

数据通信



信号编码技术

殷亚凤

yafeng@nju.edu.cn

<http://cs.nju.edu.cn/yafeng/>

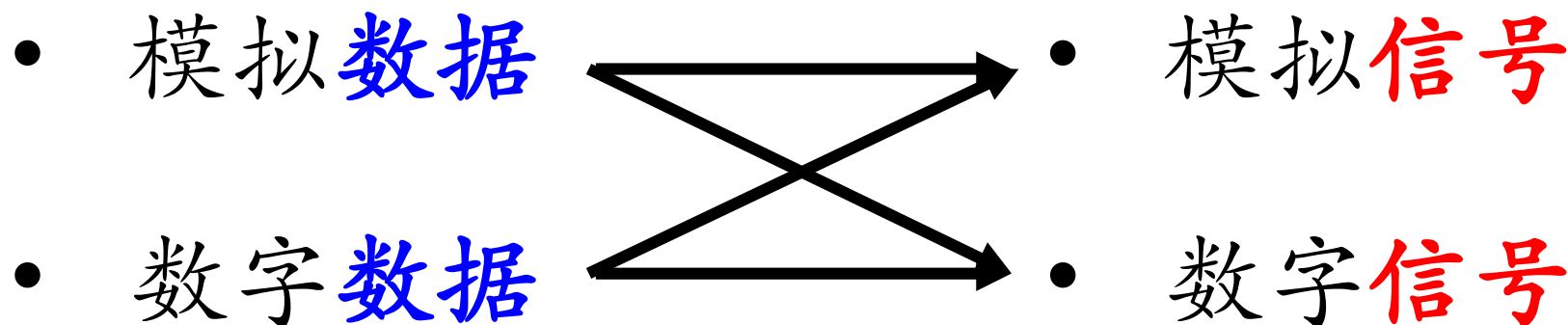
Room 901, Building of CS



数据与信号



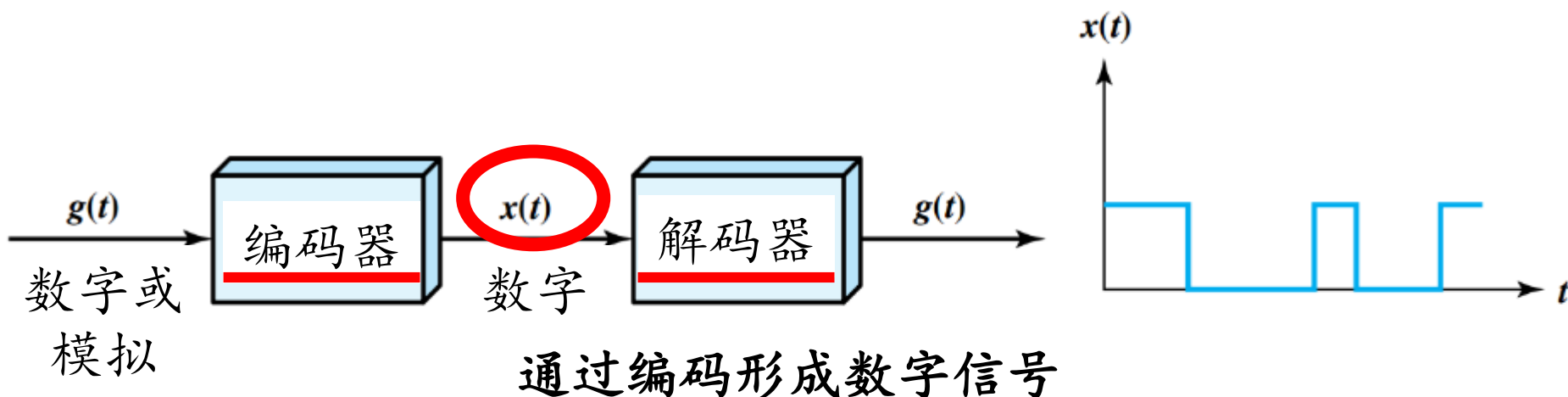
模拟数据和数字数据可以编码成任意一种形式的信号，即模拟信号或数字信号。



编码与调制技术



• 数字信号传输

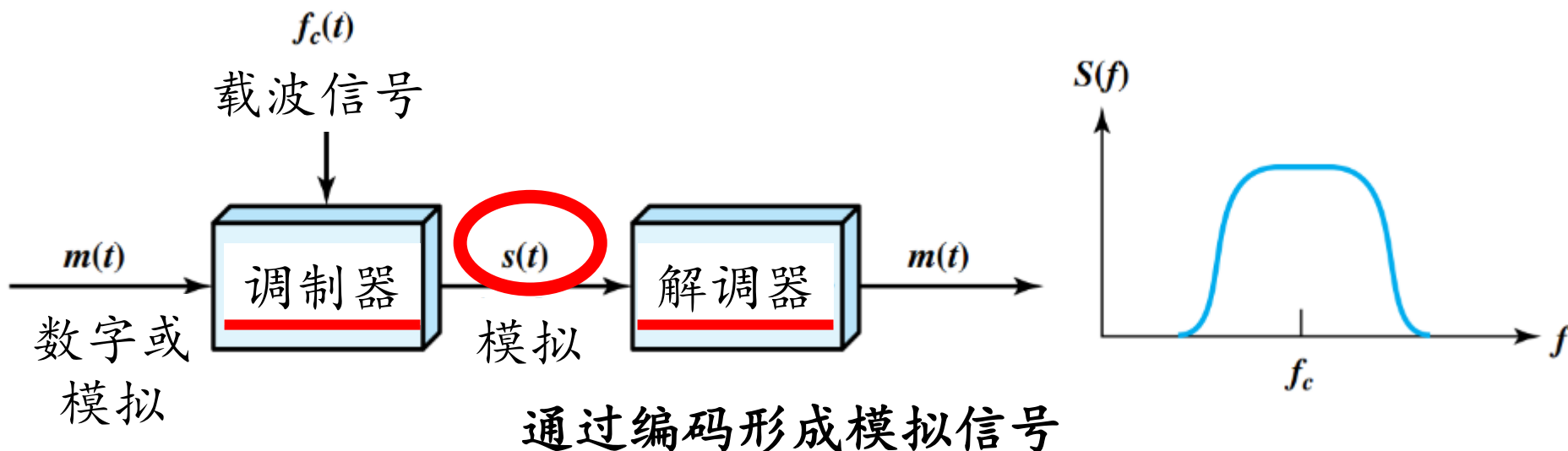


- 数据源可能是数字的，也可能是模拟的
- 数据源被编码成数字信号
- 数字信号的实际格式取决于编码的技术，并以如何优化使用传输媒体为选择原则

编码与调制技术



• 模拟信号传输



- 输入信号可以是模拟的，也可以是数字的，称为被调信号或基带信号
- 调制是将原数据编码到频率为 f_c 的载波信号上
- 载波信号是一种连续且频率恒定的信号，是模拟信号传输的基础

数据与信号



- **数字数据，数字信号**：把数字数据编码成数字信号的设备比从数字到模拟的调制设备更简单、便宜。
- **模拟数据，数字信号**：把模拟数据转化成数字形式后，就可以使用先进的数字传输和交换设备。
- **数字数据，模拟信号**：有些传输媒体只能传播模拟信号，譬如光纤和非导向媒体。
- **模拟数据，模拟信号**：电信号形式的模拟数据可以作为基带信号来传输，简单又经济，比如电话级线路上的话音传输。此外，通过调制把基带信号的带宽搬移到其他频谱部分，可以实现频分复用。



1. 数字数据，数字信号
2. 数字数据，模拟信号
3. 模拟数据，数字信号
4. 模拟数据，模拟信号

关键的数据传输术语



• 数据，信号

表5.1 关键的数据传输术语

术语	单位	定义
数据元素	比特 (bit)	单个的二进制1或0
数据率	比特每秒 (bps)	数据元素传输的速率
信号元素	数字：一个固定振幅的电压脉冲 模拟：一个具有固定频率、相位和振幅的脉冲	在一个信号传输编码中占据最短时间间隔的那部分信号
信号传输速率或调制速率	信号元素每秒 (波特)	信号元素传输的速率

- 数字信号：离散的非连续电压脉冲序列
- 信号元素：一个脉冲就是一个信号元素
- 二进制数据：每个数据比特被编码成信号元素

接收信号

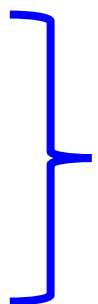


接收端需要知道

- 每个比特的起_止时间
- 每个比特的信号电_平是高还是低

信号成功接收

- 信噪比
- 数据率
- 带宽
- 编码机制：数据比特到信号元素之间的映射



$$C = B \log_2(1 + \text{SNR})$$

数字信号编码



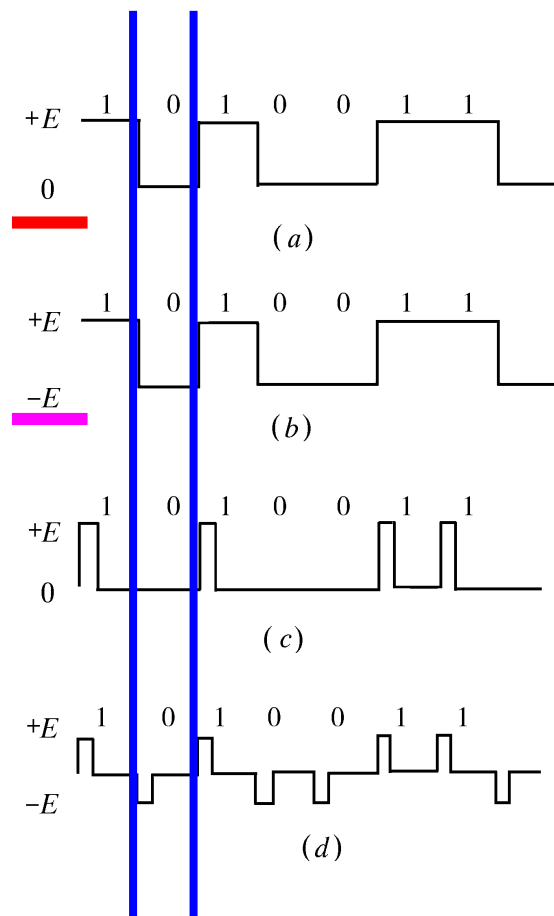
• 极性

- 单极性：**正**电平和**零**电平对应二进制码 1 和 0
 - 有直流分量，不适用有交流耦合的远距离传输

- 双极性：**正**电平和**负**电平表示二进制码 1 和 0
 - “1”和“0”等概率出现时**无直流分量**

• 归零/不归零

- 归零：电脉冲宽度小于码元宽度，即信号电压在一个码元终止时刻前总要回到零电平
 - 占空比：电脉冲宽度/码元宽度
 - 易于提取同步信息
- 不归零：占空比为100%



数字信号编码

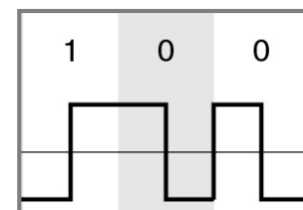


➤ 双相位

- “0”码用“10” 两个相位表示；“1”码用“01” 两个相位表示

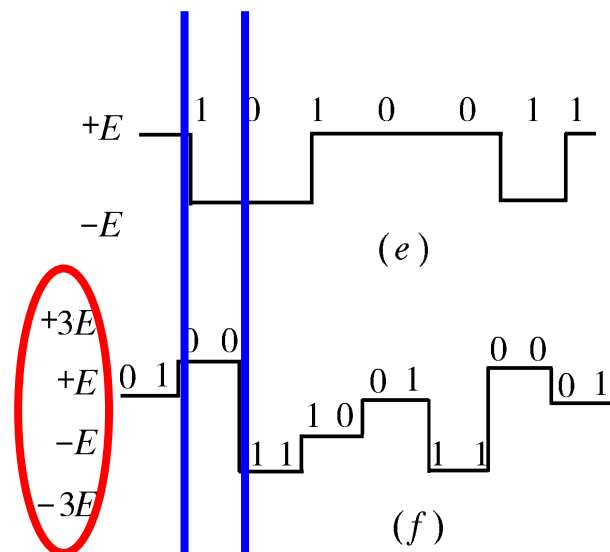
➤ 差分波形

- 利用 **相邻码元的电平跳变和不变** 来表示消息代码
- 与码元本身的电位和极性无关
- 检测信号跳变相对于检测信号强度更为可靠
- 可以消除设备初始状态和设备多样性的影响（如载波相位模糊问题）



