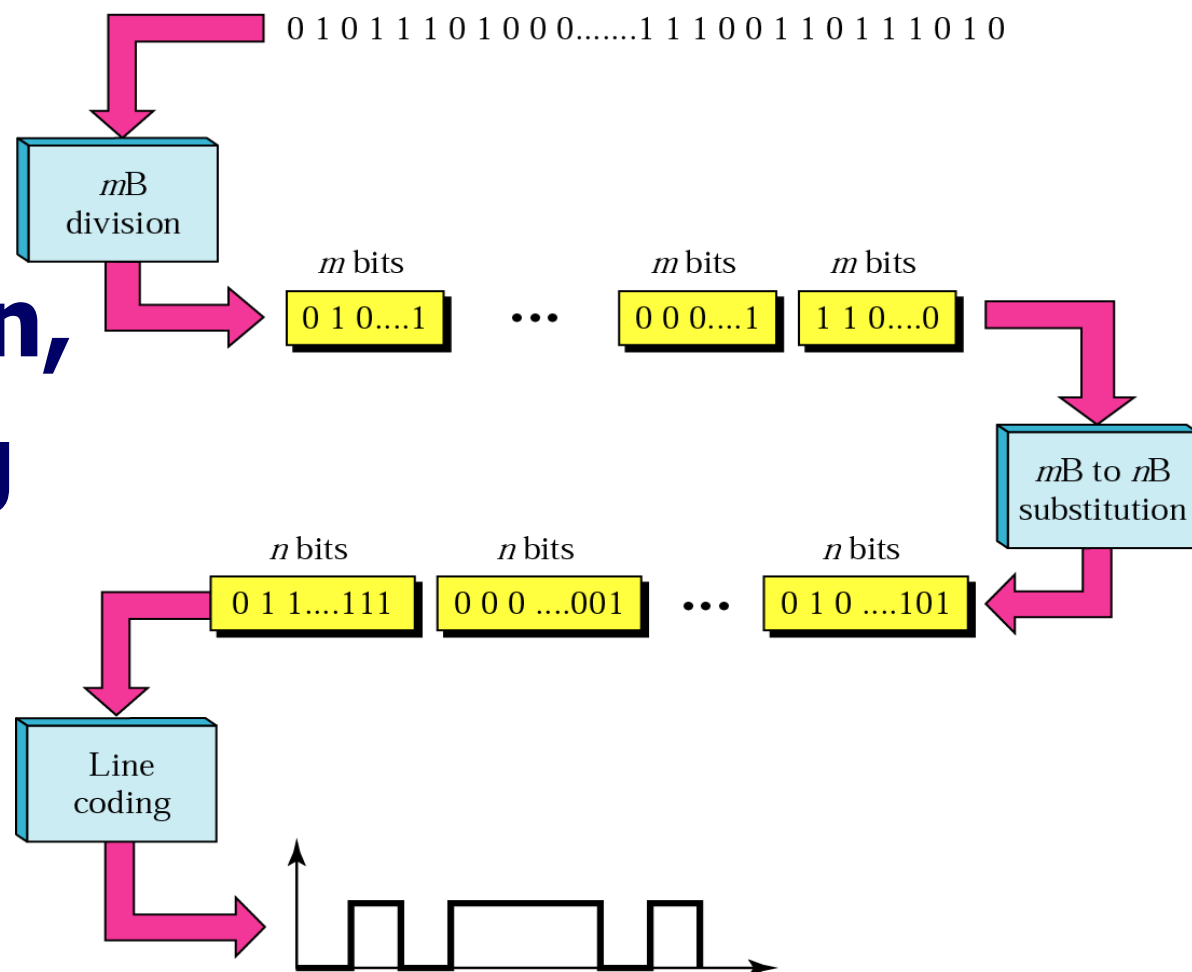


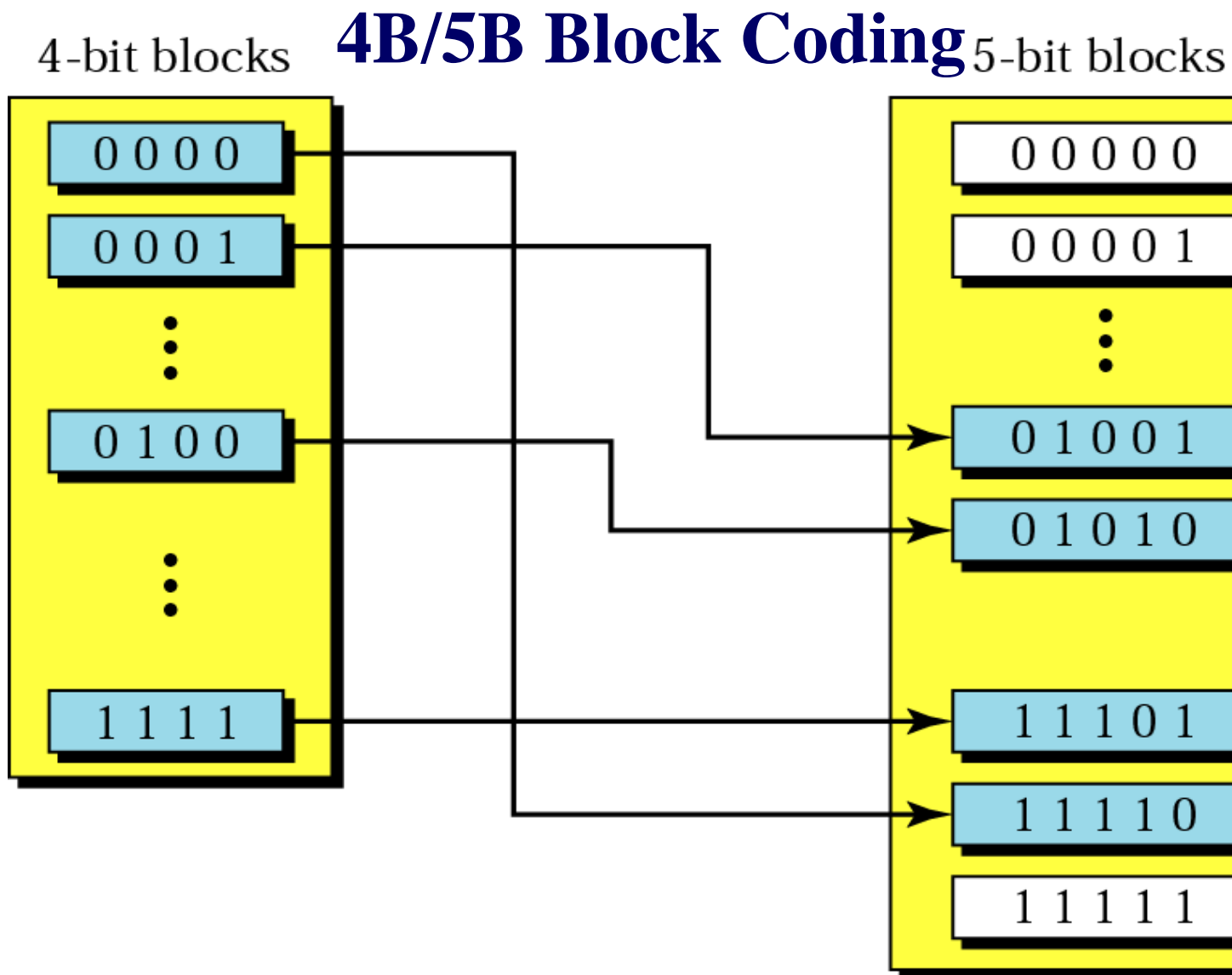




- Stages of operation:

- Division,
- Substitution,
- Line Coding





## 4B/5B Mapping Codes (1/2)

Data	Code	Data	Code
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

- The selection of the 5-bit code is such that each code contains no more than one leading 0 and no more than two trailing 0s.



## 4B/5B Mapping Codes (2/2)

Data	Code
<b>Q (Quiet)</b>	<b>00000</b>
<b>I (Idle)</b>	<b>11111</b>
<b>H (Halt)</b>	<b>00100</b>
<b>J (start delimiter)</b>	<b>11000</b>
<b>K (start delimiter)</b>	<b>10001</b>
<b>T (end delimiter)</b>	<b>01101</b>
<b>S (Set)</b>	<b>11001</b>
<b>R (Reset)</b>	<b>00111</b>



