

# 第2章

## 物理层

**2.1 物理层概述****2.2 物理层下面的传输媒体****2.3 传输方式****2.4 编码与调制****2.5 信道的极限容量****2.6 信道复用技术**

## 2.3 传输方式

**01**

**串行传输和并行传输**

**02**

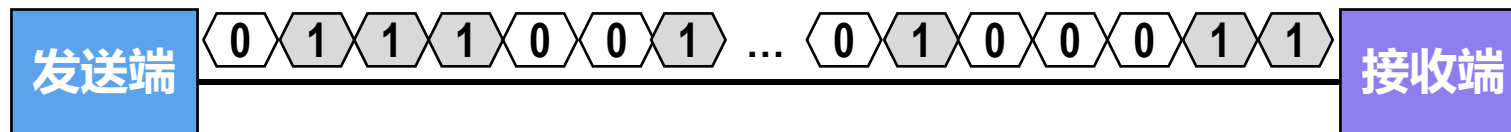
**同步传输和异步传输**

**03**

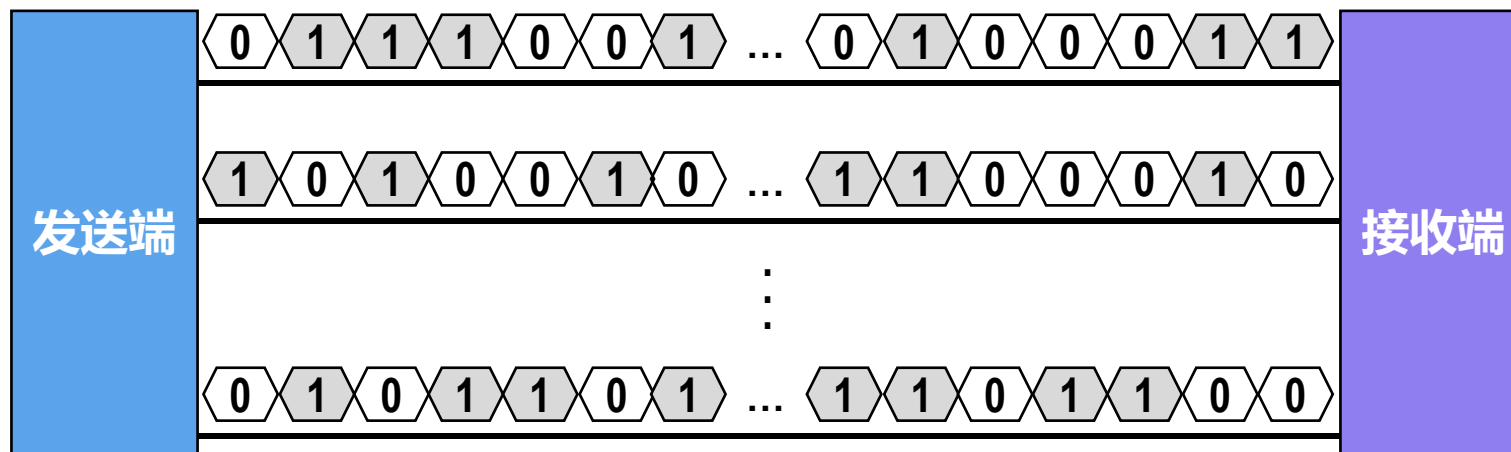
**单向通信、双向交替通信和双向同时通信**

## 01 串行传输和并行传输

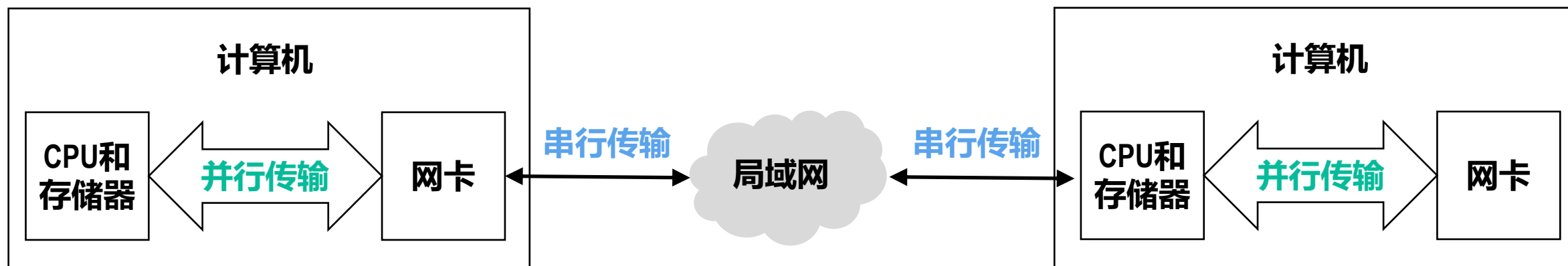
串行传输



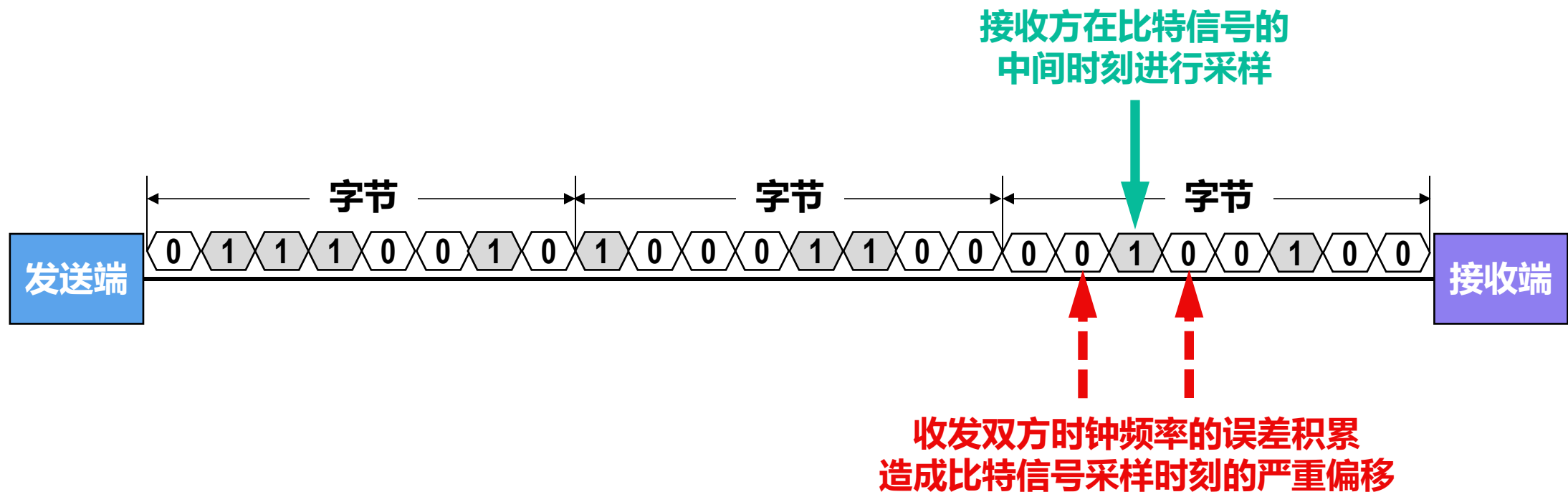
并行传输



## 01 串行传输和并行传输



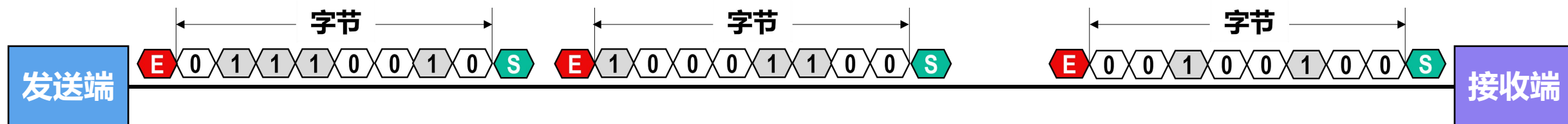
## 02 同步传输和异步传输



### 收发双方时钟同步的方法

- ☐ **外同步**：在收发双方之间增加一条时钟信号线。
- ☐ **内同步**：发送端将时钟信号编码到发送数据中一起发送（例如曼彻斯特编码）。

## 02 同步传输和异步传输



- **字节之间异步**，即字节之间的时间间隔不固定。
- **字节中的每个比特仍然要同步**，即各比特的持续时间是相同的。

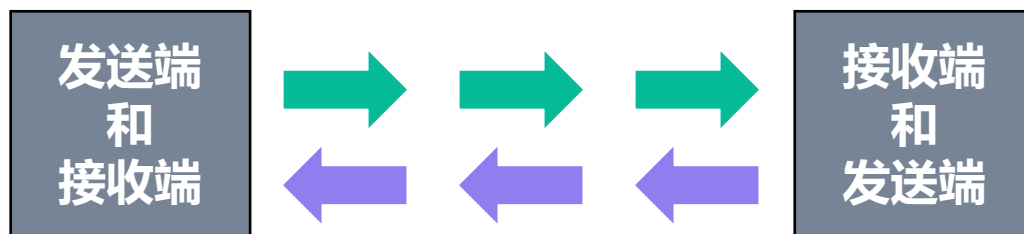
## 03 单向通信、双向交替通信和双向同时通信

单向通信  
(单工)