➤ 多电平波形

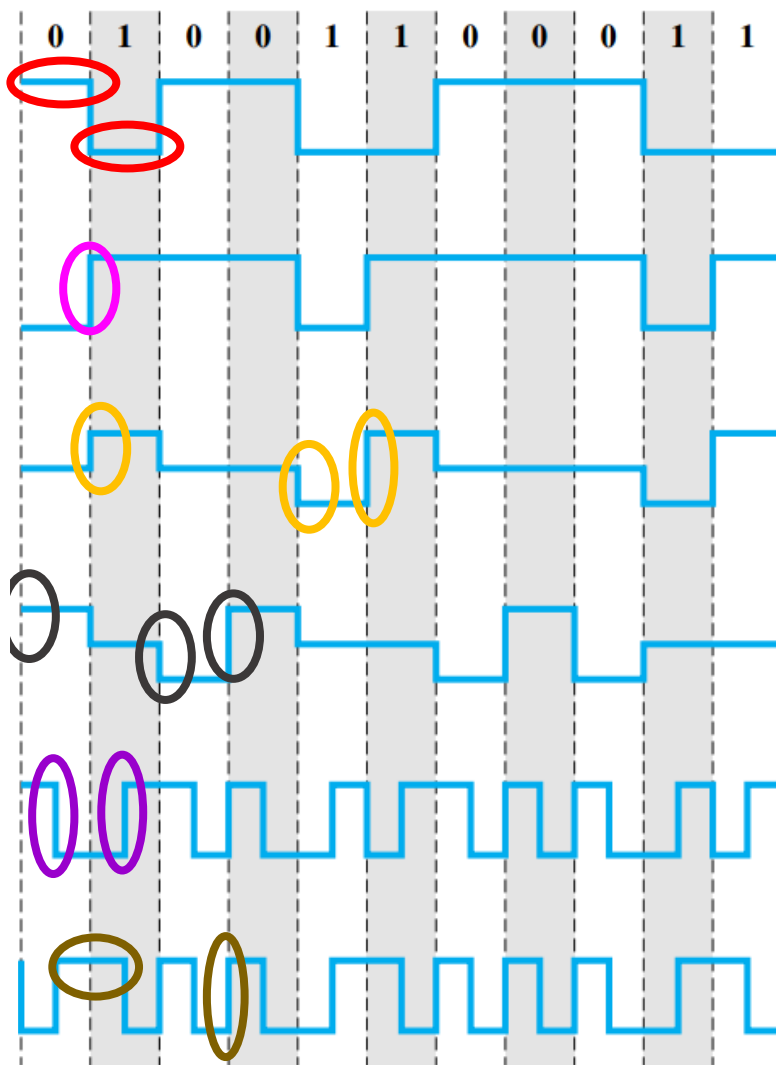
- 多电平波形
- 多值波形
- 在波特率相同的情况下 **提高比特率**



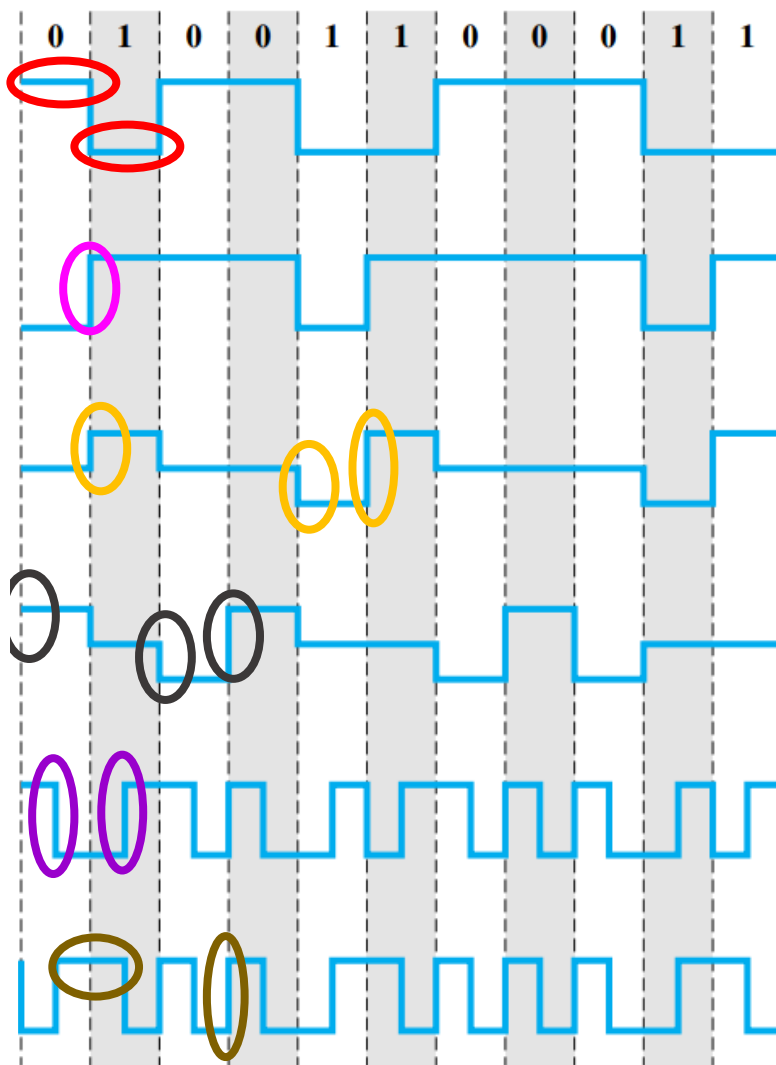
数字信号编码格式



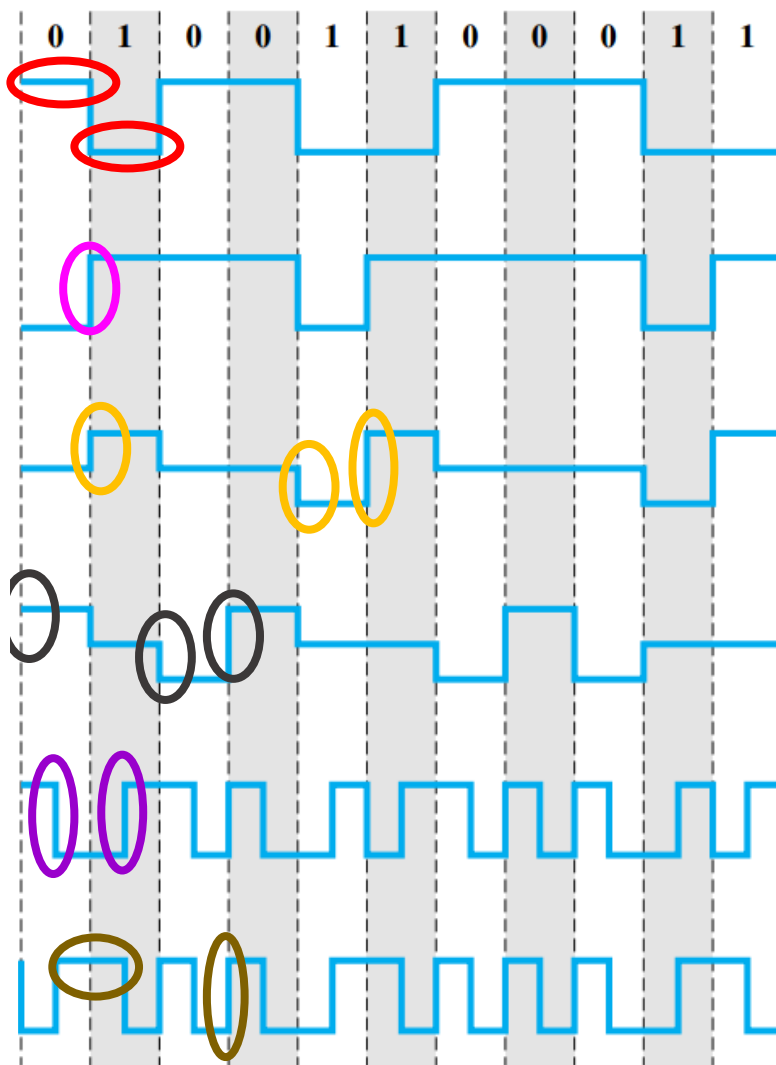
不归零
电平



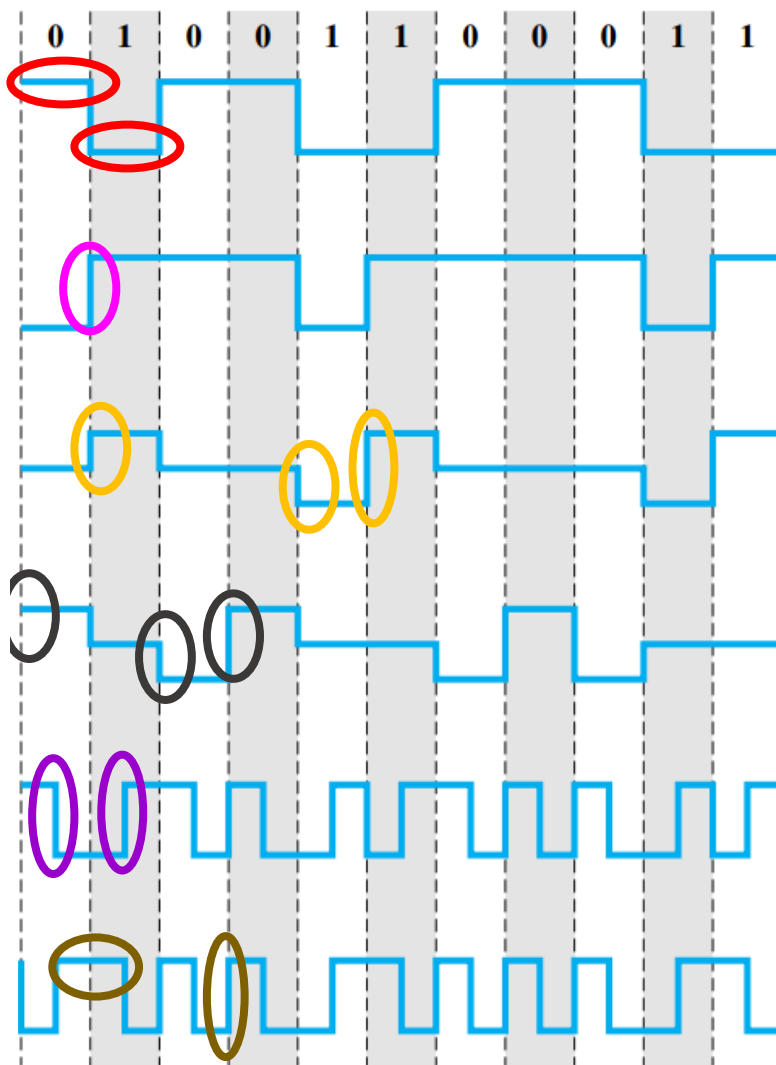
不归零
1制



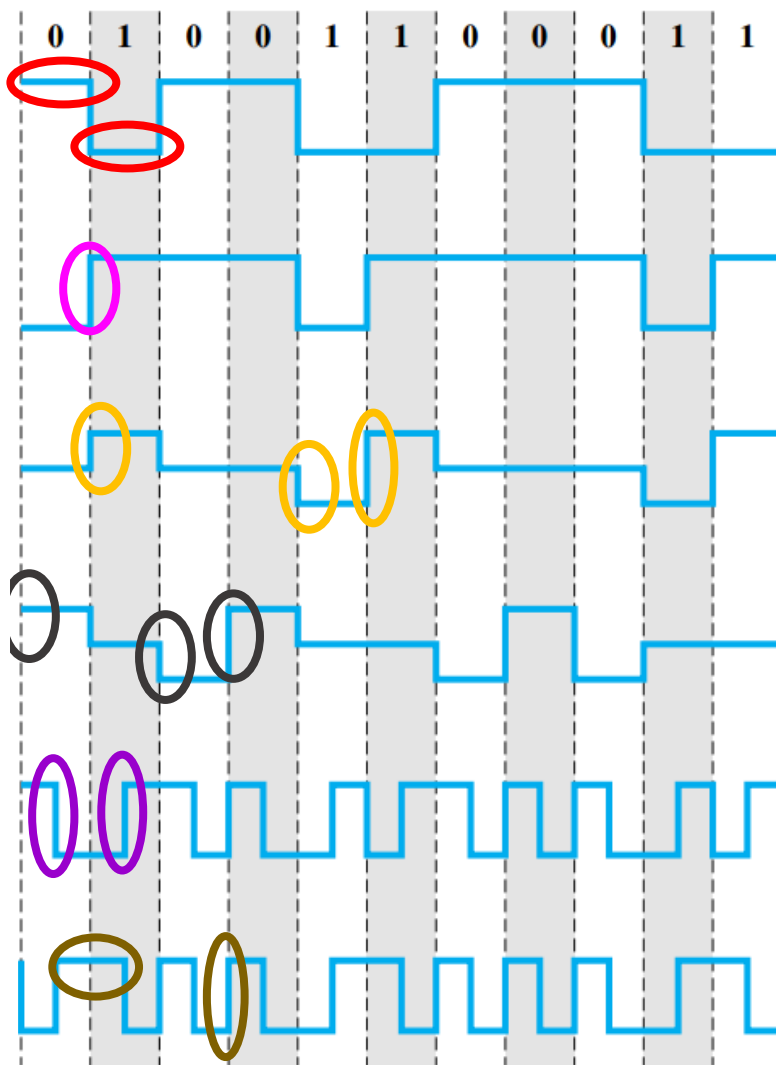
双极性
AMI (前比特
1为负电平)



