

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

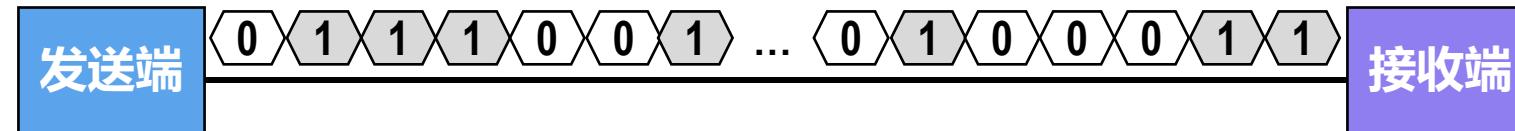
同步传输和异步传输

03

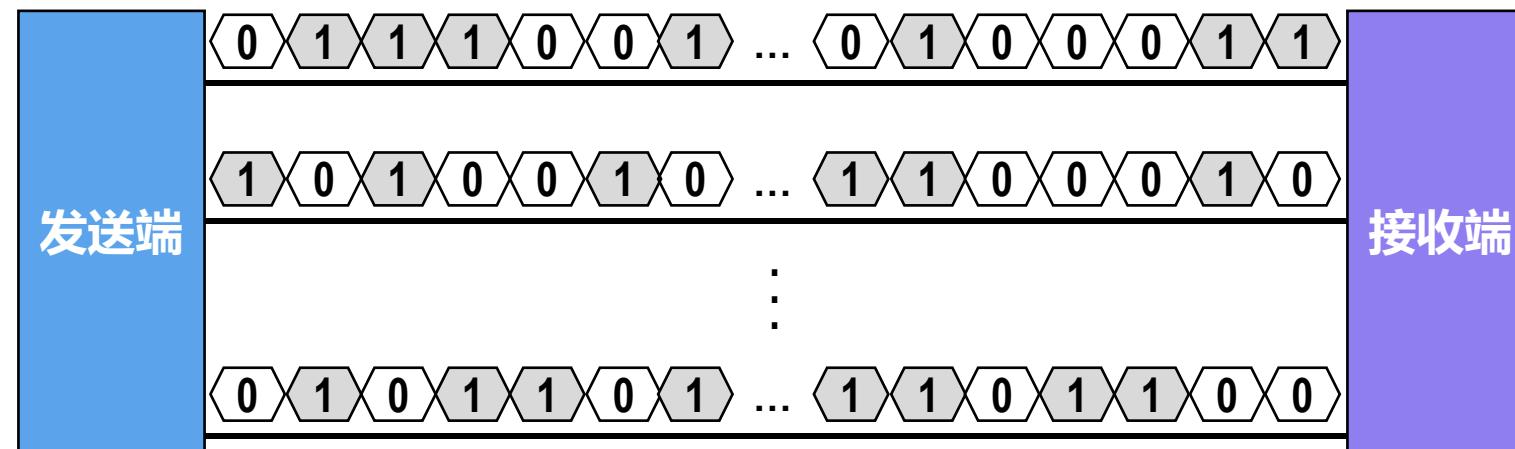
单向通信、双向交替通信和双向同时通信

01 串行传输和并行传输

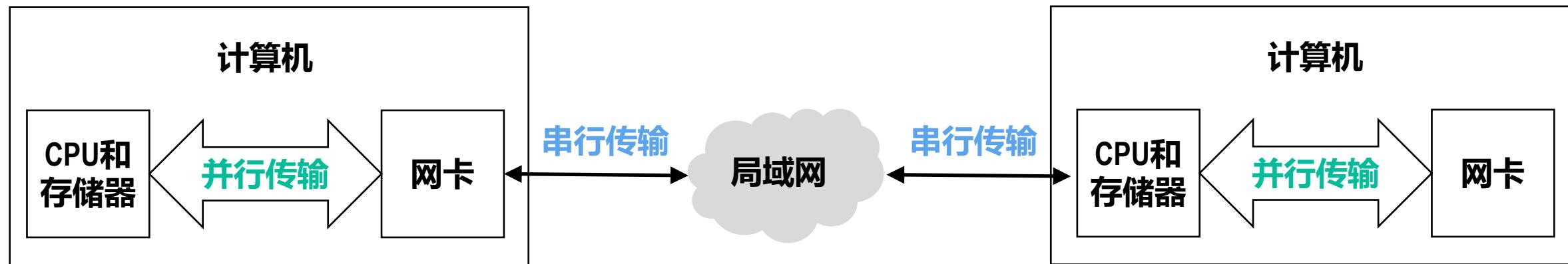
串行传输



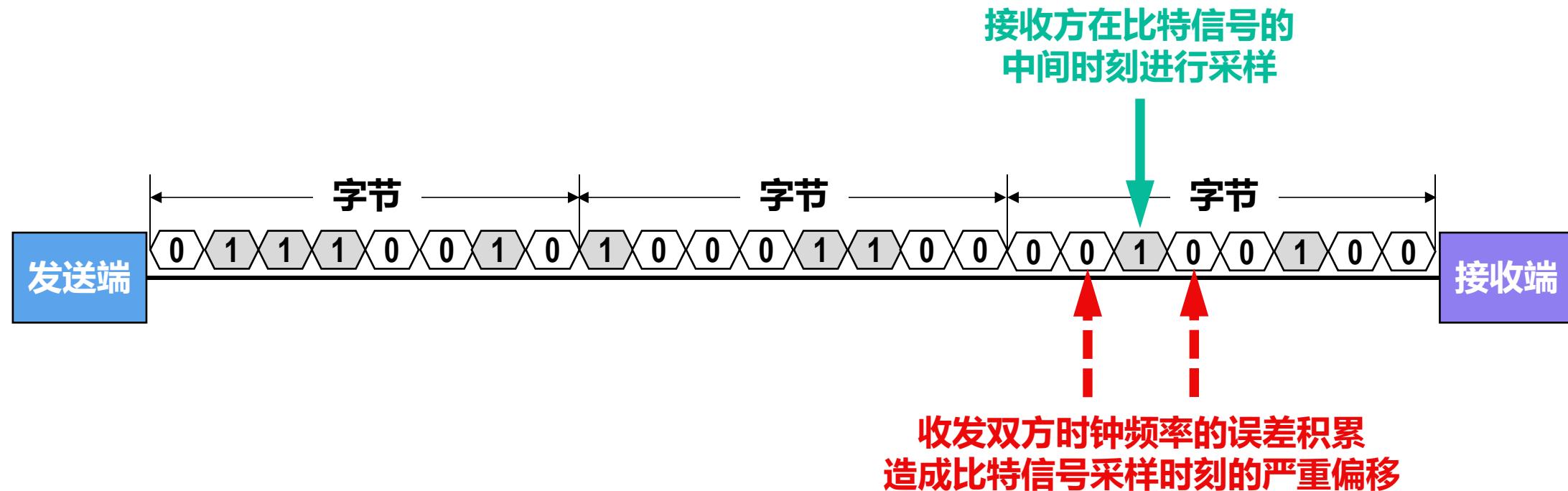
并行传输



01 串行传输和并行传输



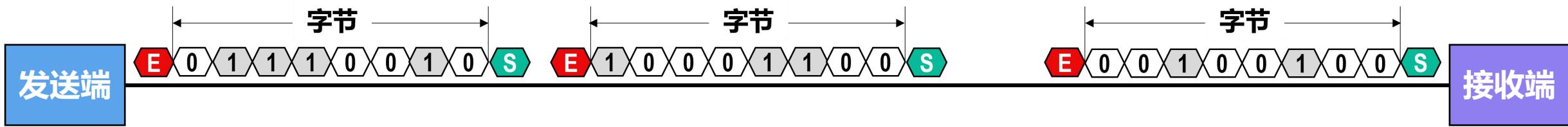
02 同步传输和异步传输