无线电广播

双向交替通信  
(半双工)

对讲机

双向同时通信  
(全双工)

手机



## 2.4 编码与调制

**01**

**编码与调制的基本概念**

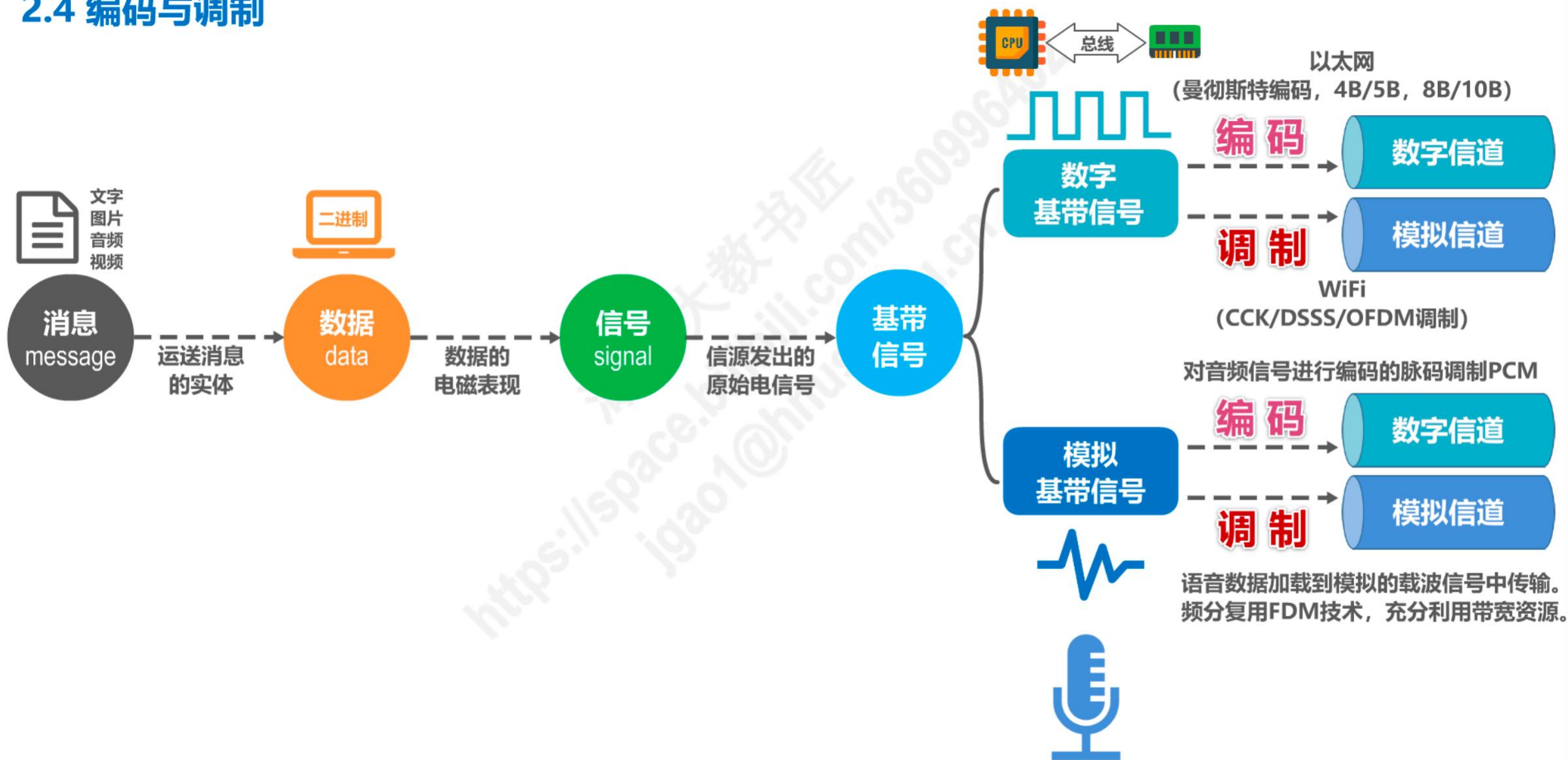
**02**

**常用编码方式**

**03**

**基本的带通调制方法和混合调制方法**

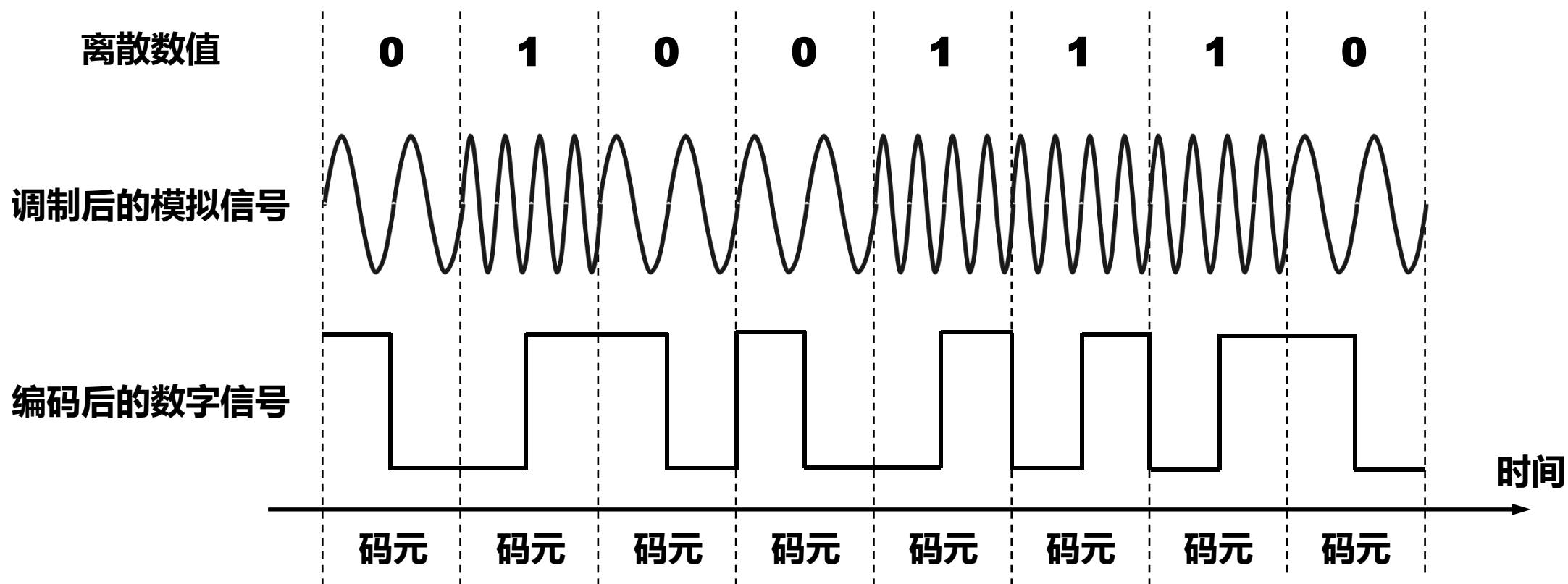
### 2.4 编码与调制



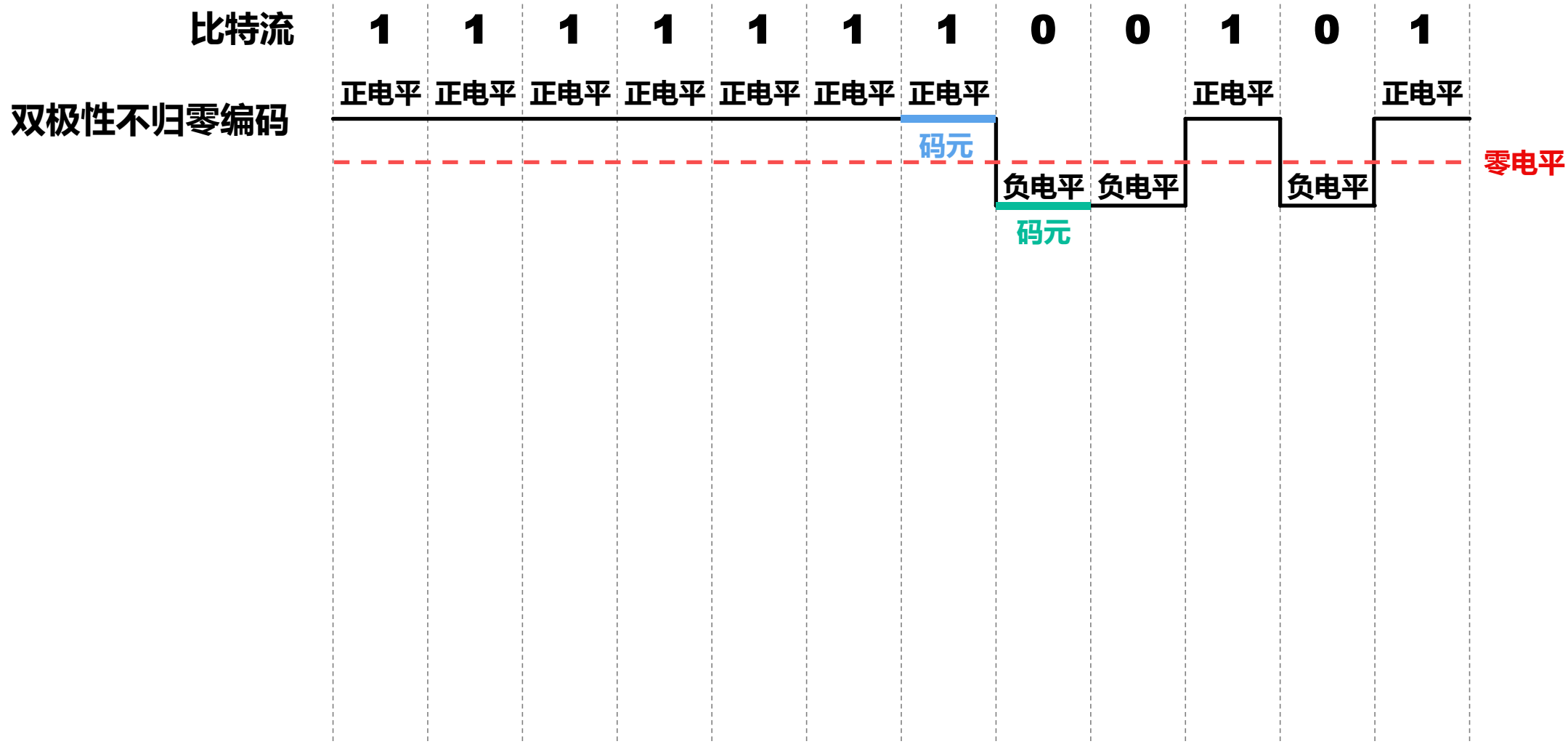
## 01 编码与调制的基本概念

### 码元

在使用时间域的波形表示信号时，代表不同离散数值的基本波形称为码元。



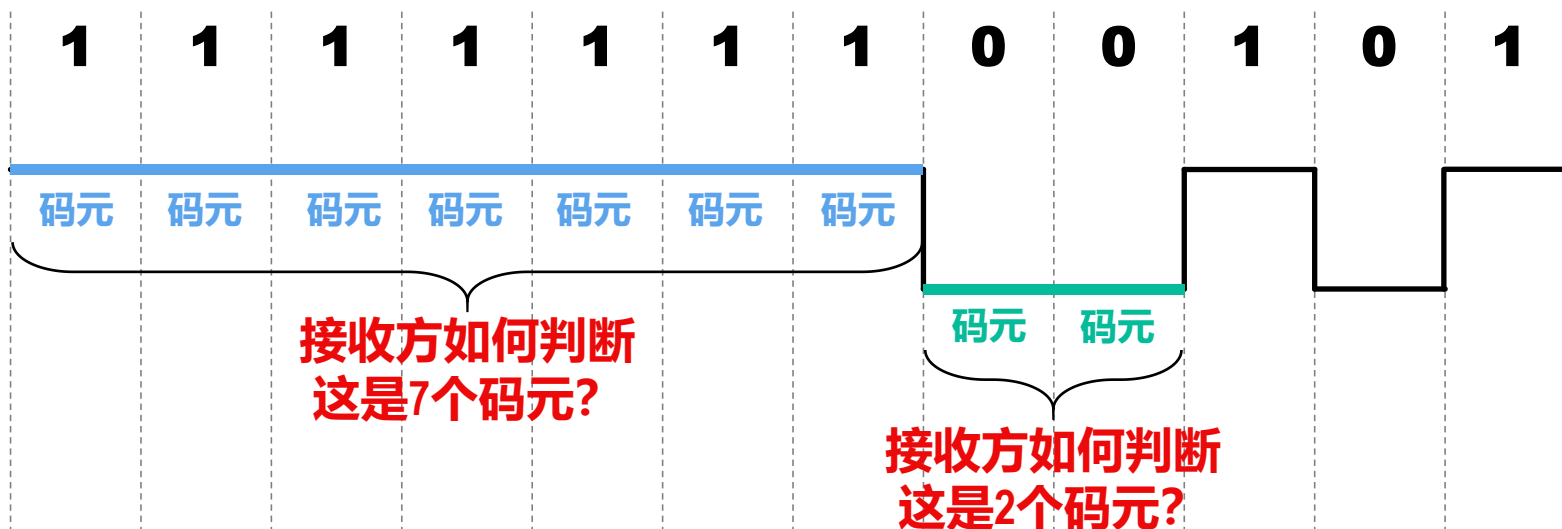
## 02 常用编码方式



## 02 常用编码方式

比特流

双极性不归零编码  
(编码效率高, 但存在同步问题)



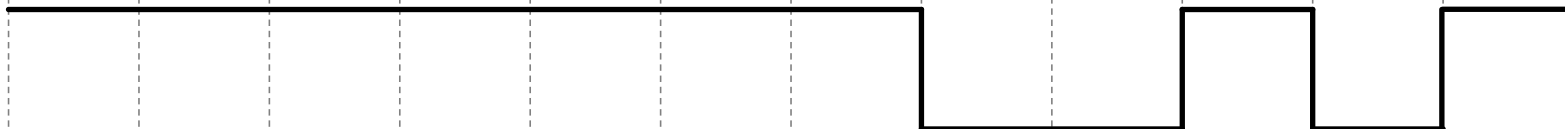
需要给收发双方再添加一条时钟信号线。  
发送方通过数据信号线给接收方发送数据的同时, 还通过时钟信号线给接收方发送时钟信号。  
接收方按照接收到的时钟信号的节拍, 对数据信号线上的信号进行采样。  
对于计算机网络, 宁愿利用这根传输线传输数据信号, 而不是传输时钟信号。

## 02 常用编码方式

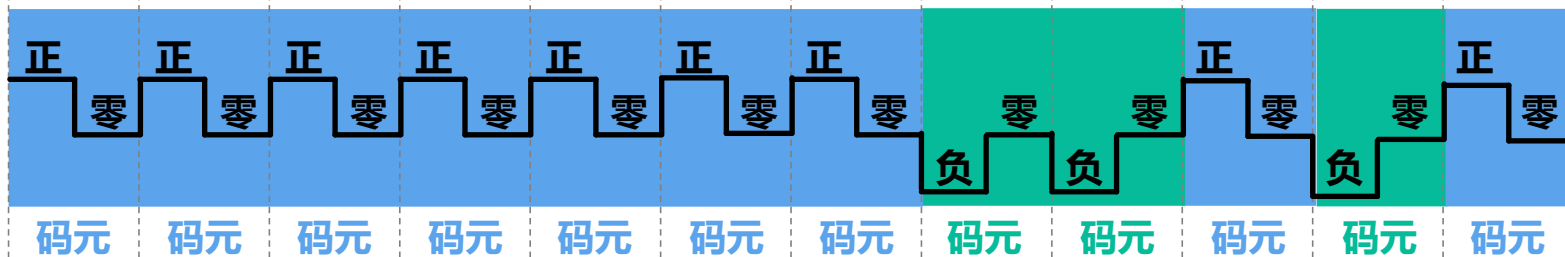
比特流

1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1

双极性不归零编码  
(编码效率高, 但存在同步问题)



双极性归零编码  
(自同步, 但编码效率低)



在每个码元的中间时刻信号都会回归到零电平。  
接收方只要在信号归零后采样即可。  
归零编码相当于将时钟信号用“归零”方式编码在了数据之内, 这称为“自同步”信号。  
然而, 归零编码中大部分的数据带宽, 都用来传输“归零”而浪费掉了。