### (3) 数字基带传输系统

基带信号呈现低通型频谱特性，基带传输系统具有低通特性，其基本模型如图4.28所示。

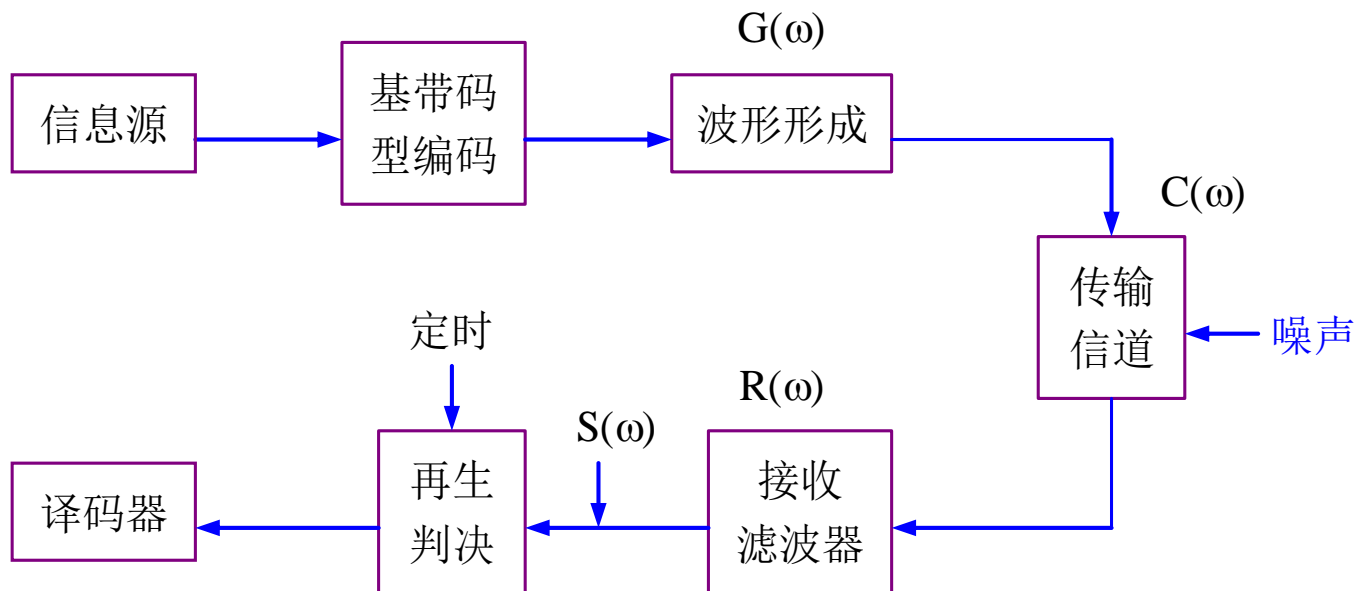
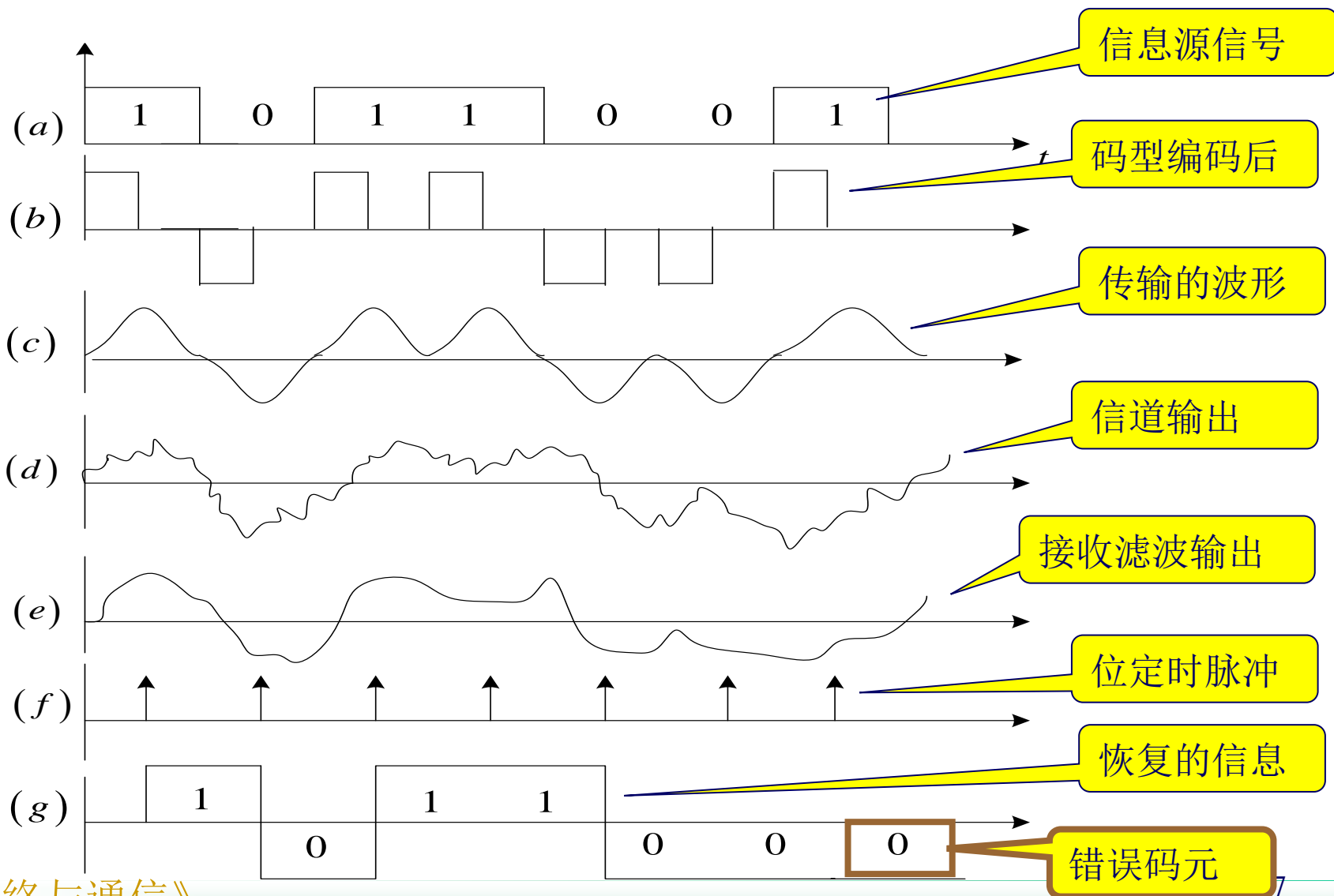


图4.28 数字基带传输系统



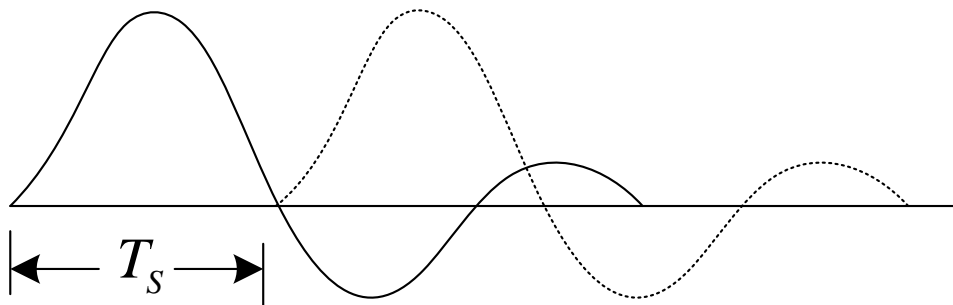
## 数字基带传输系统的各点波形示意图





### 码间串扰

- 两种误码原因：
  - » 码间串扰
  - » 信道加性噪声
- 码间串扰原因：系统传输总特性不理想，导致前后码元的波形畸变并使前面波形出现很长的拖尾，从而对当前码元的判决造成干扰。
- 码间串扰严重时，会造成错误判决。