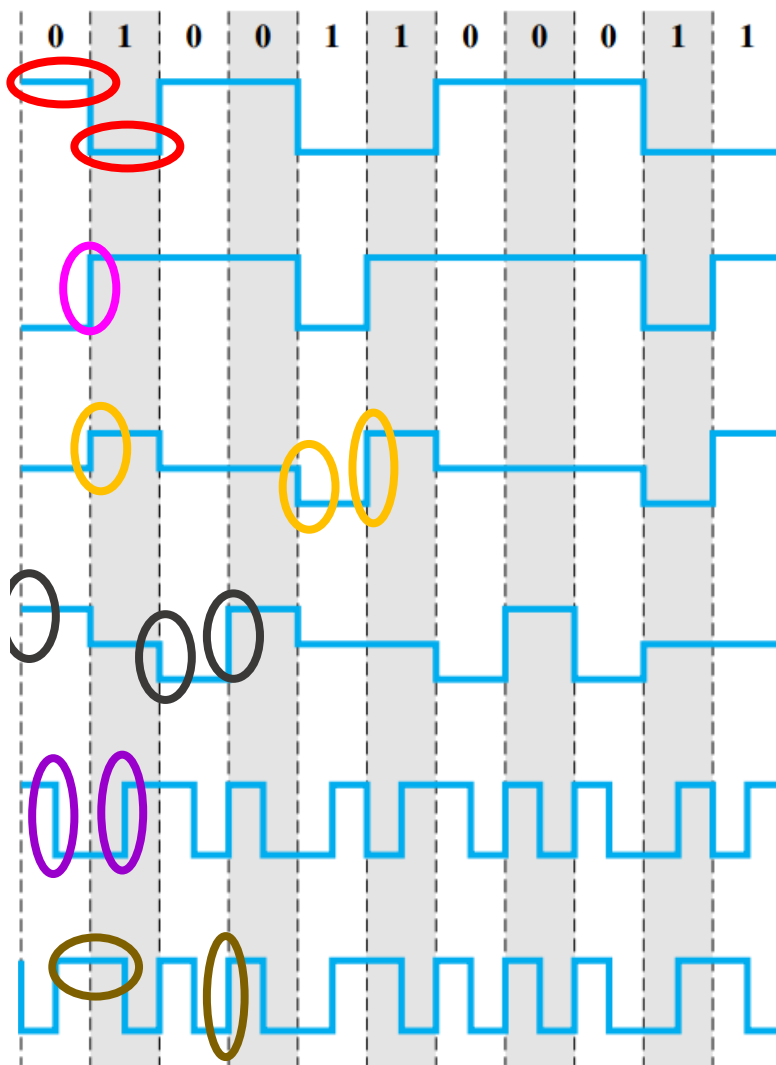
伪三进制码
(前比特0为
负电平)



曼彻斯特
编码



差分
曼彻斯特
编码



不归零电平 (NRZ-L)

0 = 高电平

1 = 低电平

不归零1制 (NRZI)

0 = 在间隔的起始位置没有跳变 (一个比特时间)

1 = 在间隔的起始位置跳变

双极性AMI

0 = 没有线路信号

1 = 正电平或负电平, 如果是连续的比特1, 则在正负电平之间不断交替
伪三进制码

0 = 正电平或负电平, 如果是连续的比特0, 则在正负电平之间不断交替
1 = 没有线路信号

曼彻斯特编码

0 = 在间隔的中间位置从高向低跳变

1 = 在间隔的中间位置从低向高跳变

差分曼彻斯特编码

在间隔的中间位置总是有一个跳变

0 = 在间隔的起始位置跳变

1 = 在间隔的起始位置没有跳变

传输码的码型选择



➤ 信号频谱

- 传输功率**集中在传输带宽的中心位置**，功率谱主瓣宽度窄，以节省传输频带
- **减少高频分量**可以节省传输所需带宽
- **去掉直流成分**，使得非直流成分可经变压器交流耦合提供电气隔离

➤ 时钟同步

- 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
- 昂贵的独立时钟源
- 通过适当的编码提供一些基于发送信号的同步机制

传输码的码型选择



➤ 差错检测

- 具有**内在的检错能力**，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
- 数据链路层差错检测，物理层差错检测

➤ 信号干扰与抗噪声度

- 某些码元在噪声存在的情况下展示出卓越的性能
- 比特**差错率**，**误码率**

➤ 开销与复杂度

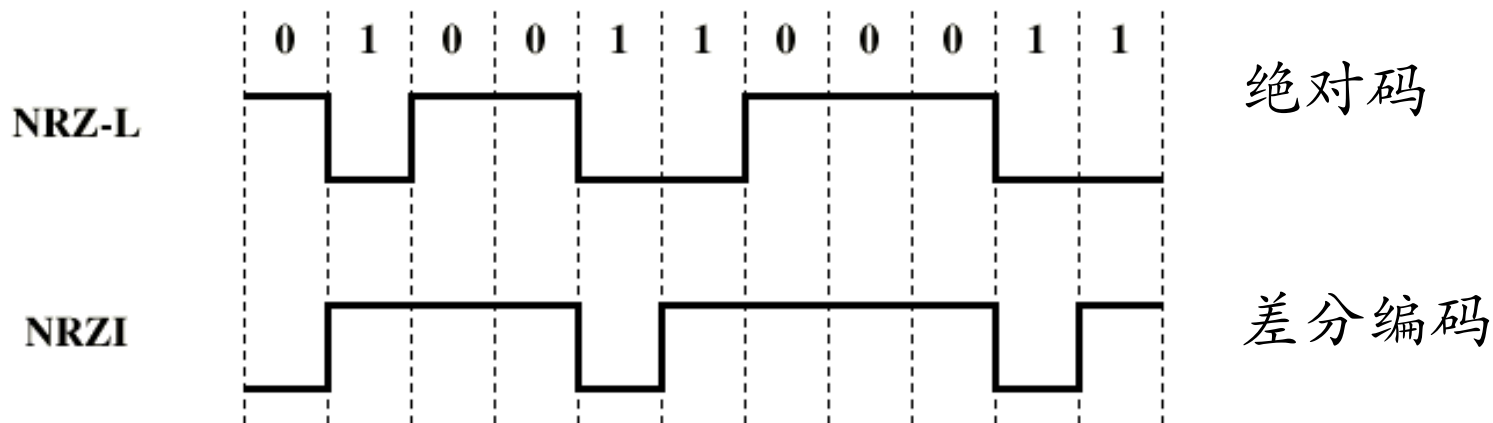
- 编译码简单，以降低通信延时和成本
- 尽量避免编码后的信号比原始信号要求的**数据率**高

传输码的码型选择原则



- 不含直流，且高频分量尽量少
- 含有丰富的定时信息，以便于从接收码流中提取定时信号
- 功率谱主瓣宽度窄，以节省传输频带
- 不受信息源统计特性的影响，即能适应于信息源的变化
- 具有内在的检错能力，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
- 编译码简单，以降低通信延时和成本

不归零码



应用

- 原始数字数据表示
- 在信号传输是不常使用

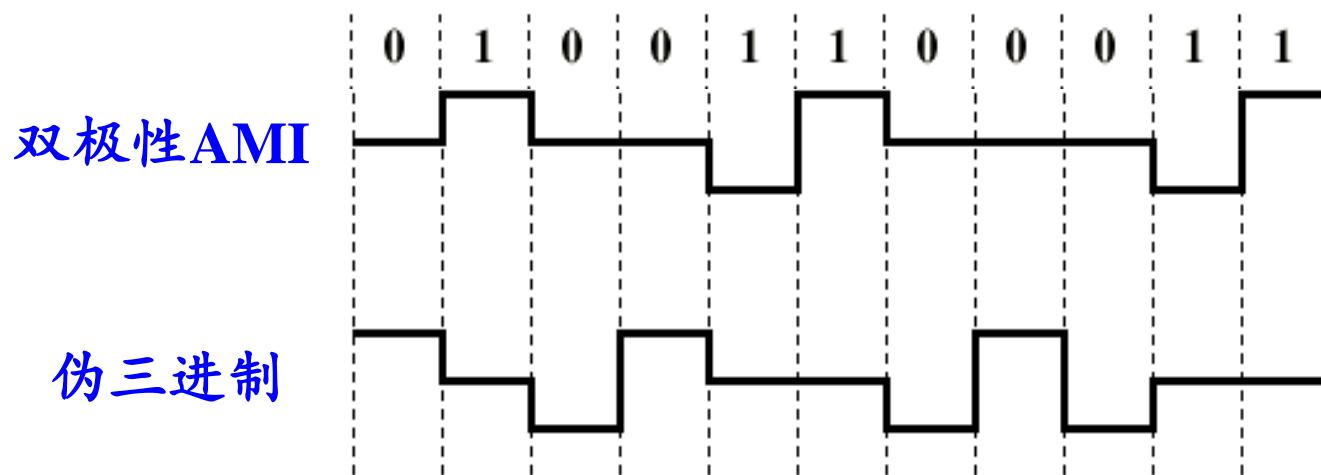
优点

- 简单
- 有效利用带宽

缺点

- 具有直流成分
- 缺乏同步能力

多电平二进制



- 双极性码（**正**，**负**，**零**三种电平）
 - 没有信号表示“0”，交替变化正负电平表示“1”
- 双极性-AMI（伪三进制与此类似）
 - 没有净直流成分
 - 信号带宽比不归零码带宽窄
 - 易于差错检测 (1交替)
 - 即使一长串1也不会失去同步 (0仍然有问题)

多电平二进制



➤ 双极性AMI，在较长的0比特串下 **失同步问题**

- 低速情况下：插入**附加比特**

- 块编码 nBmB码 ($m > n$)

- 4B5B码，选用不超过一个前导0和两个后缀0的方式选择码组

- 光纤通信中选择 $m = n + 1$

- 增加了额外比特，要求高的数据率

- 高速情况下：**扰码**技术

- 注：AMI码是1B1T码

扰码技术



➤ 使用**扰码**替代产生恒定电压的序列

➤ **填充序列**：

- 必须产生足够的**跳变**以利于同步
- 必须被接收器**识别**并以原始序列替换回来
- 和原始序列**长度相同**

➤ 设计目标

- 不含直流
- 含有丰富的定时信息
- 不会降低数据率
- 可提供差错检测
- 易于检测，不会被接收端误判

B8ZS码：双极性8零替换



- 对于一个全零的八位组00000000，如果这个八位组之前的最后一个电压脉冲为**正**，那么这个八位组被编码为000+-0-+。
- 对于一个全零的八位组00000000，如果这个八位组之前的最后一个电压脉冲为**负**，那么这个八位组被编码为000-+0+-。

HDB3码：高密度双极性3零码



➤ 使AMI码连“0”个数不超过3个。

➤ 编码规则：

1. 检查消息码中“0”的个数。当连“0”数目小于等于3时，HDB₃码与AMI码一样，+1与-1交替
2. 连“0”数目超过3时，将每4个连“0”化作一小节，定义为B00V，称为破坏节，其中V称为破坏脉冲，而B称为调节脉冲
3. V与前一个相邻的非“0”脉冲的极性相同(这破坏了极性交替的规则，所以V称为破坏脉冲)，并且要求相邻的V码之间极性必须交替。V的取值为+1或-1
4. B的取值可选0、+1或-1，以使V同时满足（3）中的两个要求
5. V码后面的号码极性也要交替