## 02 常用编码方式

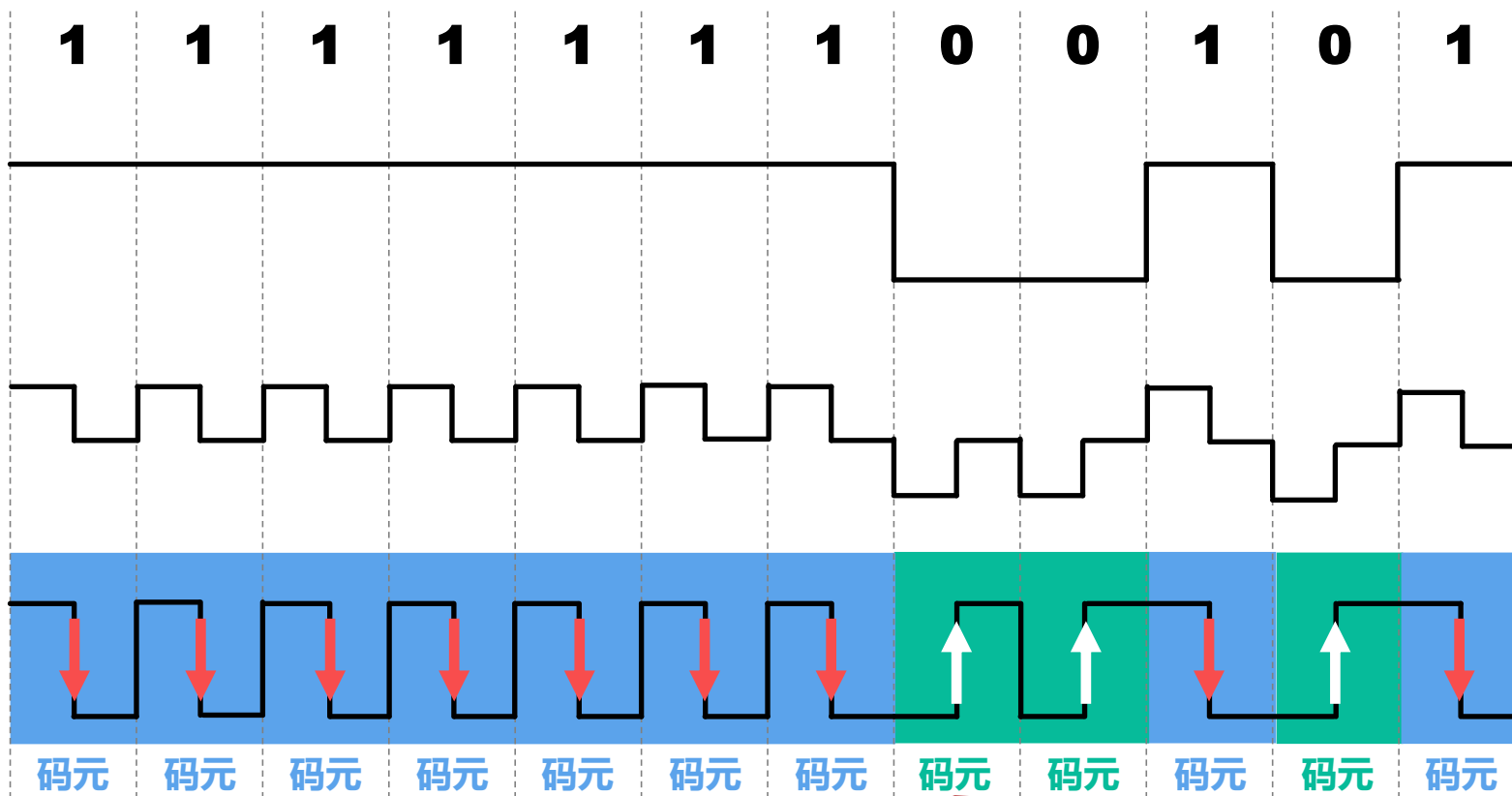
比特流

1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1

双极性不归零编码  
(编码效率高, 但存在同步问题)

双极性归零编码  
(自同步, 但编码效率低)

曼彻斯特编码  
(自同步, 10Mb/s传统以太网)



码元中间时刻的电平跳变既表示时钟信号, 也表示数据。  
正跳变表示1还是0, 负跳变表示0还是1, 可以自行定义。

## 02 常用编码方式

比特流

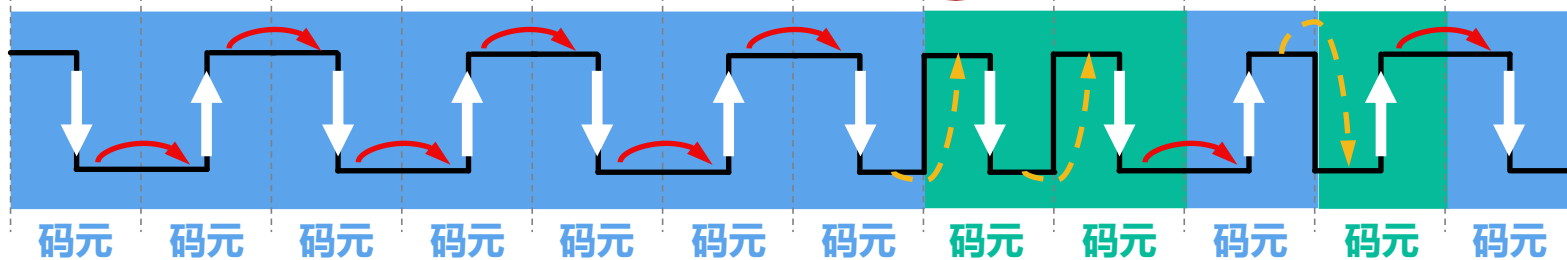
1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1

双极性不归零编码  
(编码效率高, 但存在同步问题)

双极性归零编码  
(自同步, 但编码效率低)

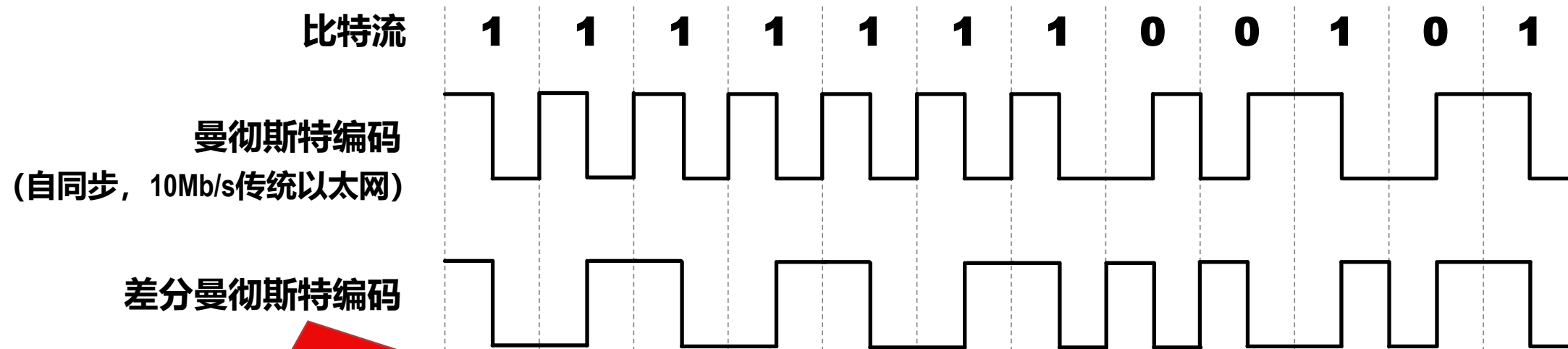
码元中间时刻的电平跳变仅表示时钟信号, 而不表示数据。  
数据的表示在于每一个码元开始处是否有电平跳变: 无跳变表示1, 有跳变表示0。

差分曼彻斯特编码





## 02 常用编码方式

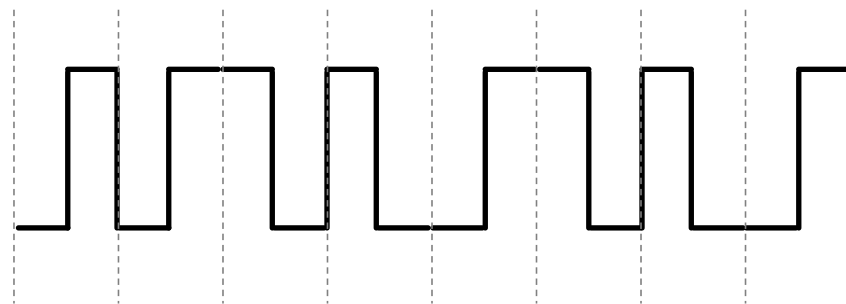


在传输大量连续1或连续0的情况下，差分曼彻斯特编码信号比曼彻斯特编码信号的变化少。在噪声干扰环境下，检测有无跳变比检测跳变方向更不容易出错，因此差分曼彻斯特编码信号比曼彻斯特编码信号更易于检测。