数字基带信道无失真传输条件（奈奎斯特第一准则）：

如果传输信道具有理想低通滤波器的幅频特性，理想低通的截止频率为 $f_B/2$ ， $f_B$ 为码元速率，则在判决点无码间干扰。

带宽为 $B$  的理想基带传输系统无码间干扰速率为 $2B$  Baud。

奈奎斯特速率： $f_B=2B$  Baud，为最大无码间干扰速率。

奈奎斯特频带利用率：

$$\eta = \frac{\text{传输速率}}{\text{频带宽度}} = \frac{f_B}{B} = \frac{2B}{B} = 2$$

为数字基带系统的极限频带利用率。





【例 4-9】设信道带宽为32kHz，若码元采用8进制，试求信道最高的信息传输速率为多少？

解：

根据奈奎斯特第一准则，该信道最高码元传输速率为：

$$f_B = 2B = 2 \cdot 32\text{k} = 64\text{k} \text{ 码元/s}$$

由于采用8进制，每个码元的信息量为：

$$-\log_2(1/8) = 3 \text{ bit/码元}$$

最高信息速率为：

$$f_b = f_B \cdot 3 = 64\text{k} \cdot 3 = 192 \text{ kbit/s}$$



# 2. 数字频带传输

所谓**频带传输**，是指原始电信号在发送端先经过调制后，再送到线路上传输，接收端则要进行相应解调才能恢复出原来的基带信号。

## (1) 数字信号的无线传输

数字信号通过空间以电磁波为载体传输到对方，称为无线传输。

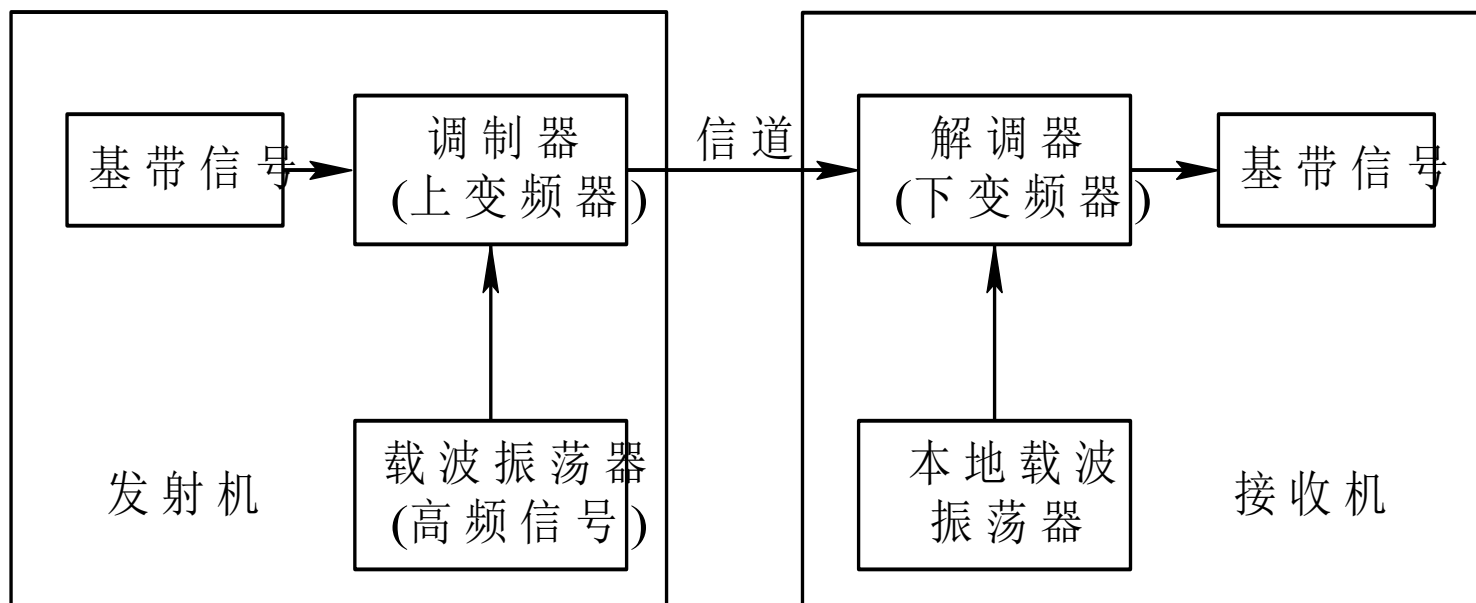
经过调制的数字信号称为数字频带信号。



### (2) 数字信号的基本调制与解调

调制是通过改变一个更高频率信号的某些特征物理量或参数(如幅度、频率、相位等)的过程,这一高频信号常称载波,它一般由载波振荡器(如振荡电路、激光器等)产生。

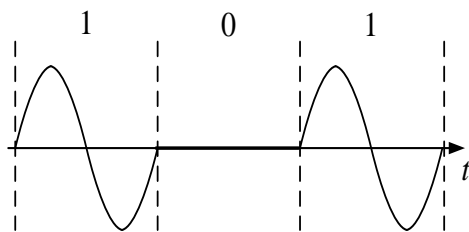
图4.29是频带通信系统的简化方框图,它显示了调制信号、高频载波及已调波间的关系。



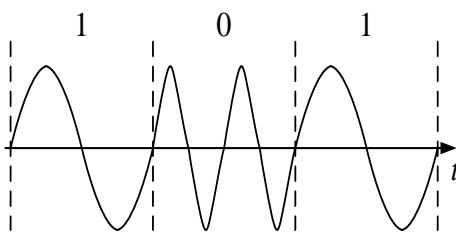


### 1) 4种基本二进制数字调制方式

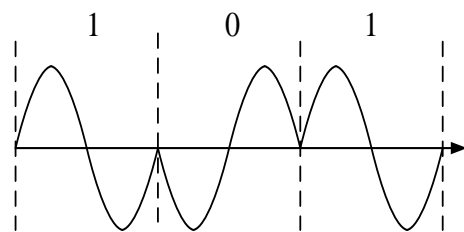
- 调制信号是二进制基带信号。
- 二进制数字调制中，载波的幅度、频率或相位只有两种变化。
- 二进制**幅移**键控（2ASK）
- 二进制**频移**键控（2FSK）
- 二进制**相移**键控（2PSK）
- 二进制**相对相移**键控（2DPSK）



2ASK



2FSK



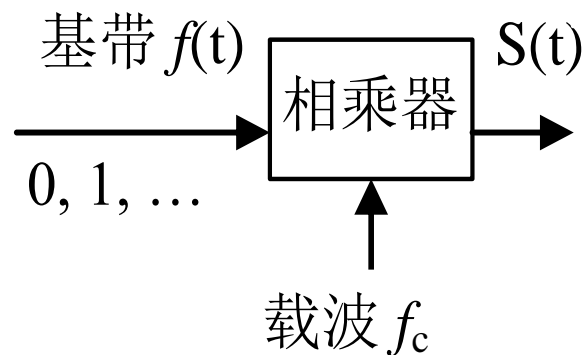
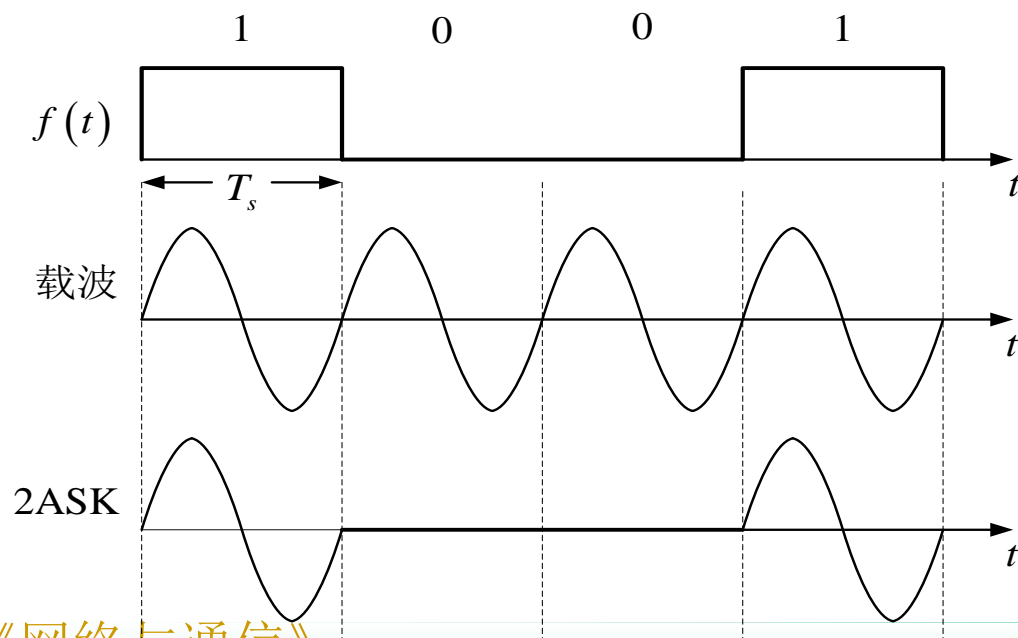
2PSK



### ① 二进制幅移键控（2ASK） Amplitude Shift Keying

二进制幅移键控（2ASK）就是数字信号“1”和“0”的振幅调制，换句话说，是利用载波的振幅变化去携带信息，而载波的频率、相位都保持不变。

2ASK：对应于二进制信息“0”“1”，载波的振幅只有两种变化状态。

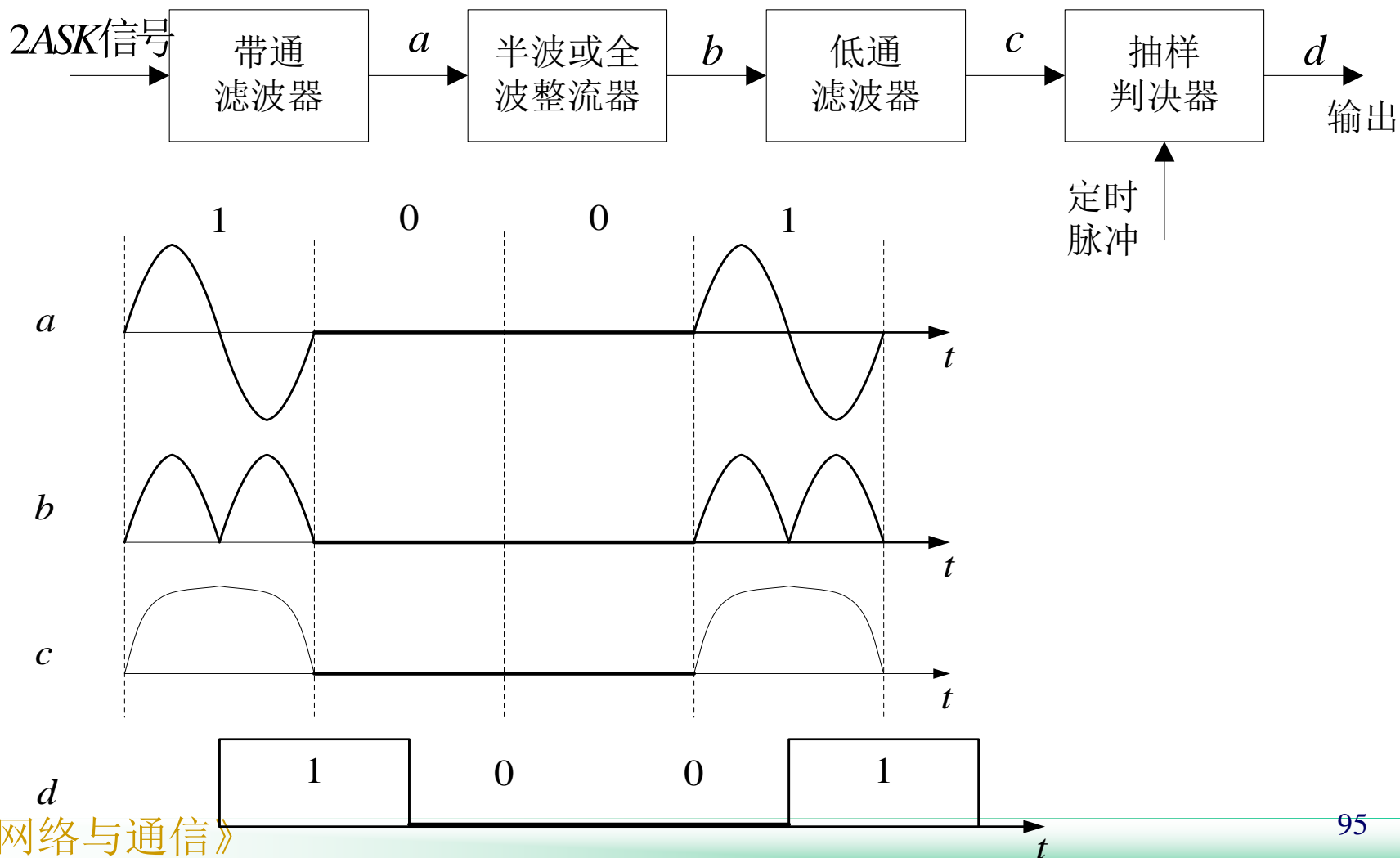


(a) 2ASK



## 2ASK信号解调方法

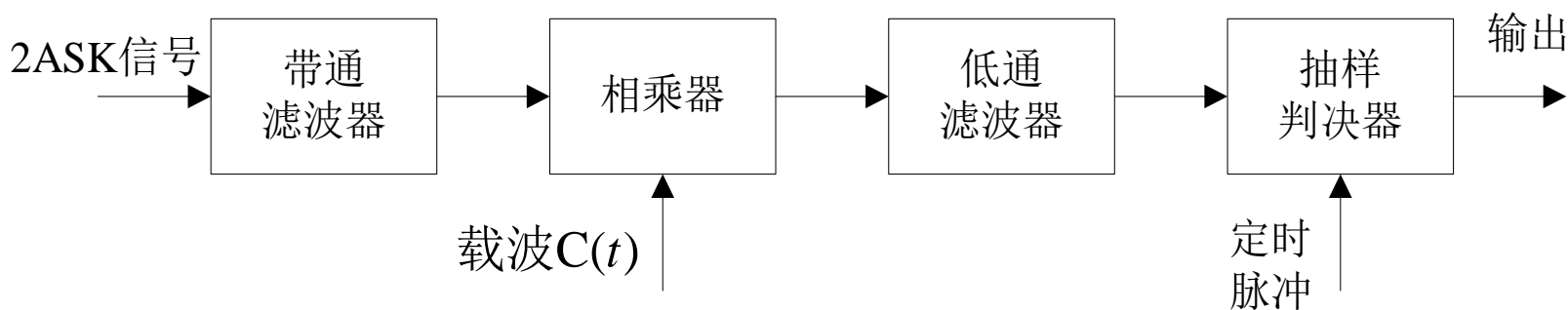
### 非相干解调(包络检波法)