HDB3码：3阶高密度双极性码



➤ 例：

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

AMI码： -1 0 0 0 0 +1 0 0 0 0 0 -1 +1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 +1

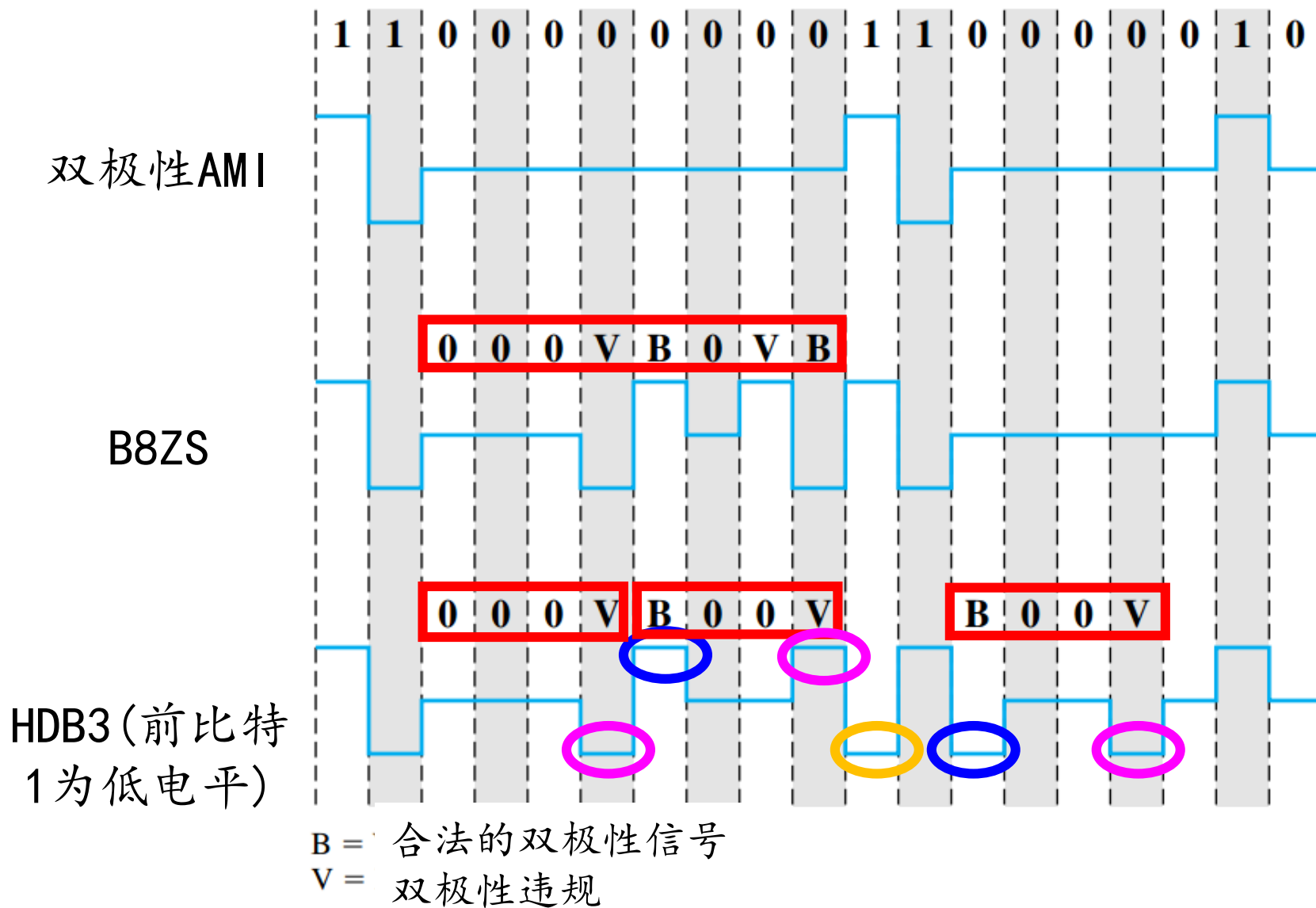
HDB3码： -1 0 0 0 -V **+1** 0 0 0 **+V** -1 +1 **-B** 0 0 **-V** **+B** 0 0 **+V** -1 +1

其中的 **$\pm V$ 脉冲**和 **$\pm B$ 脉冲**与 **± 1 脉冲波形相同**

➤ 译码

因为每一个破坏脉冲V总是与前一非“0”脉冲**同极性**(包括B在内)，从收到的符号序列中可以容易地找到**破坏点V**，于是也断定V符号及其前面的3个符号必是连“0”符号，从而恢复4个连“0”码，再将所有-1变成+1后便得到原消息代码。

扰码技术

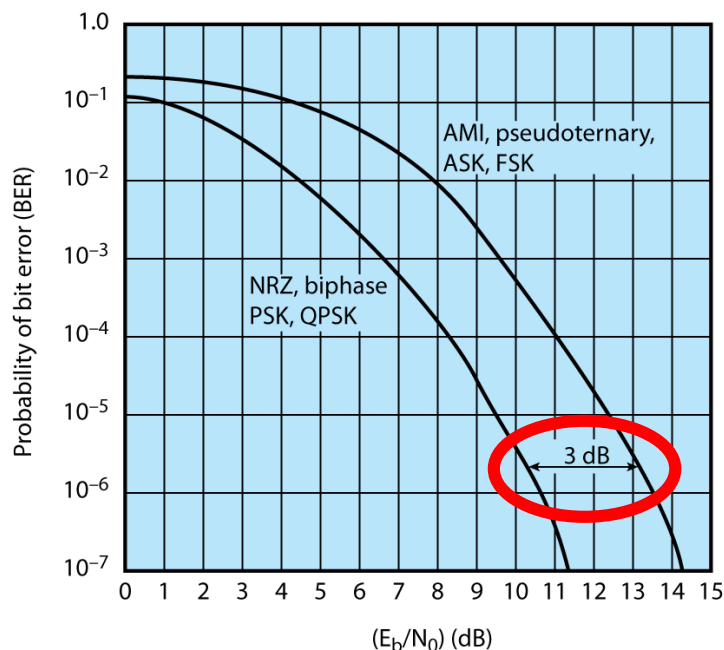


多电平二进制



➤ 比不归零码效率低

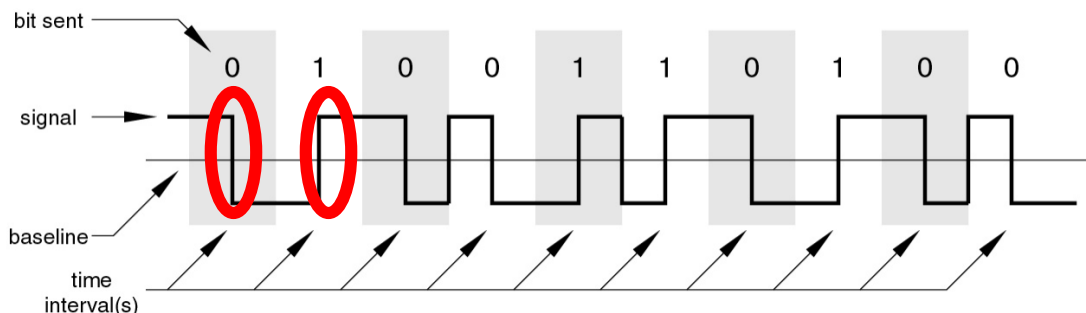
- 接收端需要区分3个电平值 ($+A, -A, 0$)
- 三个电平仅表示 $\log_2 3 = 1.58$ 个比特
- 在相同错误率的情况下，双极性信号需要比单极性信号功率多3dB



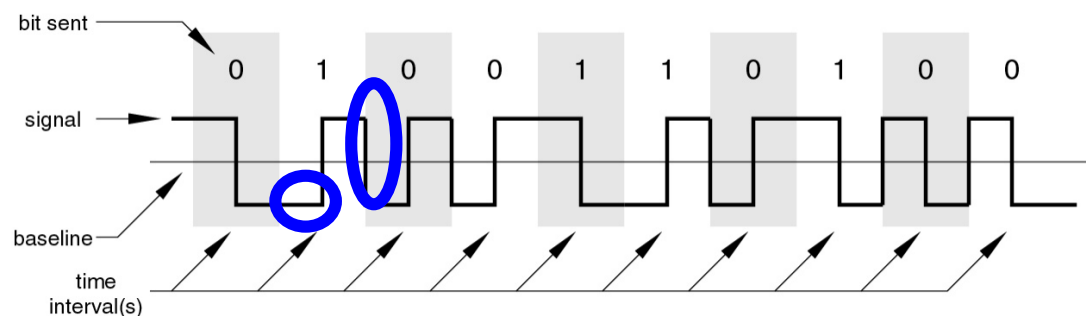
双相位



曼彻斯特
编码



差分
曼彻斯特
编码



- 在每个比特周期的**中央产生跳变**
- 优点：跳变提供了数据和**定时**信息，**无直流**成分
- 缺点：**调制率是不归零码的两倍**，需要更大的带宽
- 应用：IEEE 802.3 (以太网), 802.5令牌环局域网

双相位机制的优点



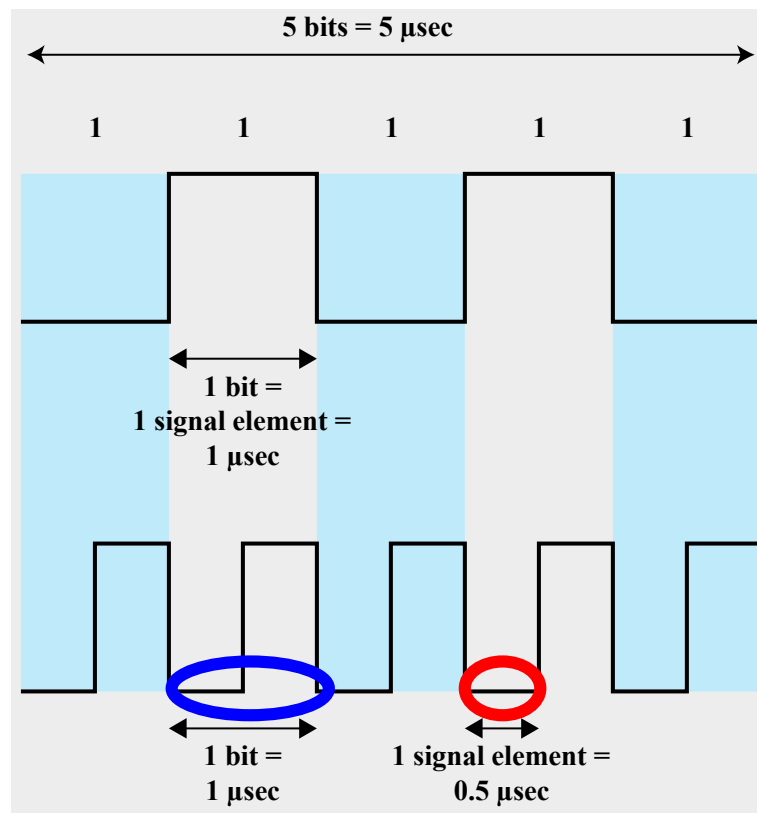
- **同步**：每个比特时间内存在预知的跳变，所以接收器可以根据这个跳变来同步。
- **无直流成分**：双相位编码不存在直流成分。
- **差错检测**：一个期待的跳变的丢失可用于检测差错。想要产生一个无法检测到的差错，那么线路上的噪声必须在期待的跳变发生之前和之后同时翻转信号。