在传输介质接线错误导致高低电平翻转的情况下，差分曼彻斯特编码仍然有效。

## 02 常用编码方式

【2013年 题34】若下图为10BaseT网卡接收到的信号波形，则该网卡收到的比特串是（**A**）。



A. 0011 0110

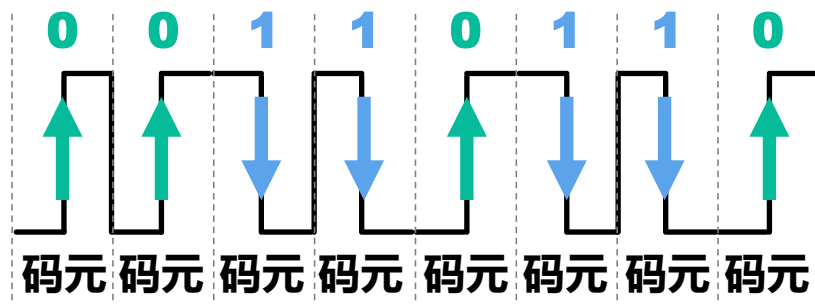
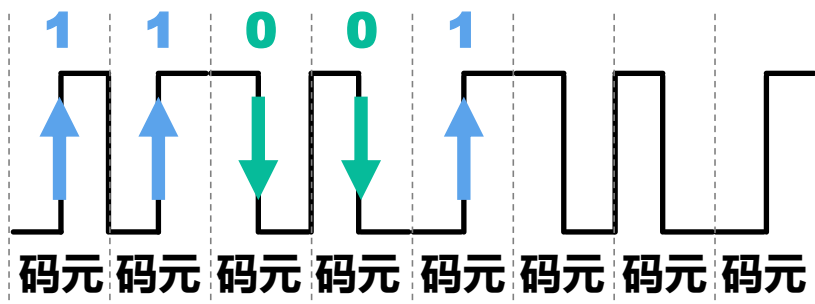
B. 1010 1101