# 2ASK信号解调方法

## 相干解调(同步检测法)



在相干解调中，接收端必须提供一个与2ASK信号的载波保持同频同相的相干载波 $C(t)$ ，否则会造成解调后信号的波形失真。

在实践中，从2ASK信号中提取相干载波比较困难，很少采用相干检测法解调2ASK信号。



### ② 二进制频移键控（2FSK） Frequency Shift Keying

频移键控就是数字信号频率键控，换句话说，是利用已调波的频率变化去携带信息，而载波的振幅和相位不变。

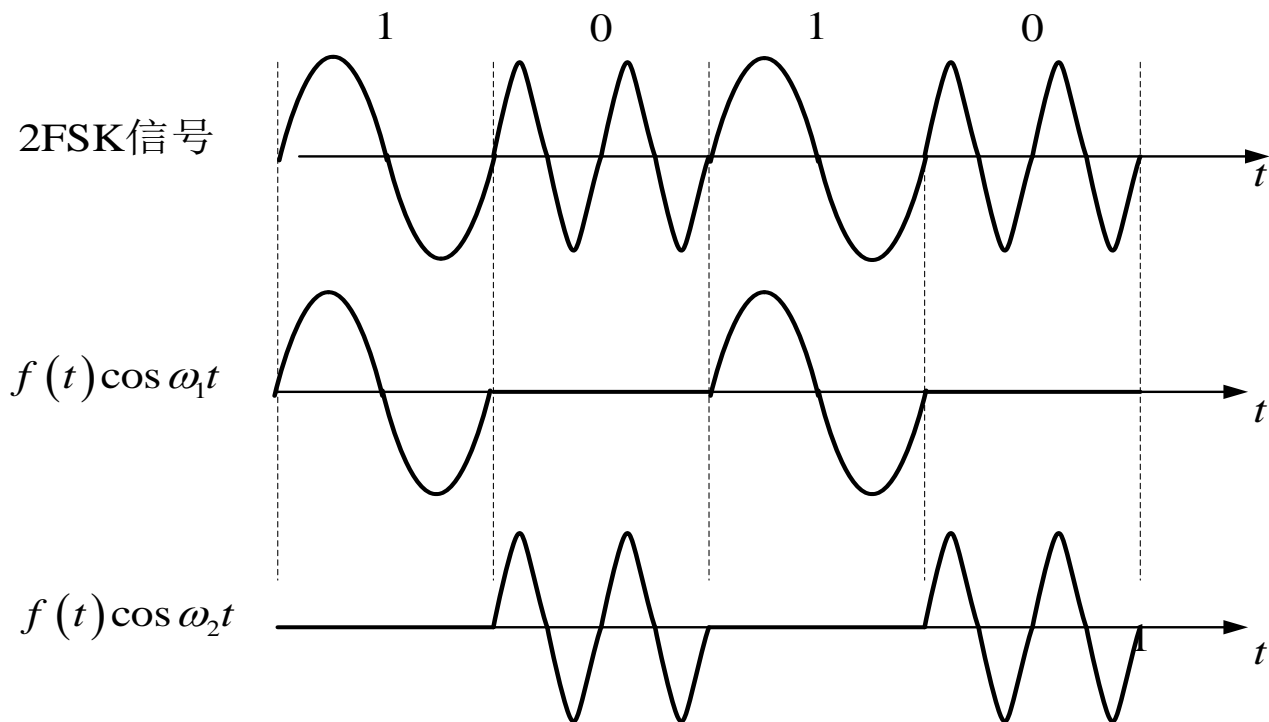
2FSK：载波的频率随二进制基带信号在 $f_1$ 和 $f_2$ 两个频率间变化。

$$S_{2\text{FSK}}(t) = \begin{cases} f(t) \cos(\omega_1 t + \phi_n), & \text{发送“1”时} \\ f(t) \cos(\omega_2 t + \theta_n), & \text{发送“0”时} \end{cases}$$





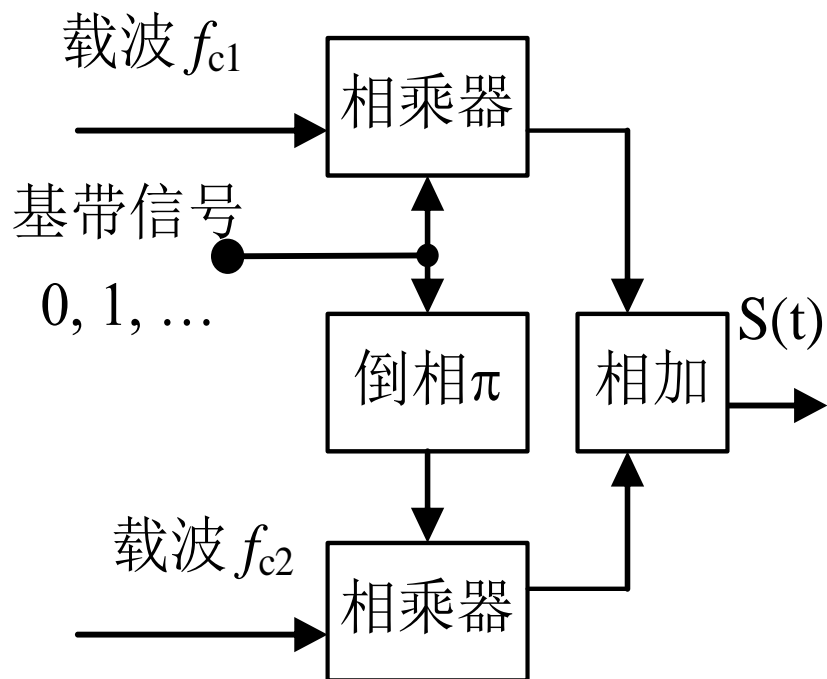
$$S_{2\text{FSK}}(t) = \begin{cases} f(t) \cos(\omega_1 t + \phi_n), & \text{发送“1”时} \\ f(t) \cos(\omega_2 t + \theta_n), & \text{发送“0”时} \end{cases}$$