调制率

➤ **数据率**：即比特率， $1/T_b$ ，其中 T_b 为比特的持续时间。

➤ **调制率**：信号元素生成的速率。对于曼彻斯特编码来说，长度最小的信号元素占半个比特持续时间，因此曼彻斯特编码的最大调制率为 $2/T_b$

不归零码



曼彻斯特

信号编码技术



1. 数字数据，数字信号
2. 数字数据，模拟信号
3. 模拟数据，数字信号
4. 模拟数据，模拟信号

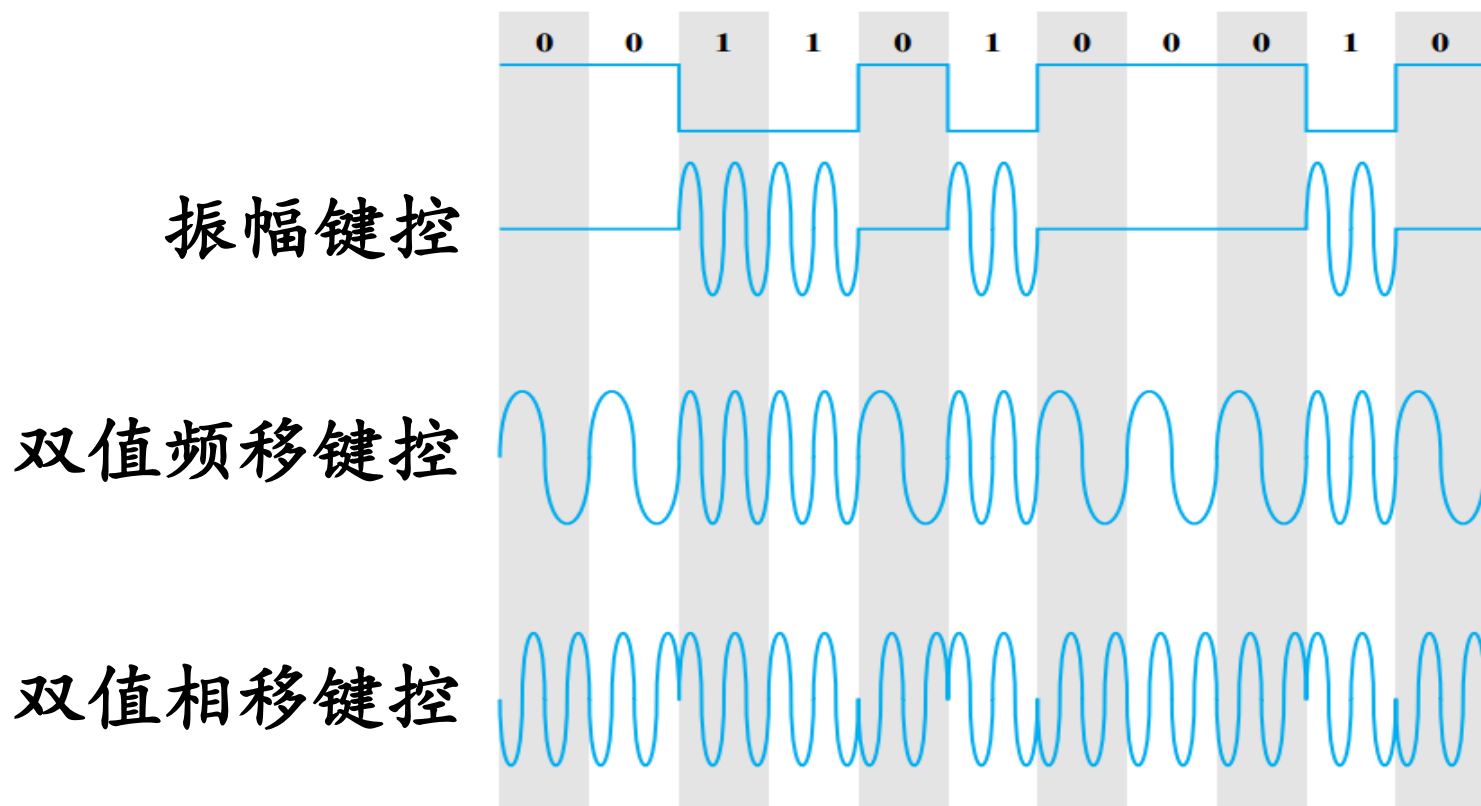
数字数据，模拟信号



- 模拟信号传输数字数据：通过公用电话网传输数字数据
 - 电话网在300~3400Hz的话音频率范围内接收、交换以及传输模拟信号；
 - 电话网不是现成可以处理数字信号的；
 - 数字设备通过调制解调器与网络相连，完成数字数据和模拟信号的转换。

• 数字数据的模拟信号调制

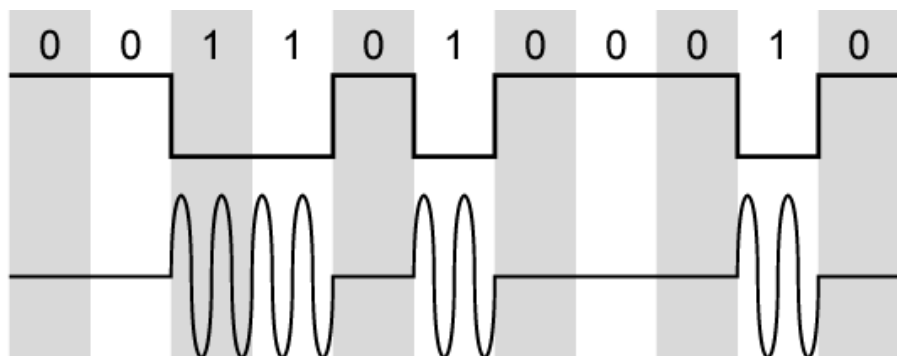
- 得到的信号所占的带宽都以载波频率为中心
- 载波频率是一种连续的频率，能够被调制或承载另一个（携带信息的）信号



振幅键控 ASK

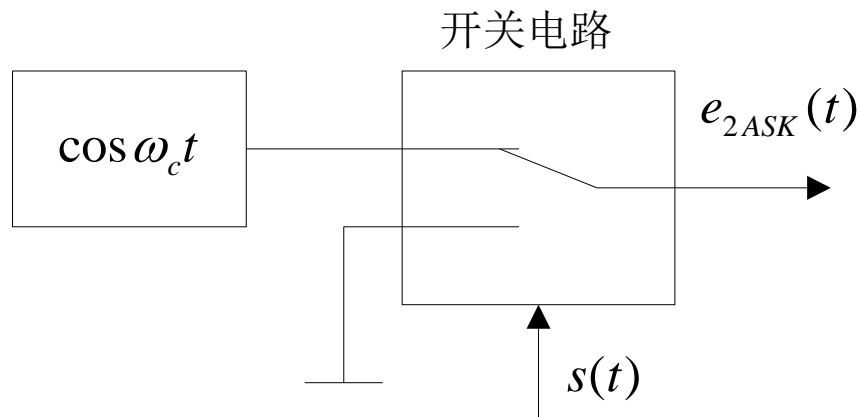


➤ 0/1 由载波频率的两个不同**振幅**值来表示



$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ 0 & \text{binary 0} \end{cases}$$

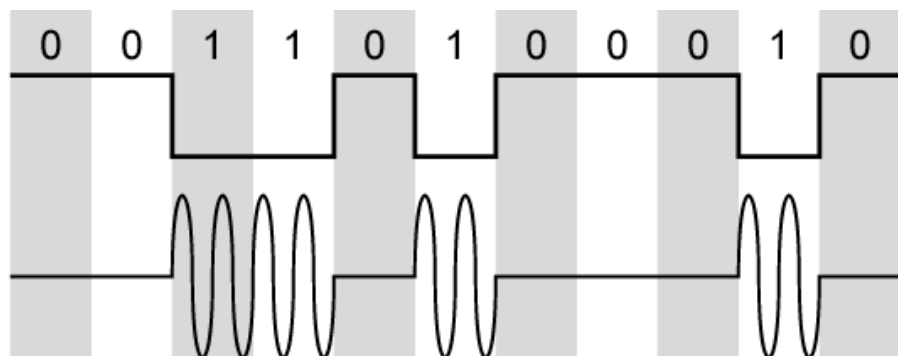
- 键控法



振幅键控 ASK

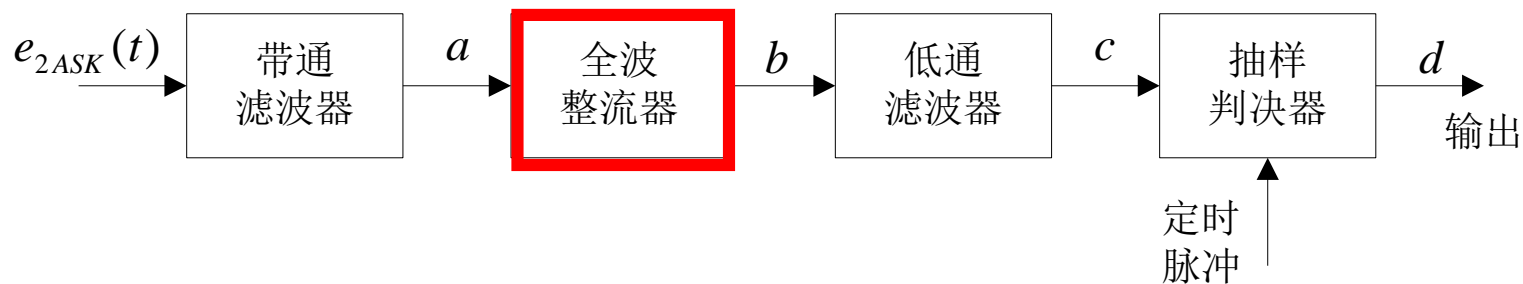


➤ 0/1 由载波频率的两个不同振幅值来表示

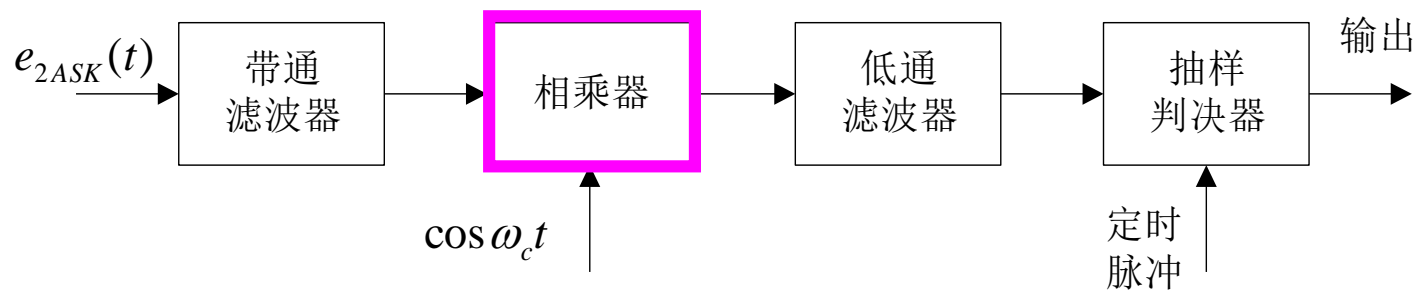


$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ 0 & \text{binary 0} \end{cases}$$

非相干解调



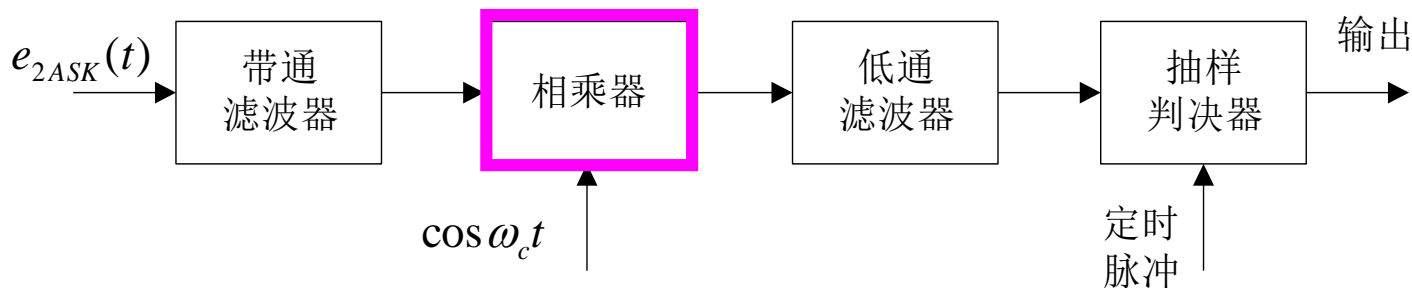
相干解调



相干解调



相干解调



$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ 0 & \text{binary 0} \end{cases}$$

$$y(t)$$

$$= A \cos(\omega_c t) \cos(\omega_c t)$$

$$= A[\cos(\omega_c t + \omega_c t) + \cos(\omega_c t - \omega_c t)]$$

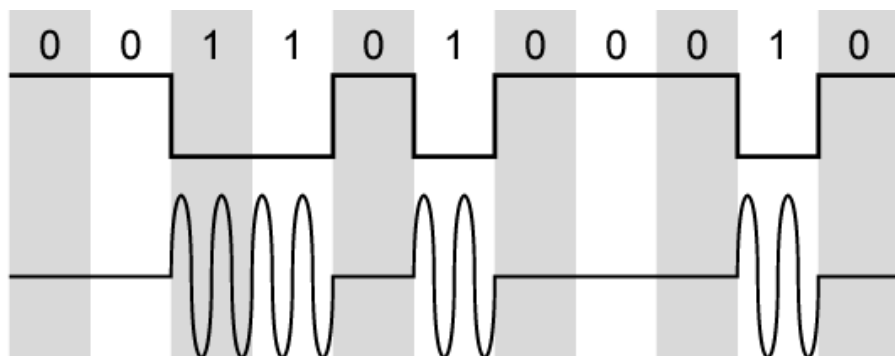
$$= A - A \cos(2\omega_c t)$$

$$\begin{aligned} \cos \alpha \sin \beta &= \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) - \sin(\alpha - \beta)] \\ \sin \alpha \cos \beta &= \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)] \\ \cos \alpha \cos \beta &= \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)] \\ \sin \alpha \sin \beta &= -\frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) - \cos(\alpha - \beta)] \end{aligned}$$