C. 0101 0010

D. 1100 0101

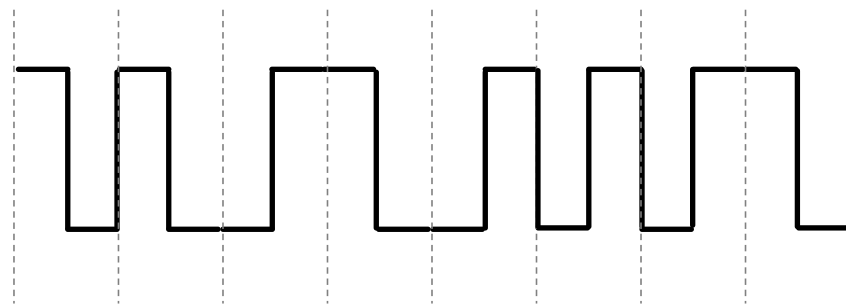
解析

1. 10BaseT以太网使用的是**曼彻斯特编码**。
2. 每个码元的中间时刻电平发生跳变：正跳变表示1还是0，负跳变表示0还是1，可以自行定义。



## 02

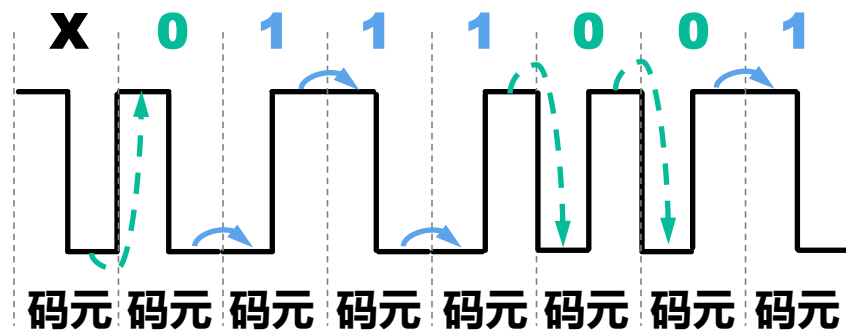
**A)**



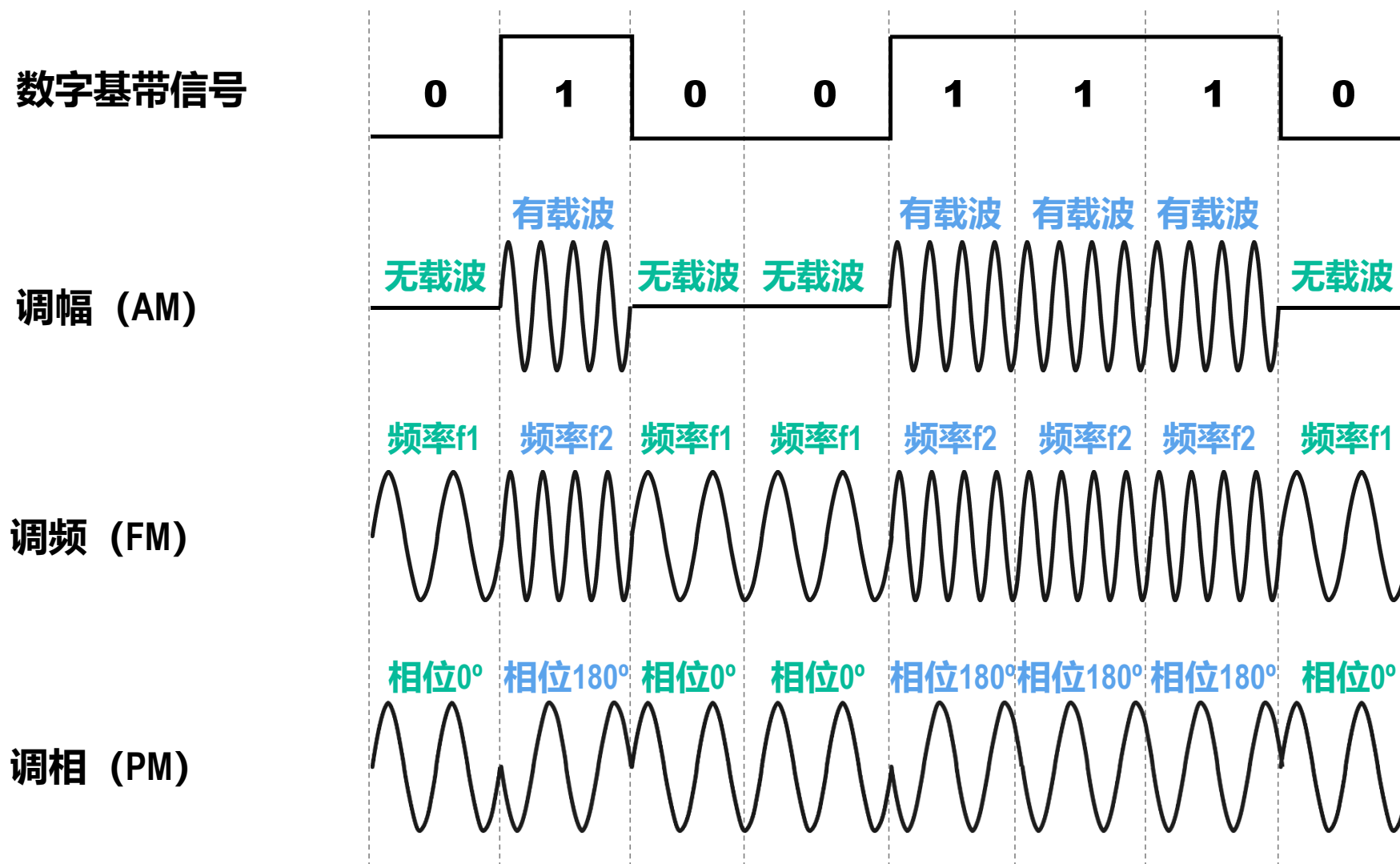
- ### D. 1011 0110

## 解析

1. 码元中间时刻的电平跳变仅表示时钟信号，而不表示数据。
2. 数据的表示在于每一个码元开始处是否有电平跳变：无跳变表示1，有跳变表示0。



### 03 基本的带通调制方法和混合调制方法



使用基本调制方法，1个码元只能包含1个比特信息。如何才能使1个码元包含更多的比特呢？

### 03 基本的带通调制方法和混合调制方法

频率

相位

振幅

因为载波的**频率和相位是相关的**，即频率是相位随时间的变化率，所以载波的**频率和相位不能进行混合调制**。

### 03 基本的带通调制方法和混合调制方法

频率

相位

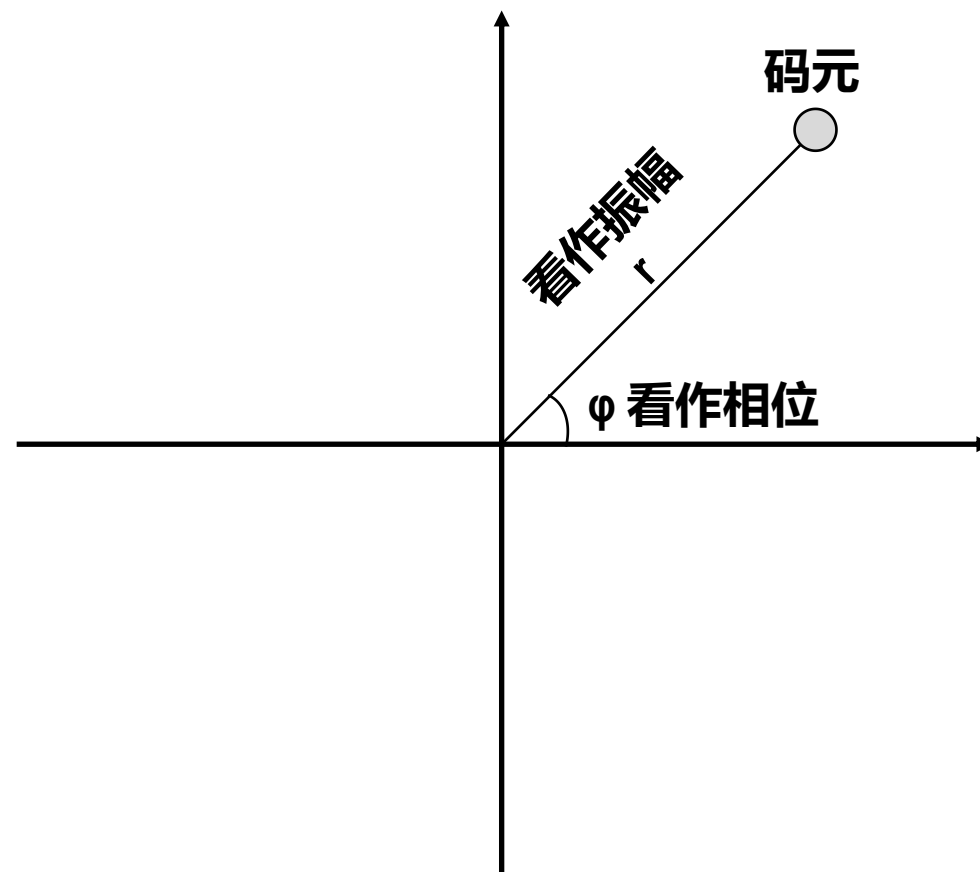
振幅

通常情况下，载波的相位和振幅可以结合起来一起调制，例如**正交振幅调制QAM**。

### 03 基本的带通调制方法和混合调制方法

#### 混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选



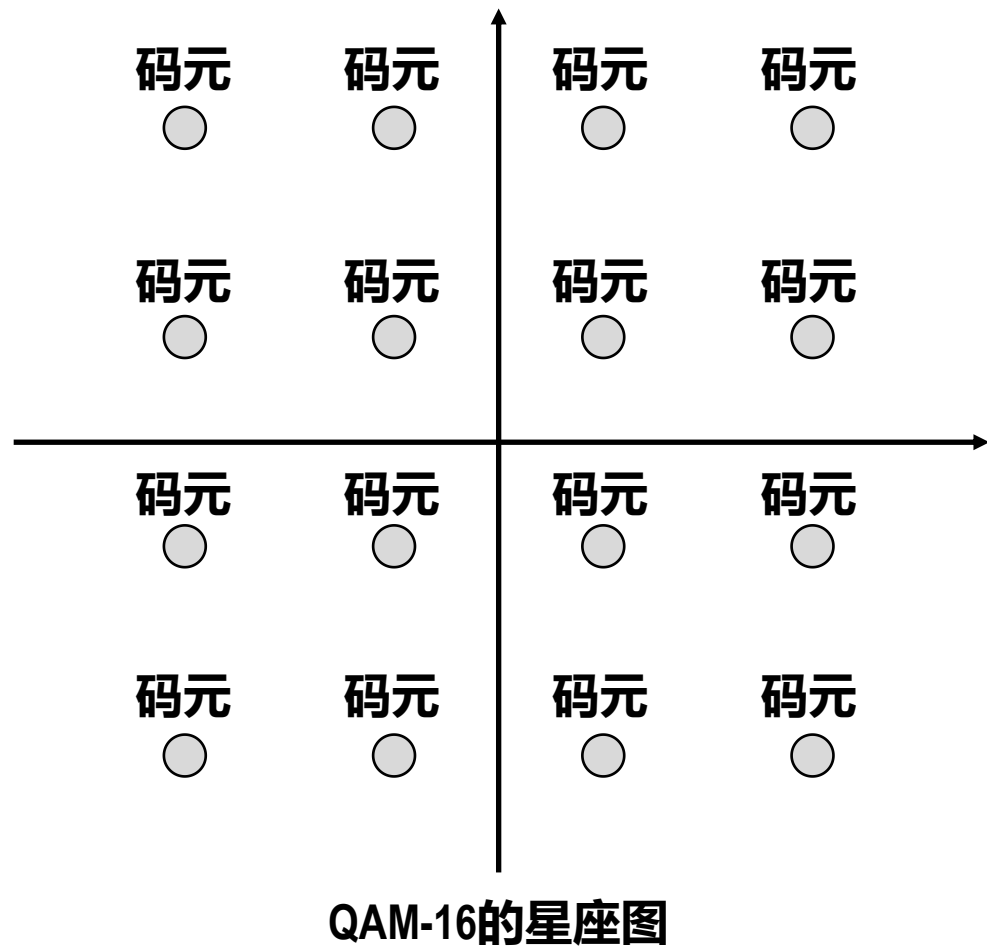