一个**2FSK**信号可以看成是两个不同载频的**2ASK**信号的叠加。



## 2FSK信号的产生:

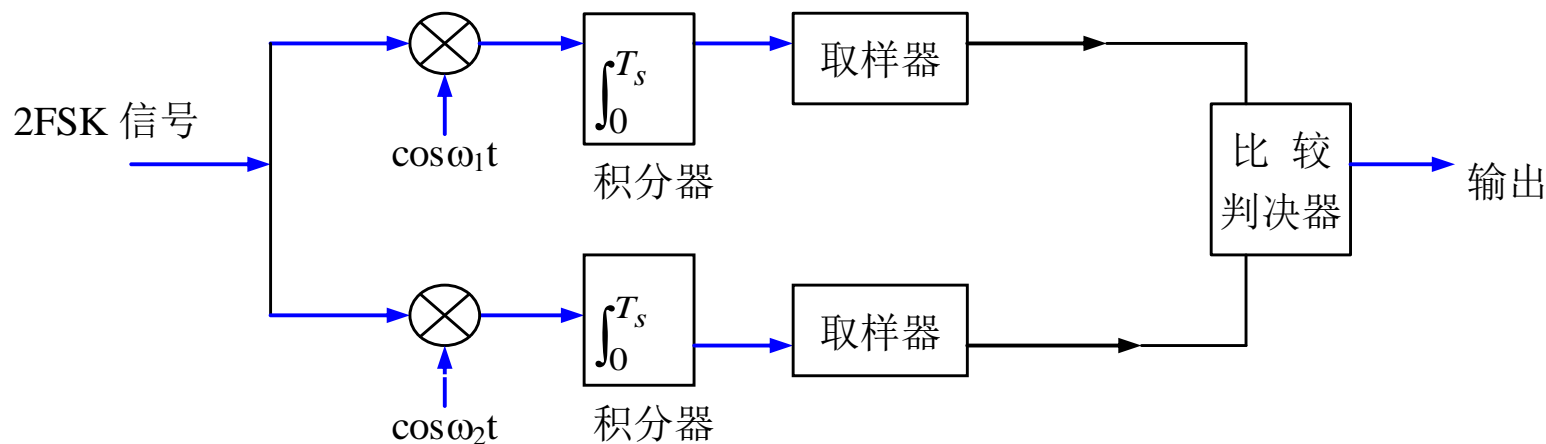


(b) 2FSK



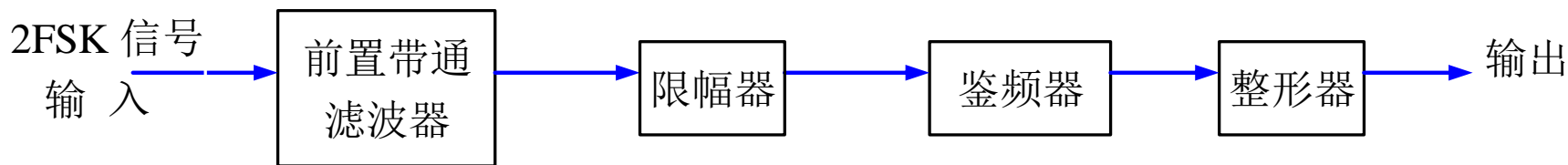
## 2FSK调制信号的解调

2FSK信号的相干解调也称为最佳接收法，如图(a)所示



(a) 2FSK相干解调

2FSK信号的非相干解调（鉴频法），如图(b)所示



(b) 2FSK鉴频法



### ③ 二进制相移键控（2PSK）Phase Shift Keying

相移键控就是数字信号相位控制，换句话说，是利用已调载波信号的相位去携带数字信息。而载波的振幅和频率都不变化。

2PSK：通常用初始相位0和 $\pi$ 分别表示二进制“1”和“0”。

2PSK信号的时域表达式为：

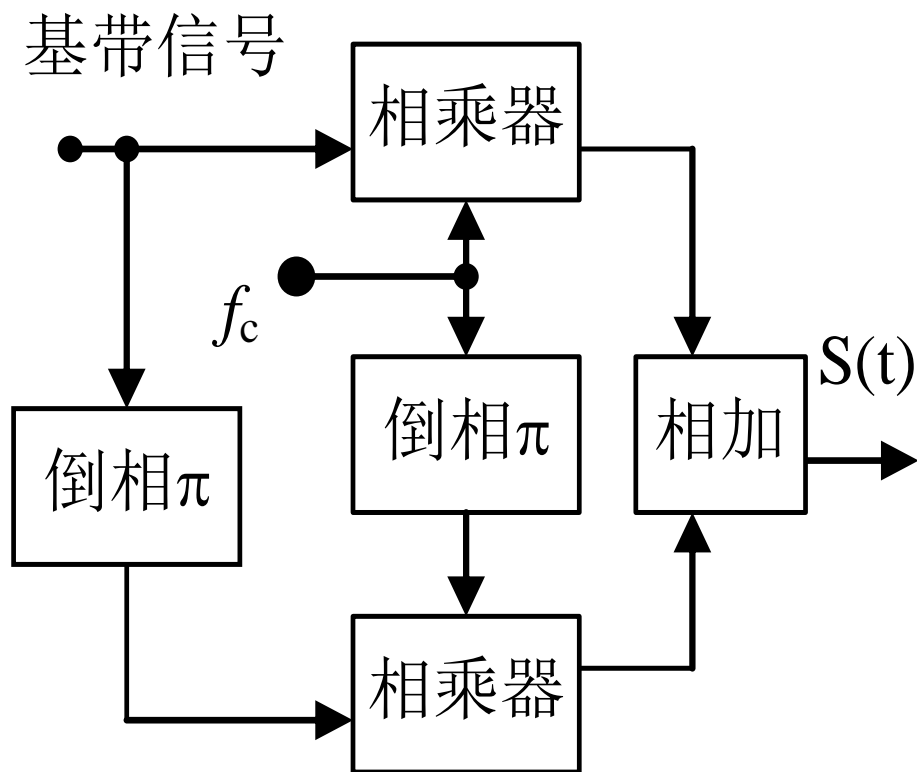
$$S_{2PSK}(t) = f(t) \cos(\omega_c t + \phi_n)$$

$\phi_n$ 表示第 $n$ 个符号的绝对相位：

$$\phi_n = \begin{cases} 0, & \text{发送“1”时} \\ \pi, & \text{发送“0”时} \end{cases}$$



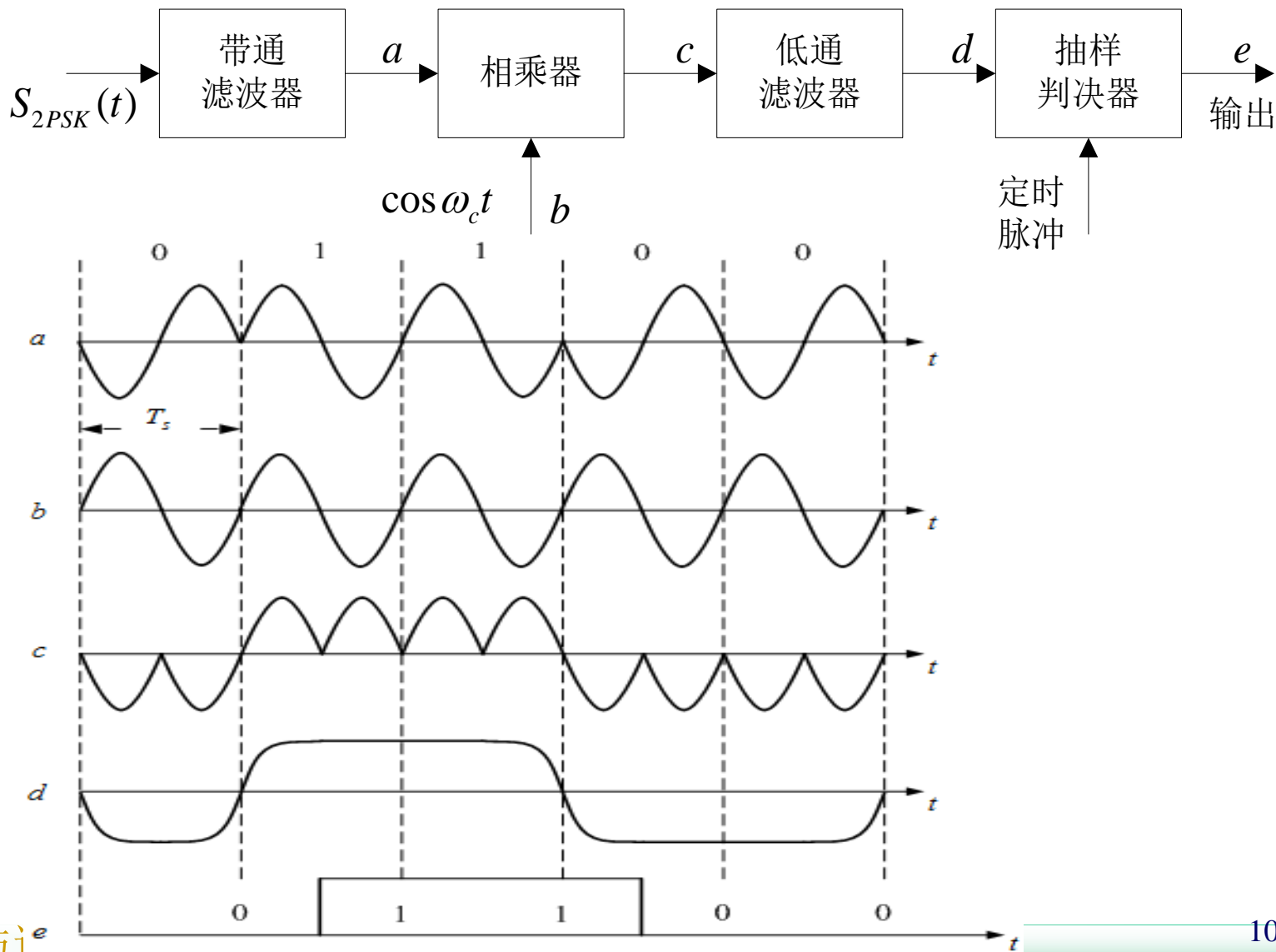
## 2PSK信号的产生:



(c) 2PSK



## • 2PSK信号的解调器原理方框图和波形图：





### ④ 二进制相对相移键控（2DPSK） Differential Phase Shift Keying

所谓相对调相，不是像绝对调相那样对应数字信号“1”和“0”以固定的相位关系，而是一种**相对的关系**。

其调制规律如下：

当遇到基带信号“1”码时，载波的相位相对于前一个码元相位改变 $\pi$ (即倒相)，当遇到“0”码时，载波的相位相对于前一个码元相位不变，当然此规律也可反而用之。

利用前后相邻码元的载波相对相位变化传递数字信息，所以又称**相对相移键控**。



- 假设 $\Delta\varphi$ 为当前码元与前一码元的载波相位差，定义数字信息与 $\Delta\varphi$ 之间的关系为

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

- 可以将一组二进制数字信息与其对应的2DPSK信号的载波相位关系示例如下：

二进制数字信息：      1   1   0   1   0   0   1   1   0

2DPSK信号相位：(0)    $\pi$    0   0    $\pi$     $\pi$     $\pi$    0    $\pi$     $\pi$

或                      ( $\pi$ )   0    $\pi$     $\pi$    0   0   0    $\pi$    0   0