振幅键控 ASK



➤ 0/1 由载波频率的两个不同振幅值来表示



$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ 0 & \text{binary 0} \end{cases}$$

➤ 容易受突发的增益变化影响

➤ 不够高效

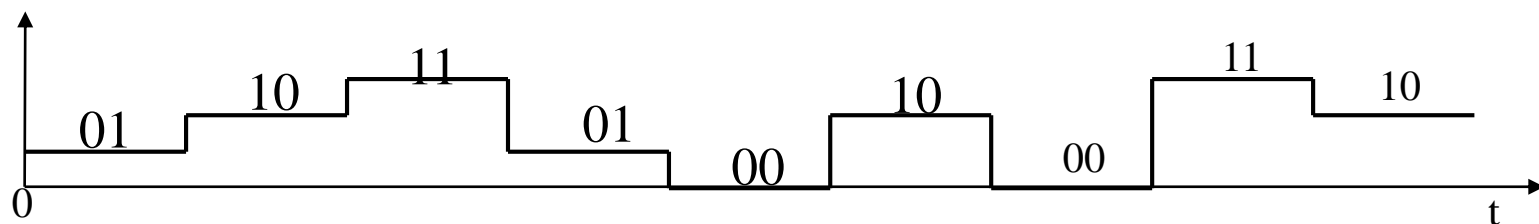
➤ 应用

- 数据率不高于 1200bps 的话音线路
- 光纤中传输数字数据

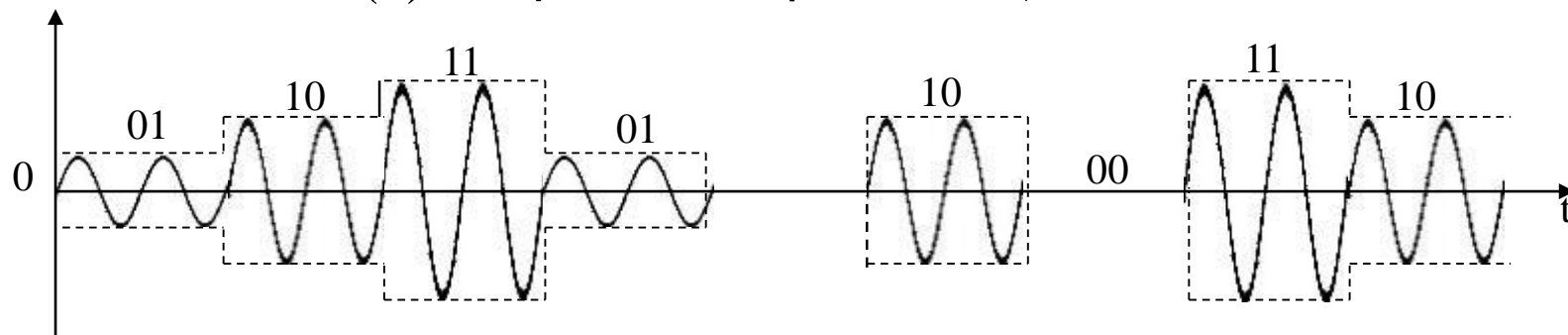
多进制振幅键控 MASK



- 多进制振幅键控又称**多电平调制**
- 优点：MASK信号的带宽和2ASK信号的带宽相同，故**单位频带的信息传输速率高**，即频带利用率高。



(a) 基带多电平单极性不归零信号

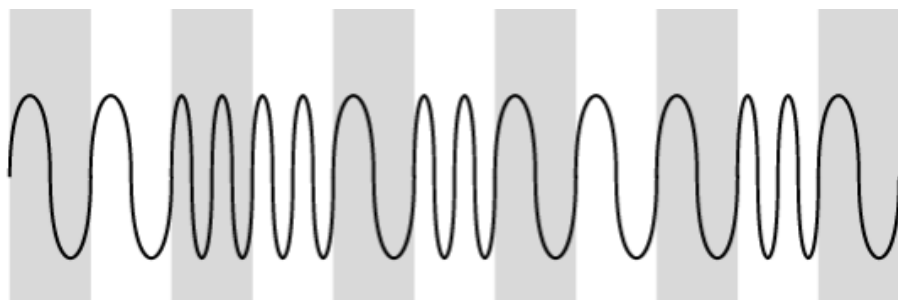


(b) MASK信号

二进制频移键控BFSK



➤ 由两个不同的**频率**来代表二进制数的两个值



$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & \text{binary 0} \end{cases}$$

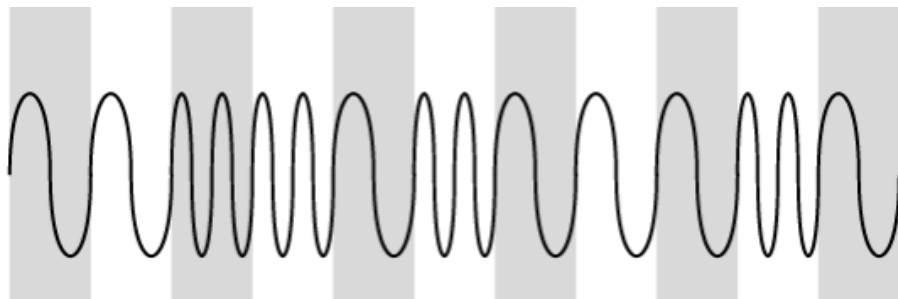
➤ 应用：

- **话音**信道(典型数据率为1200bps)
- **高频无线电**传输 (3-30M 天波传输)
- 使用**同轴电缆的局域网**

二进制频移键控BFSK

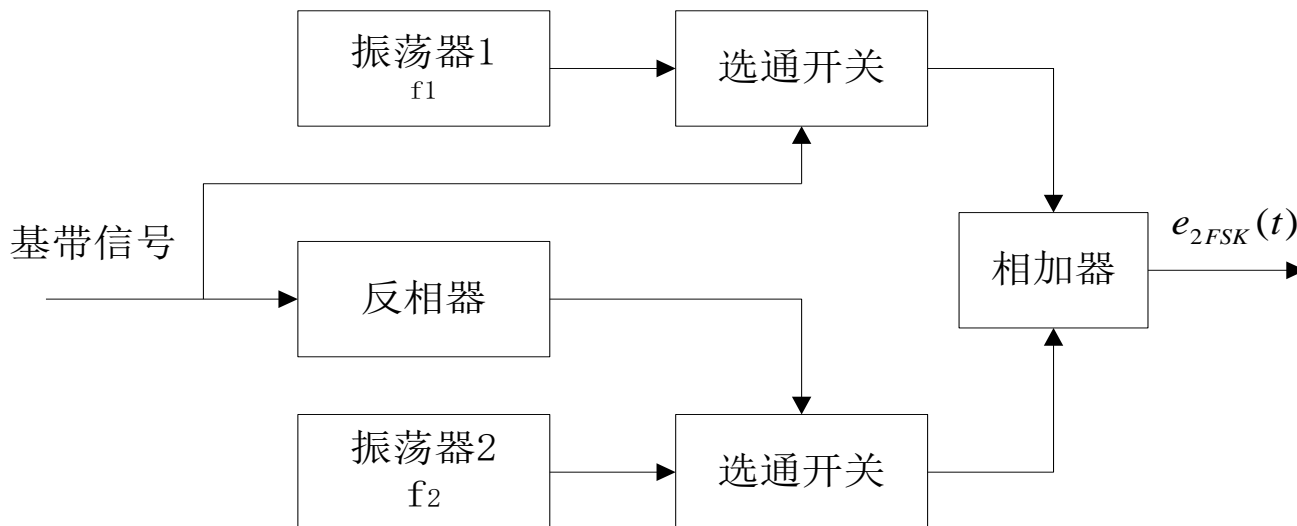


➤ 由两个不同的频率来代表二进制数的两个值



$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & \text{binary 0} \end{cases}$$

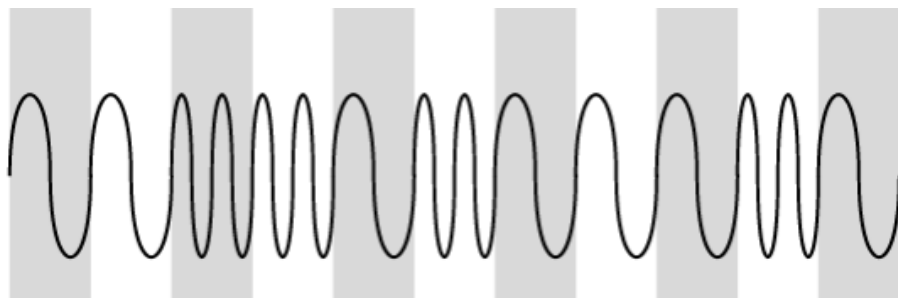
• 键控法调制



二进制频移键控BFSK

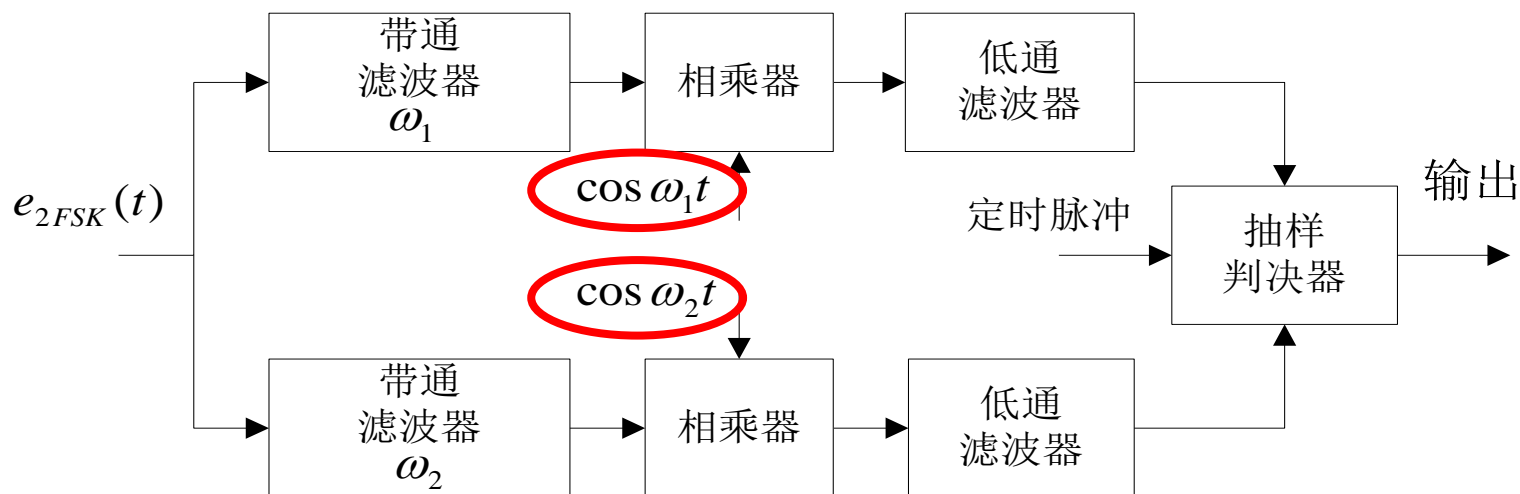


➤ 由两个不同的频率来代表二进制数的两个值



$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & \text{binary 0} \end{cases}$$