QAM-16的星座图

### 03 基本的带通调制方法和混合调制方法

#### 混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）

每个码元可以包含几个比特呢？





### 03 基本的带通调制方法和混合调制方法

#### 混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）

#### 类比举例：

两种手势（码元）

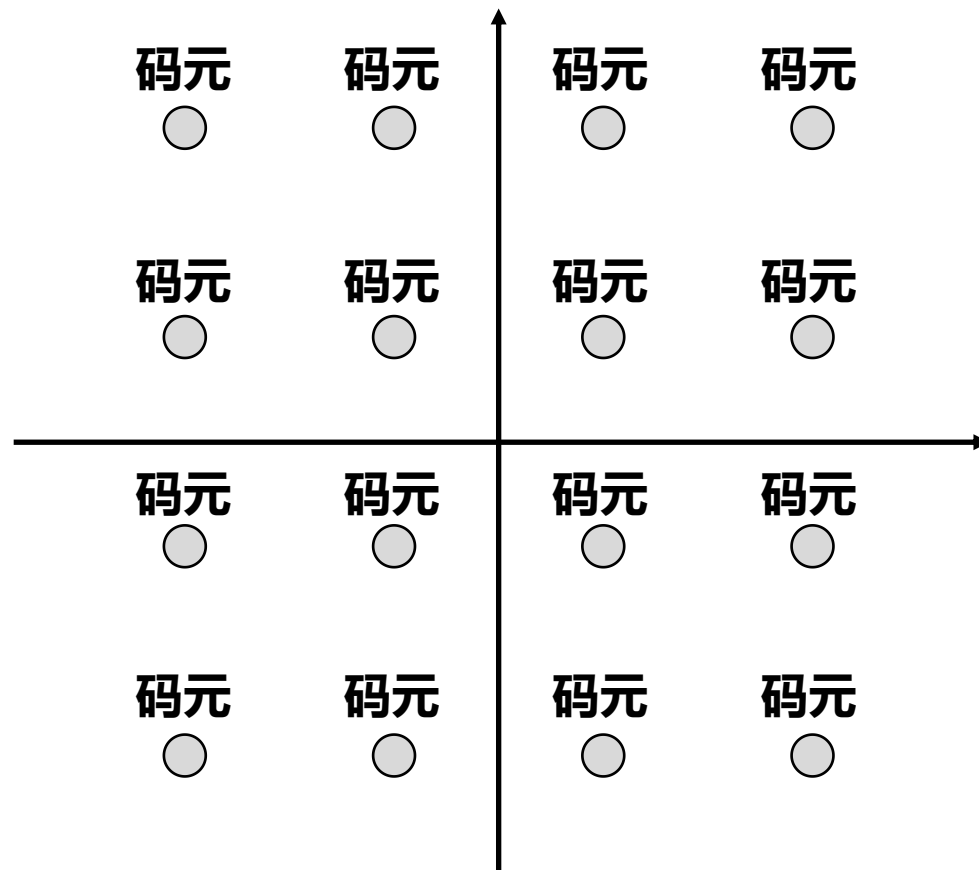


0



1

手势（码元）数量为2，则每种手势（码元）可表示的比特数量为 $\log_2 2=1$ 。



QAM-16的星座图

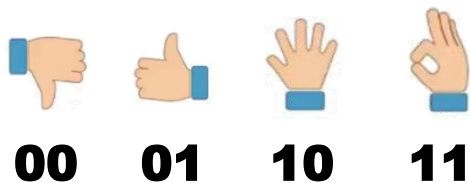
### 03 基本的带通调制方法和混合调制方法

#### 混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

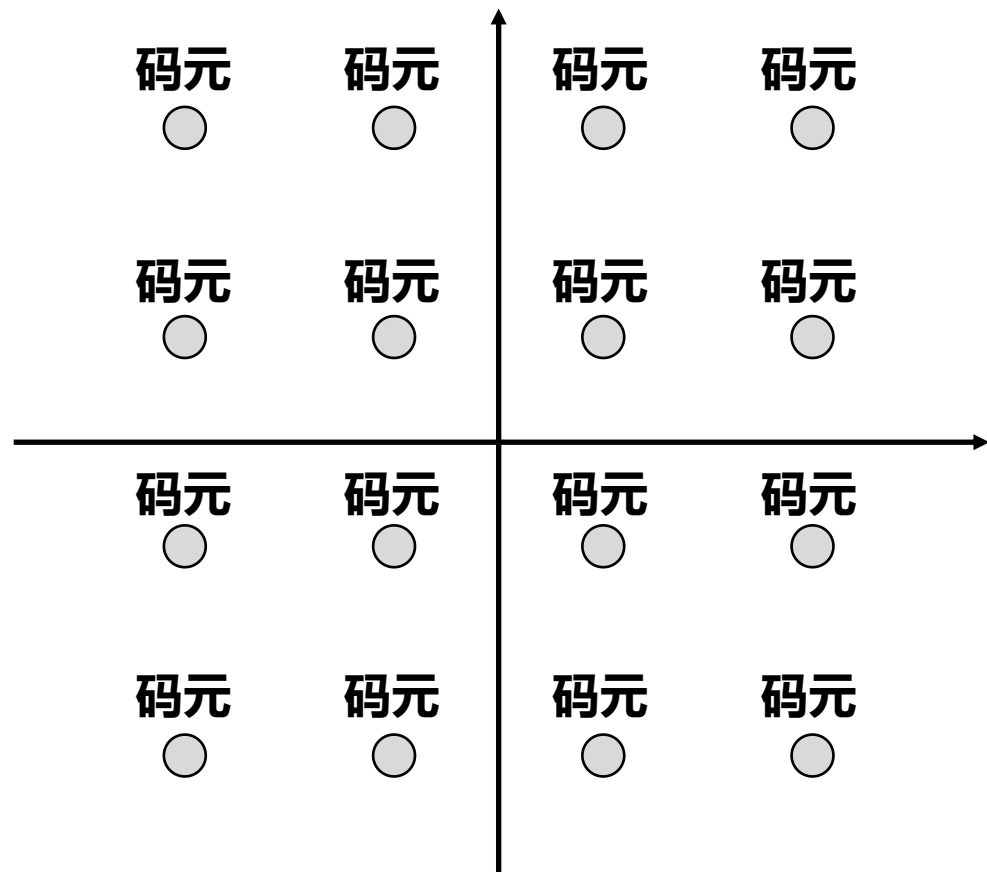
- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）

#### 类比举例：

四种手势（码元）



手势（码元）数量为4，则每种手势（码元）可表示的比特数量为 $\log_2 4=2$ 。



QAM-16的星座图

## 2.5 信道的极限容量

01

造成信号失真的主要因素

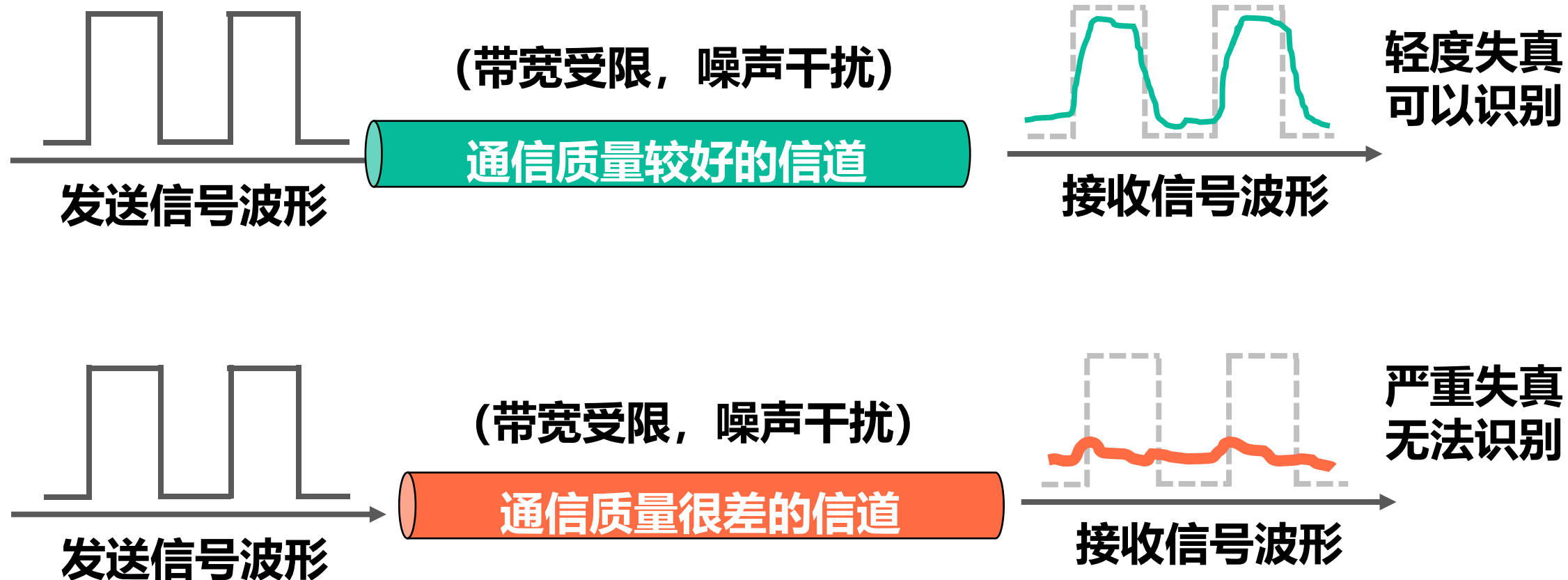
02

奈氏准则