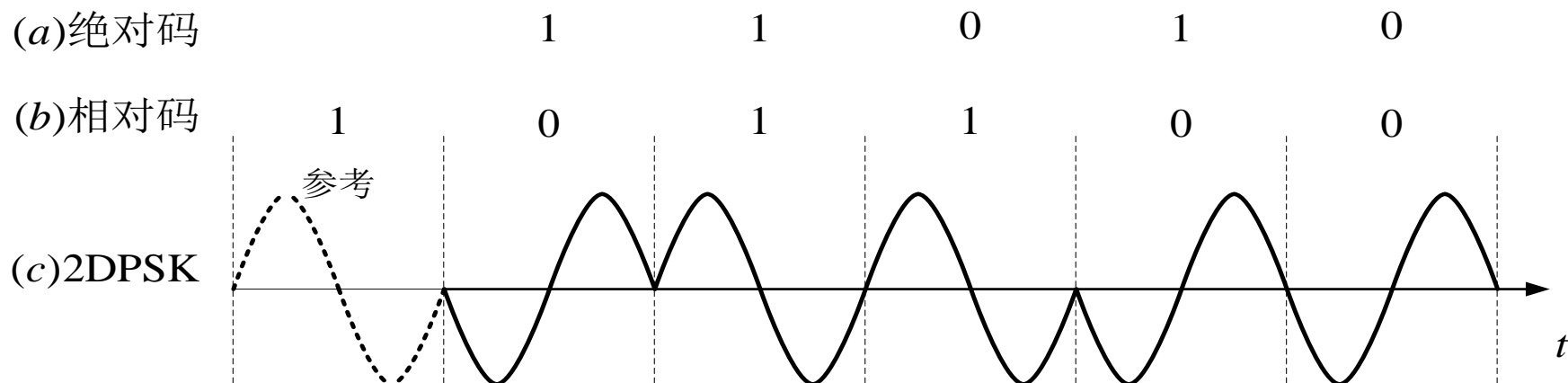


二进制数字信息: 1 1 0 1 0 0 1 1 0

2DPSK信号相位:  $(0)$   $\pi$  0 0  $\pi$   $\pi$   $\pi$  0  $\pi$   $\pi$

或  $(\pi)$  0  $\pi$   $\pi$  0 0 0  $\pi$  0 0

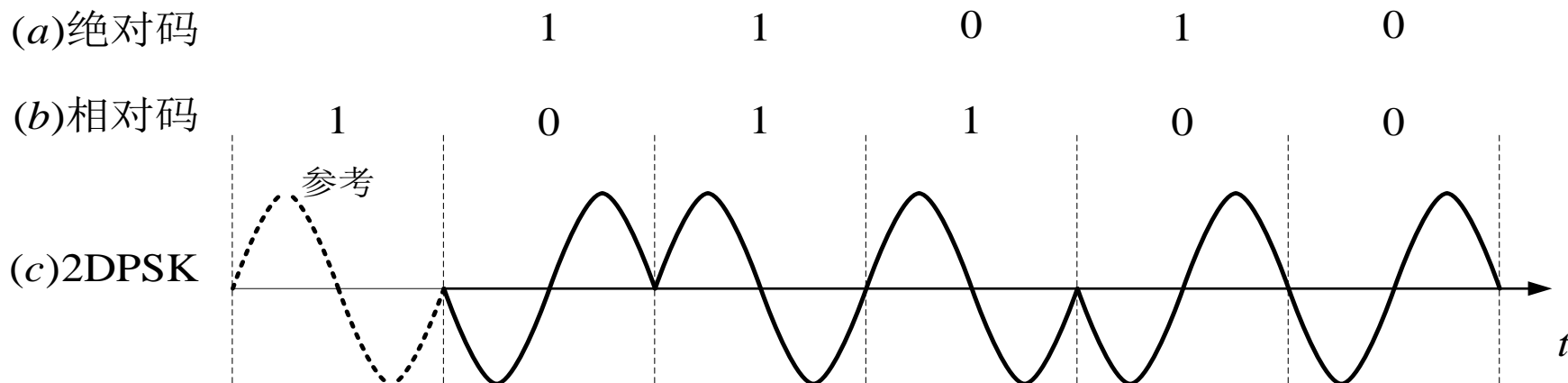
相应的2DPSK信号的波形如下:



对于相同的基带信号，由于初始相位不同，2DPSK信号的相位可以不同。即2DPSK信号的相位并不直接代表基带信号，而前后码元的相对相位才决定信息符号。



# 2DPSK信号的产生方法

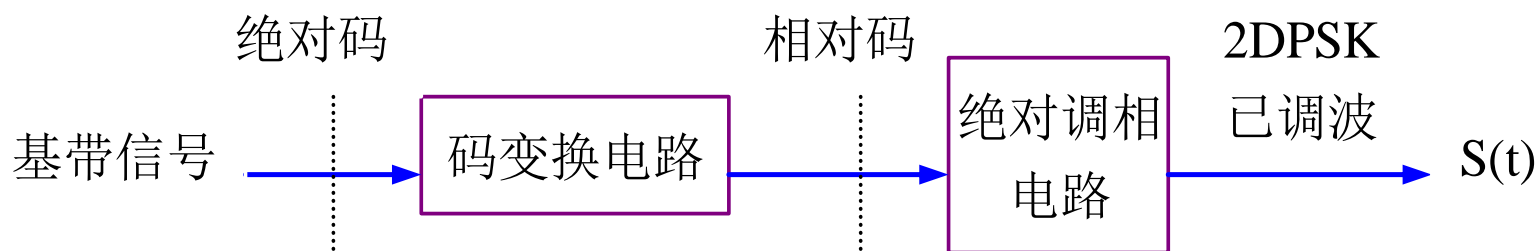


先对二进制数字基带信号进行差分编码，即把表示数字信息序列的绝对码变换成**相对码（差分码）**，然后再根据相对码进行绝对调相，从而产生二进制差分相移键控信号。

上图中使用的是传号差分码，即载波的相位遇到原数字信息“1”变化，遇到“0”则不变。



## 2DPSK信号的产生:



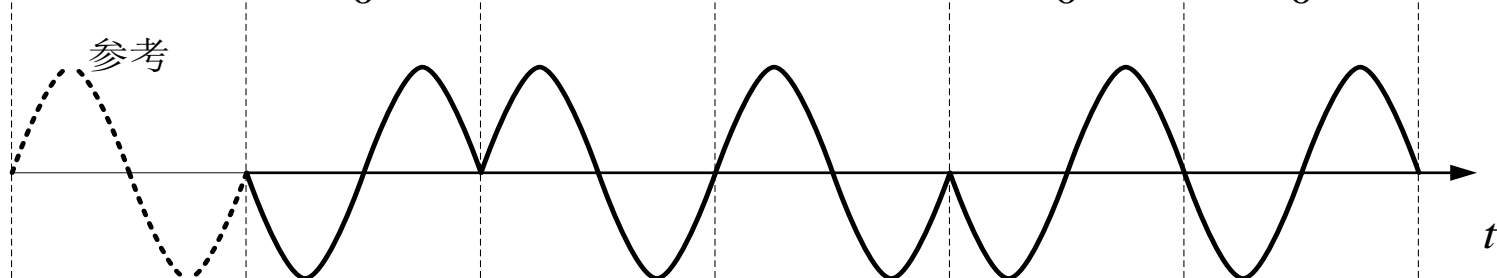
(a)绝对码

1 1 0 1 0

(b)相对码

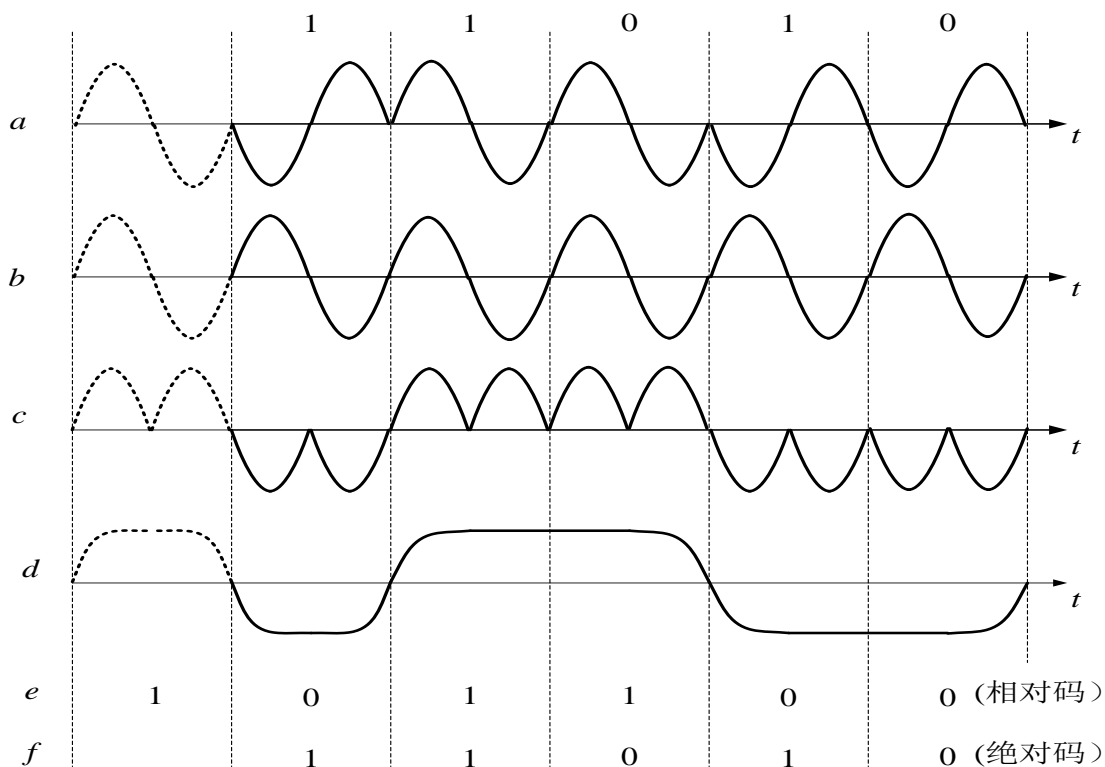
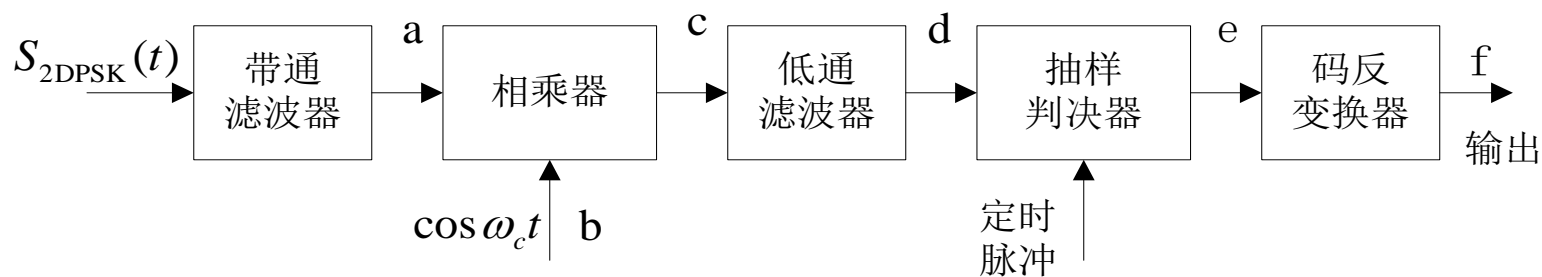
1 0 1 1 0 0