• 相干解调



多值频移键控 MFSK



➤ 由不同的频率来代表一个比特以上的数据

$$S_i(t) = A \cos 2\pi f_i t \quad 1 \leq i \leq M$$

$$f_i = f_c + (2i - 1 - M)f_d$$

f_c = 载波频率

f_d = 相差频率

M = 不同信号元素的个数 $= 2^L$

L = 每个信号元素携带的比特数

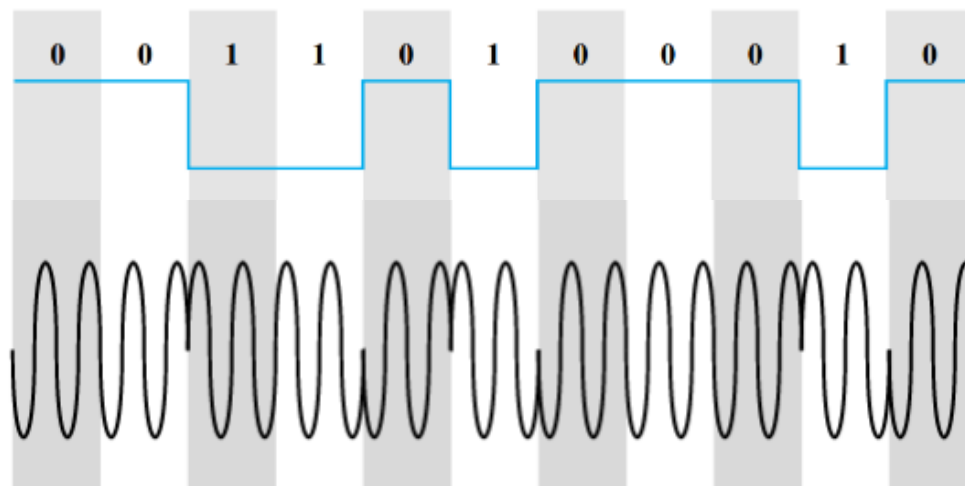
❖ 见书例5.4

相移键控 PSK



- 通过载波信号的**相位偏移**来表示数据
- 二进制相移键控 (Binary PSK, BPSK)

$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{binary } 0 \\ A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary } 1 \end{cases}$$



BPSK

相移键控 PSK



➤ 通过载波信号的相位偏移来表示数据

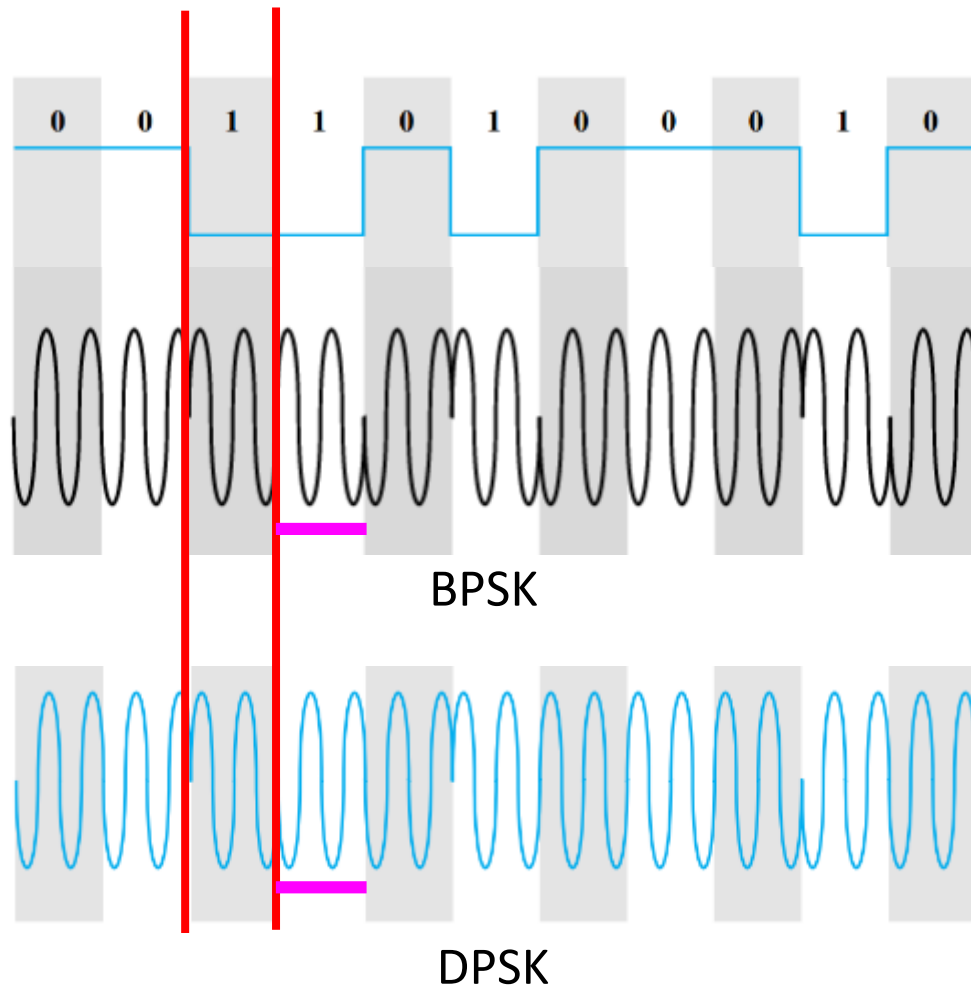
➤ 二进制 PSK (BPSK)

$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{binary } 0 \\ A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary } 1 \end{cases}$$

➤ 2PSK “倒 π ”现象

➤ 差分相移键控(DPSK)

- 0: 相位相同
- 1: 相位相反

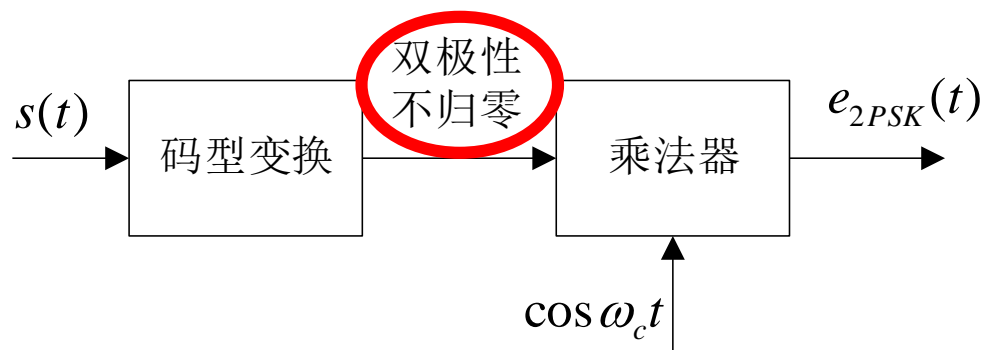


相移键控 PSK

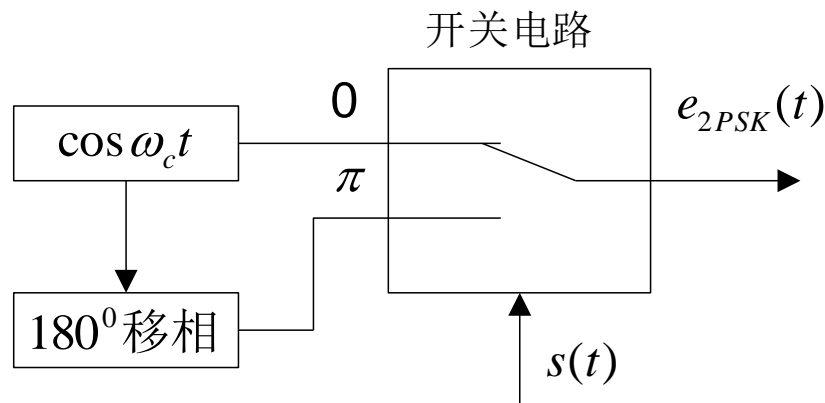


➤ BPSK

• 模拟调制法



• 键控调制法

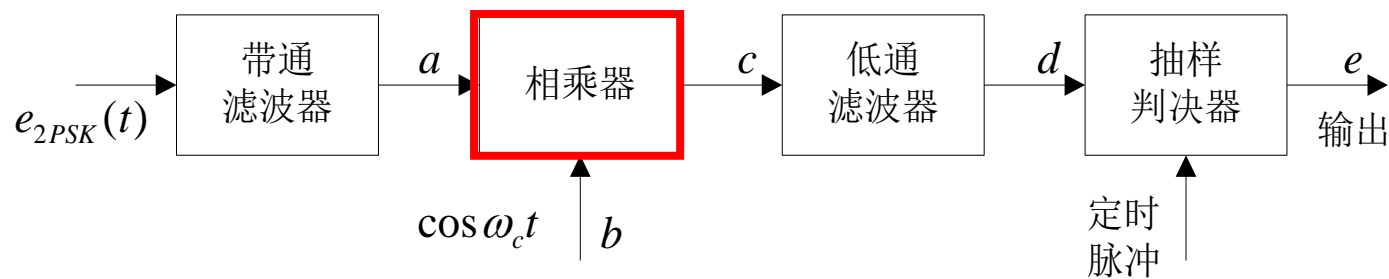


相移键控 PSK

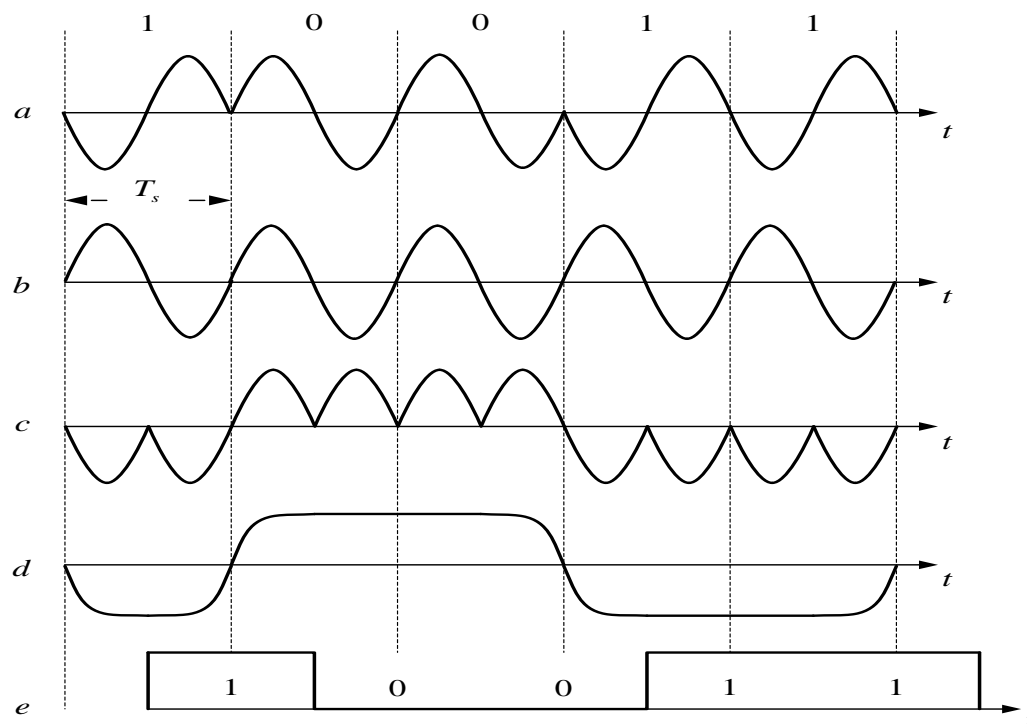


➤ BPSK

- 相干解调



同频 (同相)