03

香农公式

## 01 造成信号失真的主要因素



## 01 造成信号失真的主要因素

传输速率越高，信号经过传输后的失真就越严重。

码元的传输速率

传输距离越远，信号经过传输后的失真就越严重。

信号的传输距离

噪声干扰越大，信号经过传输后的失真就越严重。

噪声干扰

传输媒体质量越差，信号经过传输后的失真就越严重。

传输媒体的质量

## 02 奈氏准则

**理想低通信道的最高码元传输速率 =  $2W$  Baud =  $2W$  码元/秒**

**W**: 信道的频率带宽 (单位为Hz)

**Baud**: 波特, 即码元/秒



奈奎斯特 (1889-1976)

- 使用奈氏准则给出的公式, 就可以根据信道的频率带宽, 计算出信道的最高码元传输速率。
- 只要码元传输速率不超过根据奈氏准则计算出的上限, 就可以避免码间串扰。
- 奈氏准则给出的是理想低通信道的最高码元传输速率, 它和实际信道有较大的差别。因此, 一个实际的信道所能传输的最高码元传输速率, 要明显低于奈氏准则给出的上限值。

## 02 奈氏准则

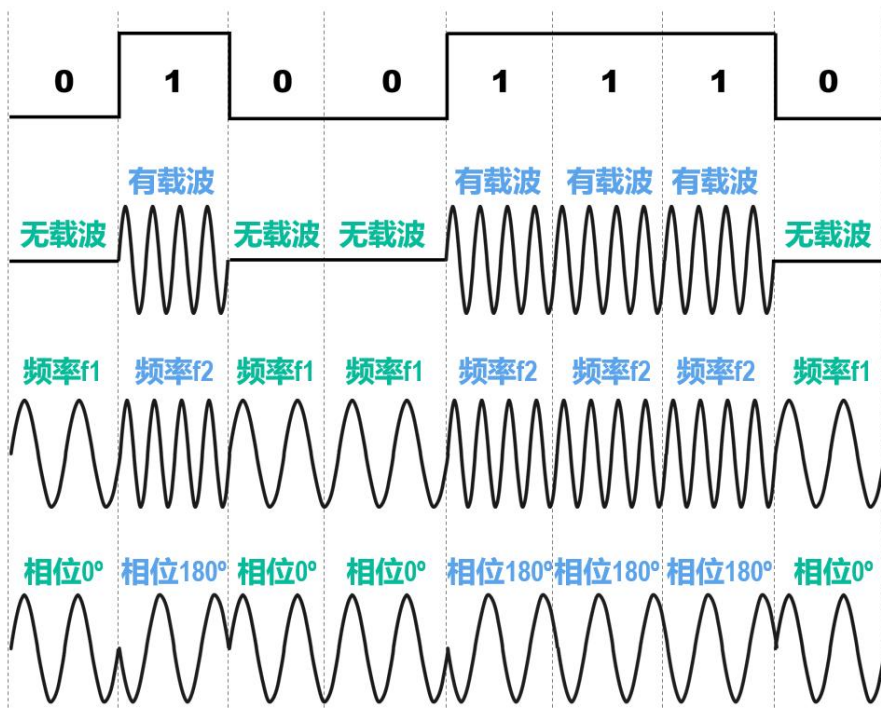
■ 码元传输速率又称为波特率、调制速率、波形速率或符号速率。

■ 波特率与比特率有一定的关系：

□ 当1个码元只携带1比特的信息量时，波特率（码元/秒）与比特率（比特/秒）在数值上是相等的。

□ 当1个码元携带n比特的信息量时，波特率（码元/秒）转换成比特率（比特/秒）时，数值要乘以n。

### 基本调制方法 数字基带信号



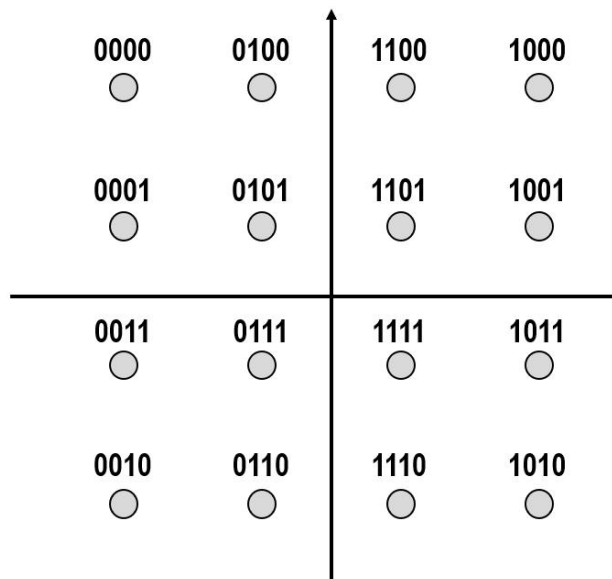
调幅 (AM)