(c)2DPSK





## 2DPSK的相干解调器原理图和各点波形



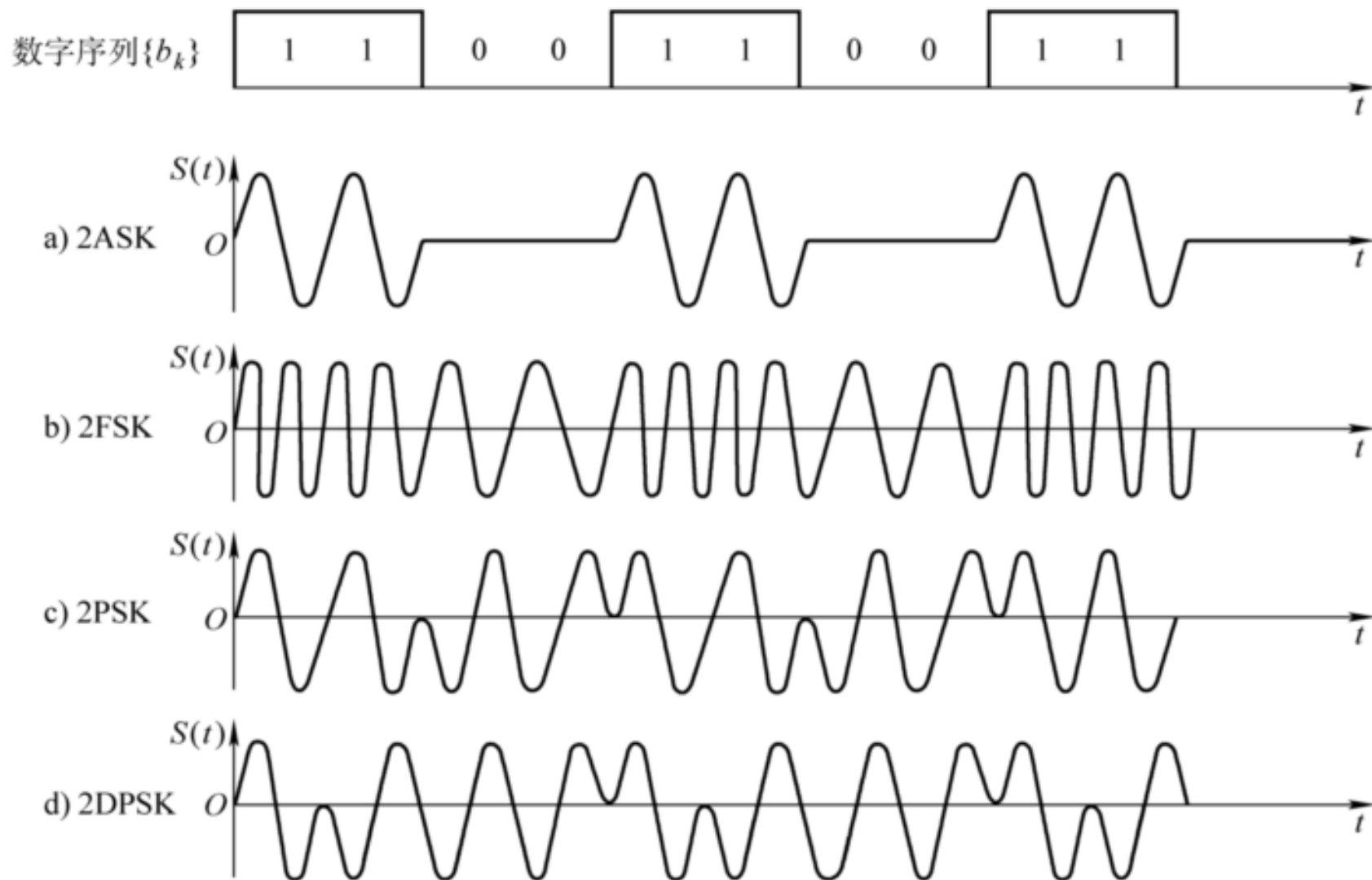
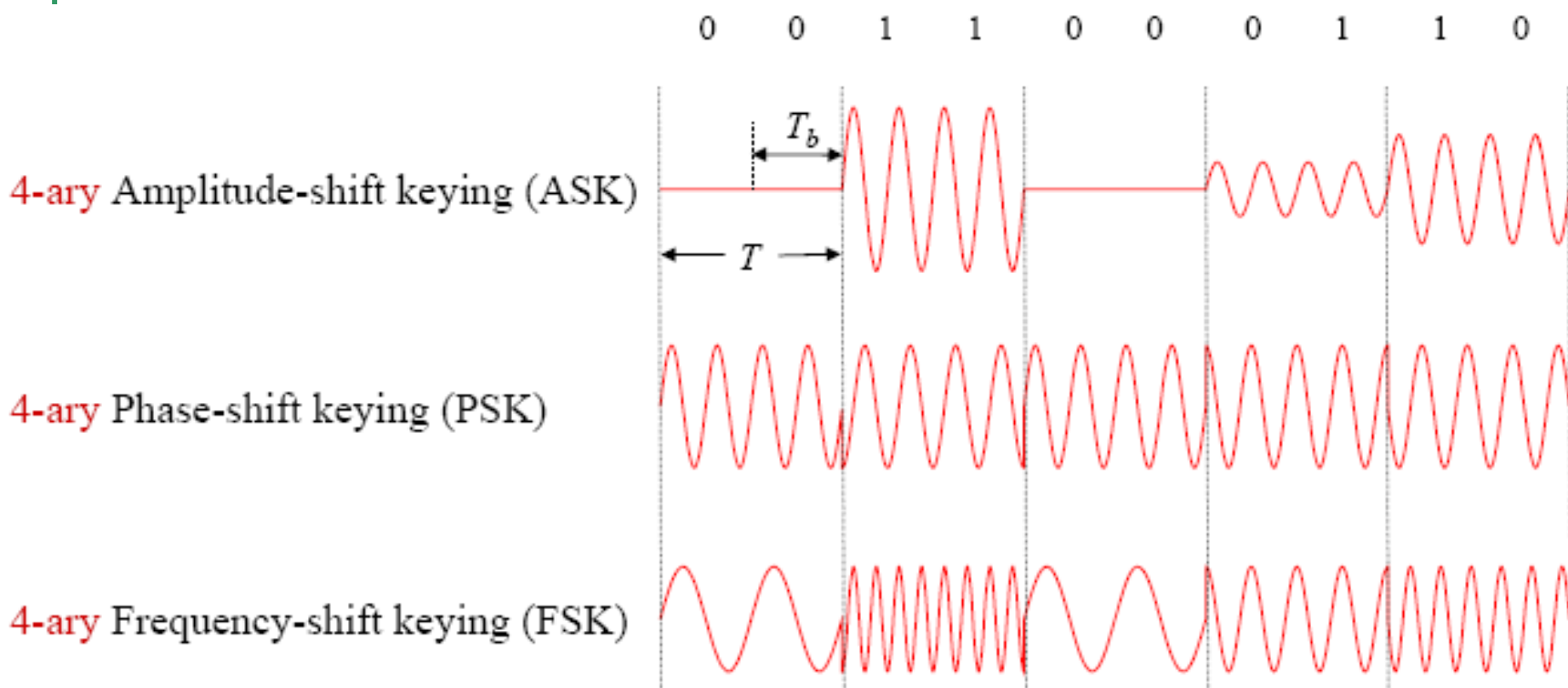
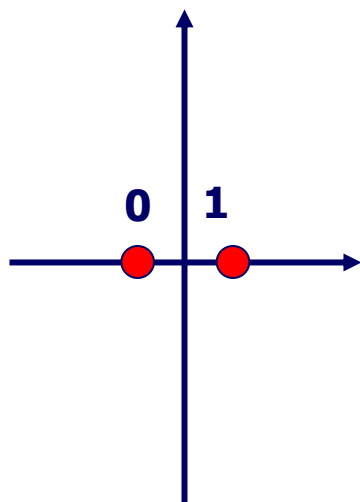


图4.31基本二进制数字调制方式

## $M_{ary}$ Modulation 多级调制技术



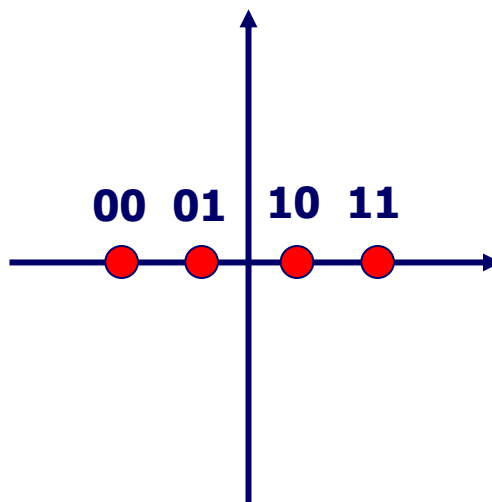
## Multiple Amplitudes (PAM)