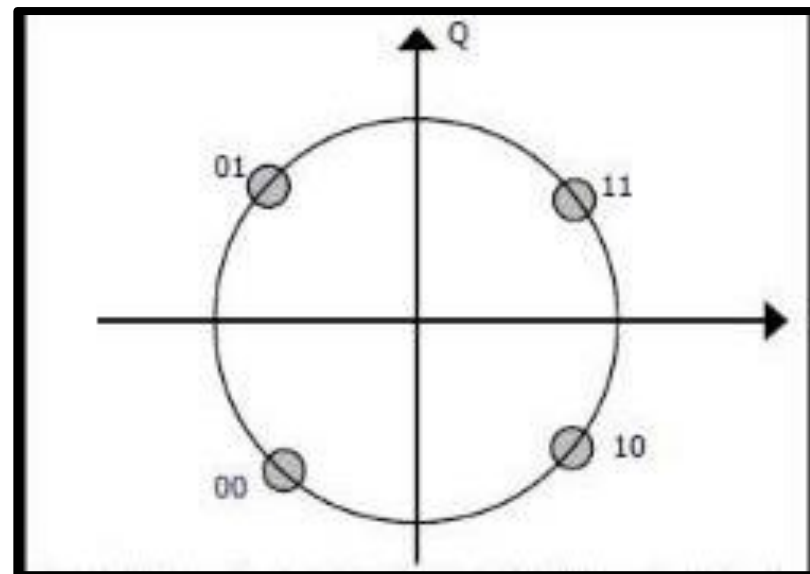
四相相移键控 QPSK



➤ 如果一个信号元素表示多个比特，能够更有效的利用带宽

- QPSK相位偏移为 $\pi/2$ (90°)
- 每个元素代表2个比特

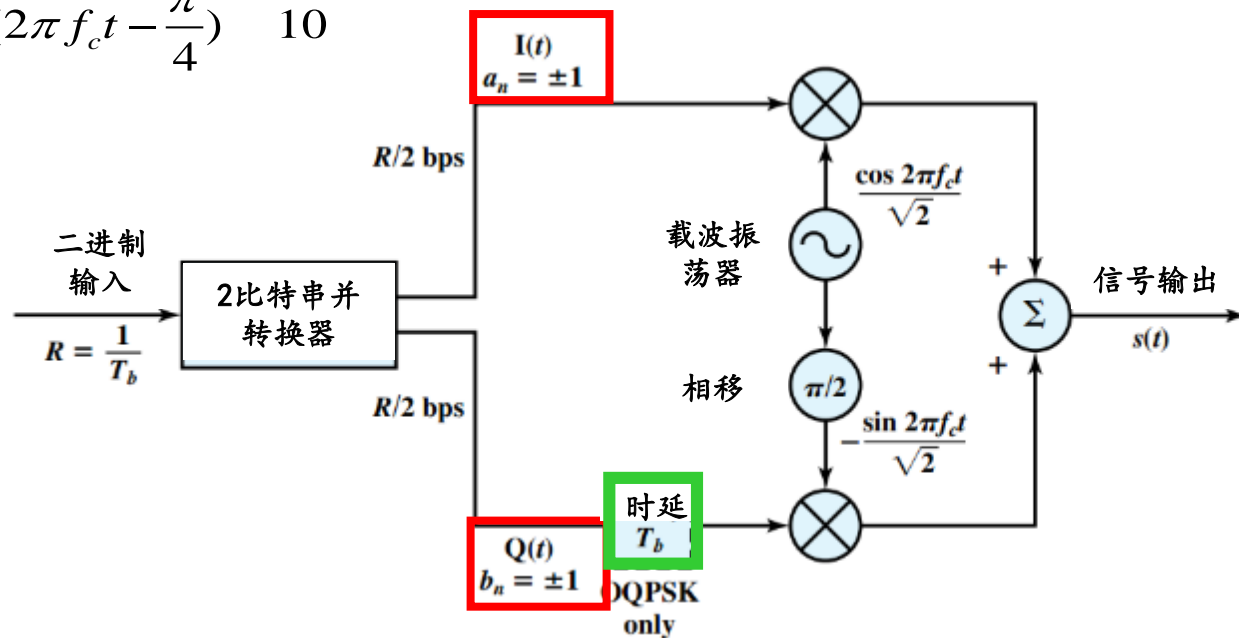
$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}) & 11 \\ A \cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}) & 01 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}) & 00 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}) & 10 \end{cases}$$



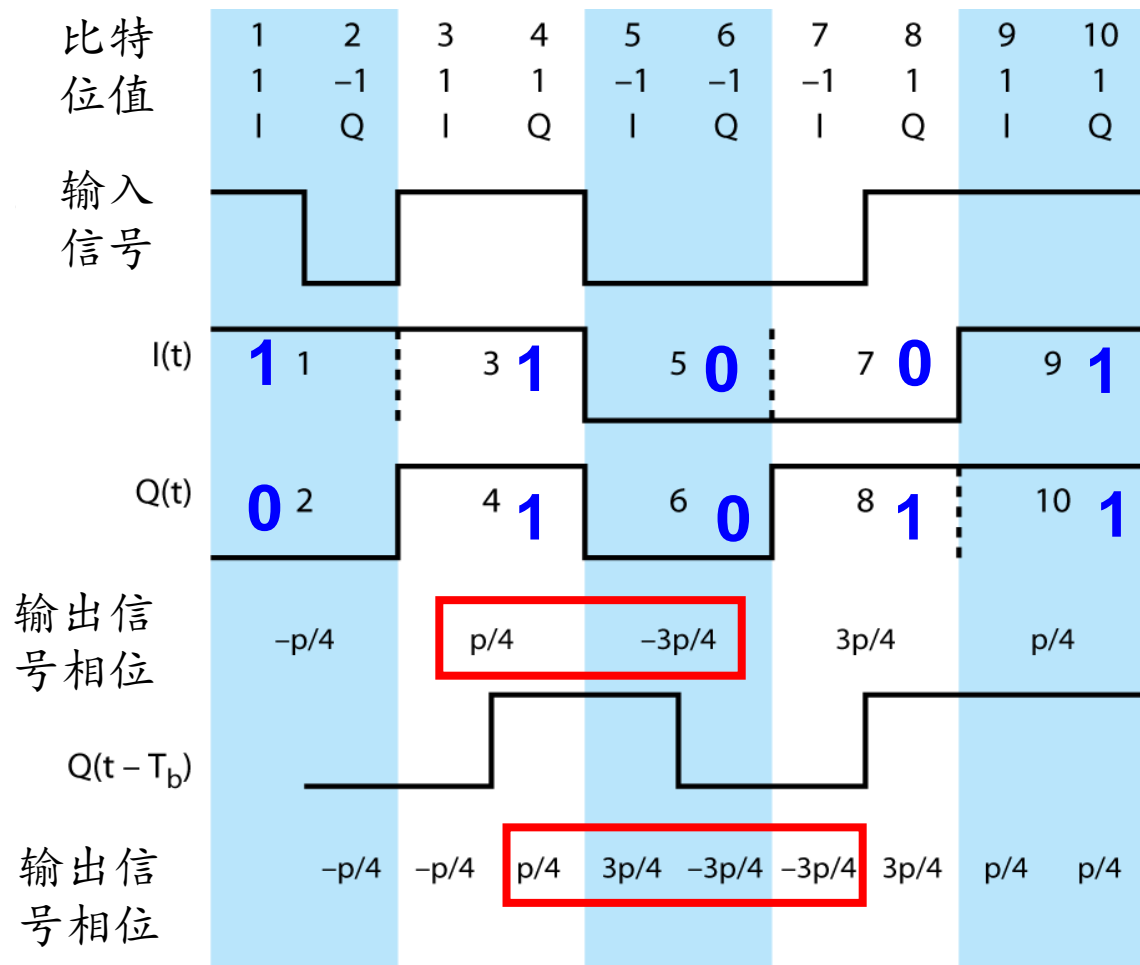
QPSK和正交四相相移键控OQPSK

- 调制：数据流按比特交替分成两个独立的二进制流，分别调制

$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}) & 11 \\ A \cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}) & 01 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}) & 00 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}) & 10 \end{cases} = \frac{1}{\sqrt{2}} I(t) \cos 2\pi f_c t - \frac{1}{\sqrt{2}} Q(t) \sin 2\pi f_c t$$



偏置正交四相相移键控OQPSK



- 正交四相相移键控OQPSK

- 与QPSK的区别仅在于
 - OQPSK在Q流中引入了一个比特的时延

- OQPSK比QPSK相位变化小

- 叠加之后信号的相位变化始终不会超过 $\pi/2$
- 有利于调相器高速工作
- 有利于控制非线性影响造成的信号带宽扩散

QPSK和OQPSK波形举例

多值相移键控 MPSK

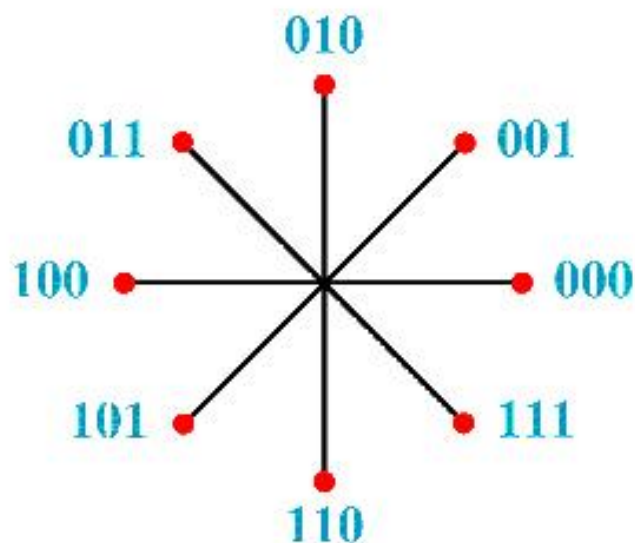


➤ 使用 **多个相位角度**

- 8个相位角度 -- 三个比特

Tribit	Phase
000	0
001	45
010	90
011	135
100	180
101	225
110	270
111	315

Tribits
(3 bits)



Constellation diagram

- 9600bps 调制解调器使用 12个相位角度

课程习题（作业）

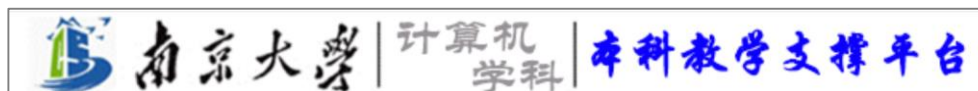


课本（截止日期：习题课前/4月21日晚23:55）：

5.5； 5.7； 5.9；

提交方式：<http://cslabcms.nju.edu.cn>（本科教学支撑平台）

▼ 第 5 周 03月29日-04月04日	
	主题
数据通信作业-第5章	



提交截止时间

2021年04月21日 星期三 23:55

- 命名：学号+姓名+第*章。
- 若提交遇到问题请及时发邮件或在下一次上课时反馈。

课程习题（作业）



5.5 考虑下面的信号编码技术，输入的数据为二进制数据 a_m ，其中 $m = 1, 2, 3, \dots$ 。处理过程分两步，首先产生一个新的二进制数

$$\begin{aligned} b_0 &= 0 \\ b_m &= (a_m + b_{m-1}) \bmod 2 \end{aligned}$$

然后对它进行编码

$$c_m = (b_m - b_{m-1})$$

在接收端，原数据由以下算法恢复

$$a_m = c_m \bmod 2$$

- 证明接收到的 a_m 与被传输的 a_m 相等。
- 这是一种什么类型的编码。

课程习题（作业）



5.6 画出表5.2中每种编码情况下，比特流01001110的波形图。假设NRZI的前一个比特的信号电平是高；最近处理过的1比特具有负电压（AMI）；最近处理过的0比特具有负电压（伪三进制）。

5.7 图5.23中的波形图是用曼彻斯特编码后的二进制数据流。判断比特周期的起始时间和终止时间（也就是说，提取时钟信息），并写出其数据序列。

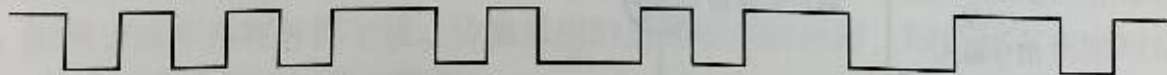


图5.23 曼彻斯特码流

5.8 假设有一个二进制数据流是由一长串的1后面跟着一个0，然后再是一长串的1组成，其余假设同习题5.6。画出该数据流使用以下几种编码方式时的波形图。

a. NRZ-L

b. 双极性AMI

c. 伪三进制编码

5.9 代表二进制序列0100101011的双极性AMI波形经过一个噪声较大的信道传输。接收到的波形如图5.24所示。该波形中有一处出现了差错。指出差错出现的位置并解释原因。

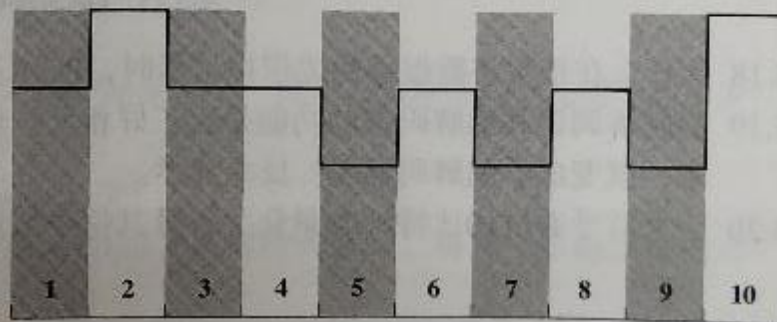


图5.24 接收到的双极性AMI波形

总结



问题？

殷亚凤

yafeng@nju.edu.cn

<http://cs.nju.edu.cn/yafeng/>

Room 901, Building of CS