调频 (FM)

调相 (PM)

### 混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特 ( $\log_2 16=4$ )
- 每个码元与4个比特的对应关系采用格雷码，即任意两个相邻码元只有1个比特不同



QAM-16的星座图

## 奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率为  
 **$2W$  码元/秒**

## 香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的  
极限信息传输速率  $C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$

【2009年 题34】在无噪声情况下，若某通信链路的带宽为3kHz，采用4个相位，每个相位具有4种振幅的QAM调制技术，则该通信链路的最大数据传输速率是（**B**）。

A. 12kbps

B. 24kbps

C. 48kbps

D. 96kbps

## 解析

1. 根据奈氏准则，该通信链路的最高码元传输速率 =  $2 \times 3k = 6k$ （码元/秒）
2. 采用4个相位，每个相位4种振幅的QAM调制技术，可以调制出  $4 \times 4 = 16$ 个不同的基本波形（码元）  
采用二进制对这16个不同的码元进行编码，需要使用4个比特（ $\log_2 16 = 4$ ）。  
即每个码元可以携带的信息量为4个比特。

综合1和2可知，该通信链路的最大数据传输速率 =  $6k$ （码元/秒） $\times 4$ （比特/码元）=  $24k$ （比特/秒）= 24kbps



## 奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率为  
 $2W$  码元/秒

## 香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的  
极限信息传输速率  $C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$

【2011年 题34】若某通信链路的数据传输速率为2400bps，采用4相位调制，则该链路的波特率是（**B**）。

A. 600波特

B. 1200波特

C. 4800波特

D. 9600波特

## 解析

1. 采用4相位调制，可以调制出4个相位不同的基本波形（码元）。  
采用二进制对这4个不同的码元进行编码，需要使用2个比特（ $\log_2 4 = 2$ ）。  
即每个码元可以携带的信息量为2个比特。
2. 数据的传输速率 = 波特率（码元传输速率）× 每个码元所携带的信息量  
 $2400 \text{ (比特/秒)} = \text{波特率} \times 2 \text{ (比特/码元)}$   
 $\text{波特率} = 1200 \text{ (码元/秒)} = 1200 \text{ 波特}$

## 02 奈氏准则



尽管奈氏准则限制了最高码元传输速率，但是只要采用技术更为复杂的信号调制方法，让码元可以携带更多的比特，岂不是可以无限制地提高信息的传输速率吗？

回答是否定的。因为在实际的信道中会有噪声，噪声是随机产生的，其瞬时值有时会很大，这会影响接收端对码元的识别，并且噪声功率相对于信号功率越大，影响就越大。



## 03 香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的极限信息传输速率

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

**C**: 信道的极限信息传输速率 (单位为**b/s**)

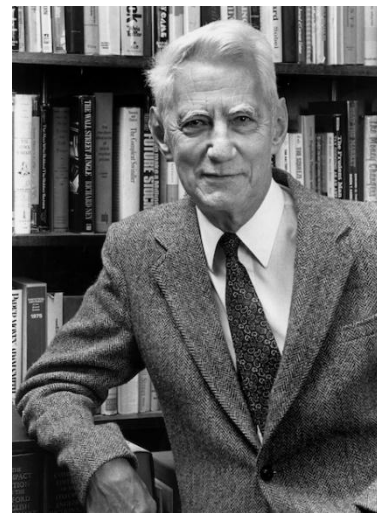
**W**: 信道的频率带宽 (单位为**Hz**)

**S**: 信道内所传信号的平均功率

**N**: 信道内的高斯噪声功率

**S/N**: 信噪比, 使用分贝 (**dB**) 作为度量单位

$$\text{信噪比 (dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{S}{N} \right) \text{ (dB)}$$

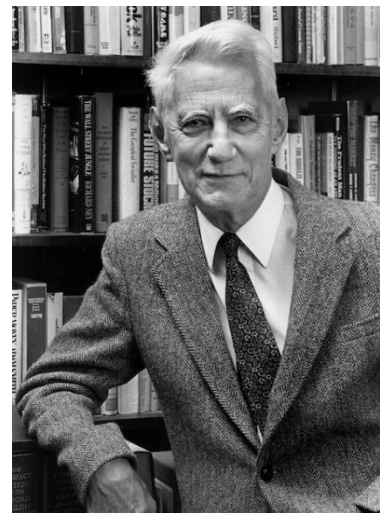


香农 (1916-2001)

### 03 香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的极限信息传输速率

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



香农 (1916-2001)

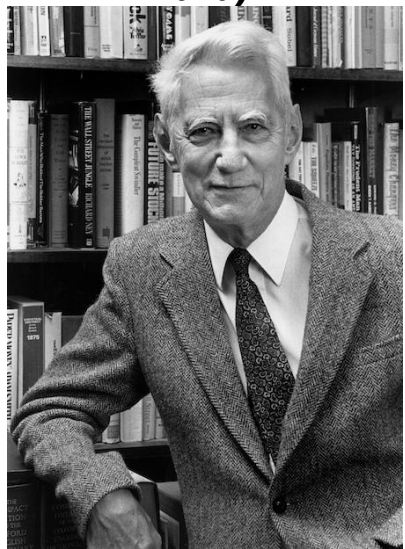
- 信道的频率带宽W或信道中的信噪比S/N越大，信道的极限信息传输速率C就越高。
- 实际信道不可能无限制地提高频率带宽W或信道中的信噪比S/N。
- 实际信道中能够达到的信息传输速率，要比香农公式给出的极限传输速率低不少。这是因为在实际信道中，信号还要受到其他一些损伤，例如各种脉冲干扰和信号衰减等，这些因素在香农公式中并未考虑。



奈奎斯特 (1889-1976)

**理想低通信道的最高码元传输速率**

$$= 2W \text{ Baud} = 2W \text{ 码元/秒}$$



香农 (1916-2001)

**带宽受限且有高斯白噪声干扰的**

**信道的极限信息传输速率**

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

在信道的频率带宽 $W$ 一定的情况下，根据奈氏准则和香农公式，要想**提高信息的传输速率**，就必须采用**多元制**（更复杂的调制技术），并努力**提高信道中的信噪比**。

自从香农公式发表后，各种**新的信号处理和调制方法**就不断出现，其目的都是为了使码元可以携带更多个比特，进而可以尽可能地**接近香农公式给出的传输速率极限**。

## 奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率为  
 **$2W$  码元/秒**

## 香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的  
极限信息传输速率  $C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$

【2016年 题34】若某链路的频率带宽为8kHz，信噪比为30dB，该链路实际数据传输速率约为理论最大数据传输速率的50%，则该链路的实际数据传输速率约是（**C**）。

A. 8kbps

B. 20kbps

C. 40kbps

D. 80kbps

## 解析

根据香农公式可计算出理论最大数据传输速率  $C = 8k \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$

$$30(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{S}{N} \right) (dB) \quad \text{解得} \quad \frac{S}{N} = 1000 \quad \text{代入上式}$$

$$C = 8k \cdot \log_2 (1 + 1000) \approx 8k \cdot \log_2 (2^{10}) = 80kbps$$

该链路的实际数据传输速率约为  $C \times 50\% = 80kbps \times 50\% = 40kbps$

## 奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率为  
 **$2W$  码元/秒**

## 香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的  
极限信息传输速率  $C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$

【2017年 题34】若信道在无噪声情况下的极限数据传输速率不小于信噪比为30dB条件下的极限数据传输速率，则信号的状态数至少是（**D**）。

A. 4

B. 8

C. 16

D. 32

## 解析

设信号状态数（可调制出的不同基本波形或码元数量）为 $X$

则每个码元可携带的比特数量为 $\log_2 X$

信道在无噪声情况下的极限数据传输速率（用奈氏准则计算）=  $2W$ （码元/秒）=  $2W \log_2 X$ （比特/秒）

30dB信噪比条件下的极限数据传输速率（用香农公式计算）=  $W \log_2 (1+1000)$ （比特/秒）

根据题意列出不等式  $2W \log_2 X \geq W \log_2 (1+1000)$  解得  $X \geq 32$