**2 “levels”**

**1 bits / pulse**

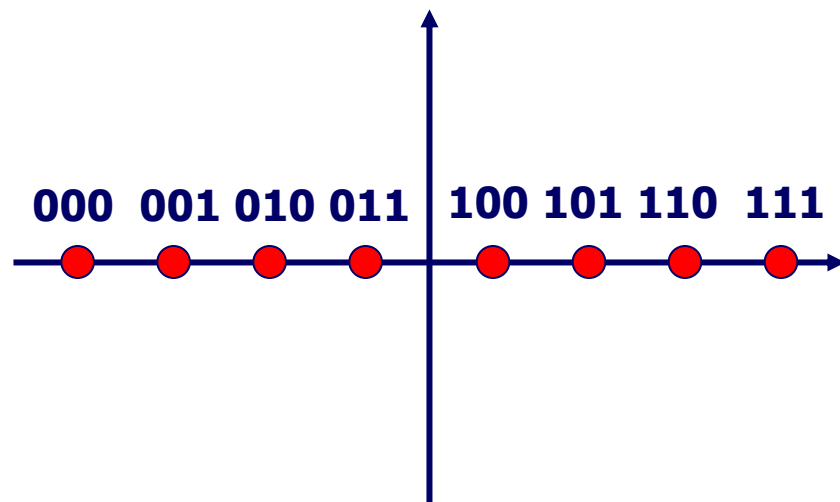
**B bits per second**



**4 “levels”**

**2 bits / pulse**

**$2 \times B$  bits per second**

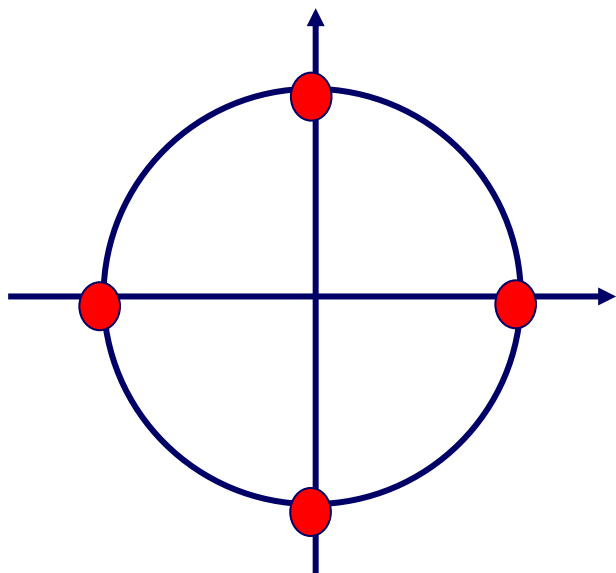


**8 “levels”**

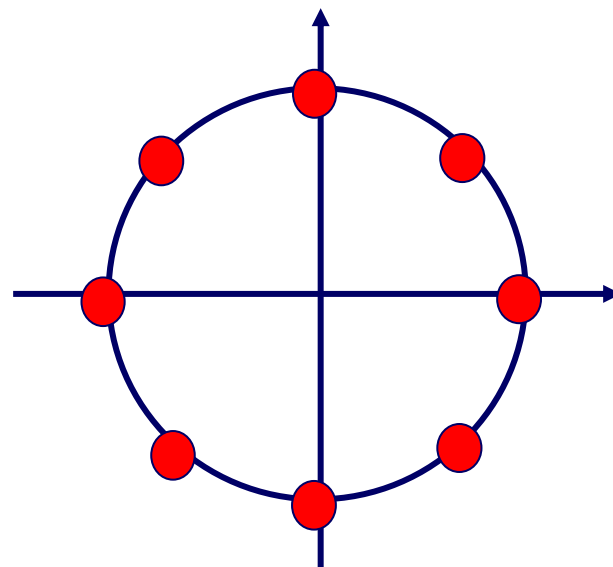
**3 bits / pulse**

**$3 \times B$  bits per second**

## Multiple Phases (MPSK)



**4 “phase”**  
**2 bits / pulse**  
 **$2 \times B$  bits per second**



**8 “phases”**  
**3 bits / pulse**  
 **$3 \times B$  bits per second**





## Phase-Shift Keying (PSK)

- Four-level PSK (QPSK) (四元相移键控)
  - Each element represents more than one bit

$$s(t) = \begin{cases} A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right) & 11 \\ A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right) & 01 \\ A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}\right) & 00 \\ A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}\right) & 10 \end{cases}$$



# Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

## 正交幅度调制

- QAM is a combination of ASK and PSK
  - Two different signals sent simultaneously on the same carrier frequency
    - 这两个载波通常是相位差为90度 ( $\pi/2$ ) 的正弦波，因此被称作正交载波

$$s(t) = d_1(t) \cos 2\pi f_c t + d_2(t) \sin 2\pi f_c t$$

- 从ASK or PSK简单的一维编码方式变换为二维编码，信号稳定性强，码间距离加大
- 用于ADSL传输等
- 常见的QAM形式有16-QAM、64-QAM、256-QAM等

QAM编码具有能充分利用带宽、抗噪声能力强等优点。  
QAM复杂性高于PSK等——因为需要同时检测相位和幅度

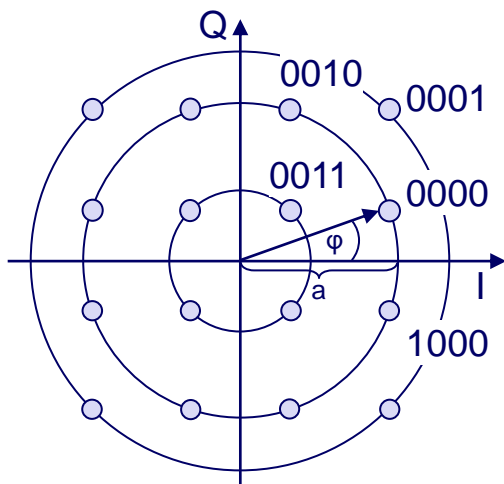


# Quadrature Amplitude Modulation

- Example: 16-QAM (4 bits = 1 symbol)

Symbols 0011 and 0001 have the same phase  $\varphi$ , but different amplitude  $a$ .

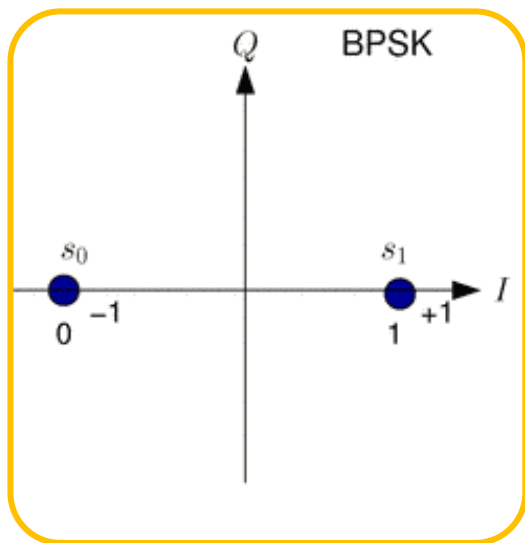
0000 and 1000 have different phase, but same amplitude. ➔ used in standard 9600 bit/s modems



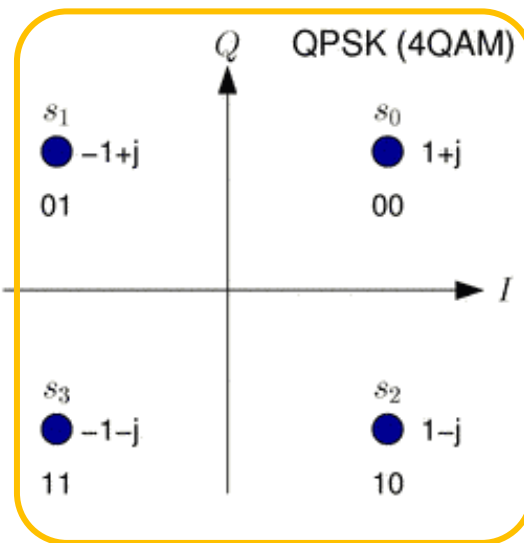
在标准的9600 bps的调制解调器中，使用了12个相位角度，其中有四个具有两种振幅值，因而总共有16个不同的信号元素



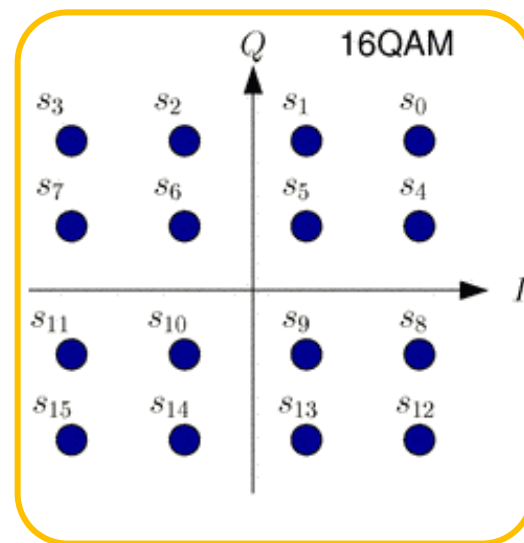
### 常见不同进制调制方式举例



BPSK使用了基准的正弦波和相位反转的波浪，使一方为0，另一方为1，从而可以同时传送接受2值(1比特)的信息



QPSK是一种四进制相位调制，采用移相方式QPSK，每个点2比特信息，具有良好的抗噪特性和频带利用率通信业务



QAM全称正交幅度调制是一种数字调制方式，产生的方法有正交调幅法和复合相移，16QAM是指包含16种符号的QAM调制方式



## 作业

4-5 某一系统的信号带宽 $B=4\text{kHz}$ ，信噪比为15，求该系统保证信息无差错通过信道的极限速率为多少（即求信道容量）？

4-9 说明地波、天波和直射波传输的优缺点。

4-12 某一数字信号的码元速率为12000Baud，试问：如采用四进制或二进制数字信号传输时，其信息速率各为多少？

4-13 假设频道宽度为1024kHz的信道，可传输2048kbit/s的比特率信息，试问其传输效率或频带利用率为多少？

4-14 有一数字传输系统，其在125 $\mu\text{s}$ 内传送9720个码字，若在2s内有5个误码，计算其误码率为多少？