■ 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)



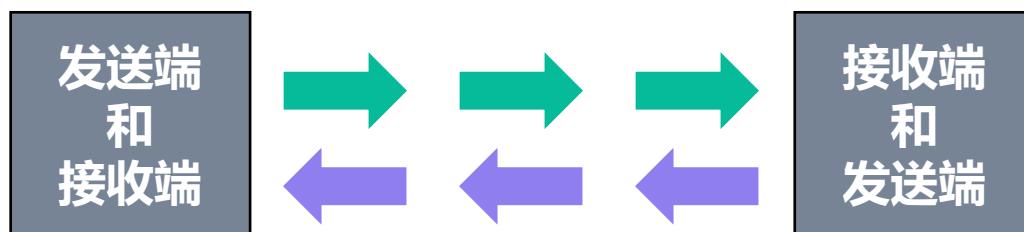
无线电广播

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



消息
message

二进制

数据
data

数据的
电磁表现

信号
signal

信源发出的
原始电信号

基带
信号



数字
基带信号

以太网
(曼彻斯特编码, 4B/5B, 8B/10B)

编 码

数字信道

调 制

模拟信道

WiFi

(CCK/DSSS/OFDM调制)

对音频信号进行编码的脉码调制PCM

编 码

数字信道

调 制

模拟信道

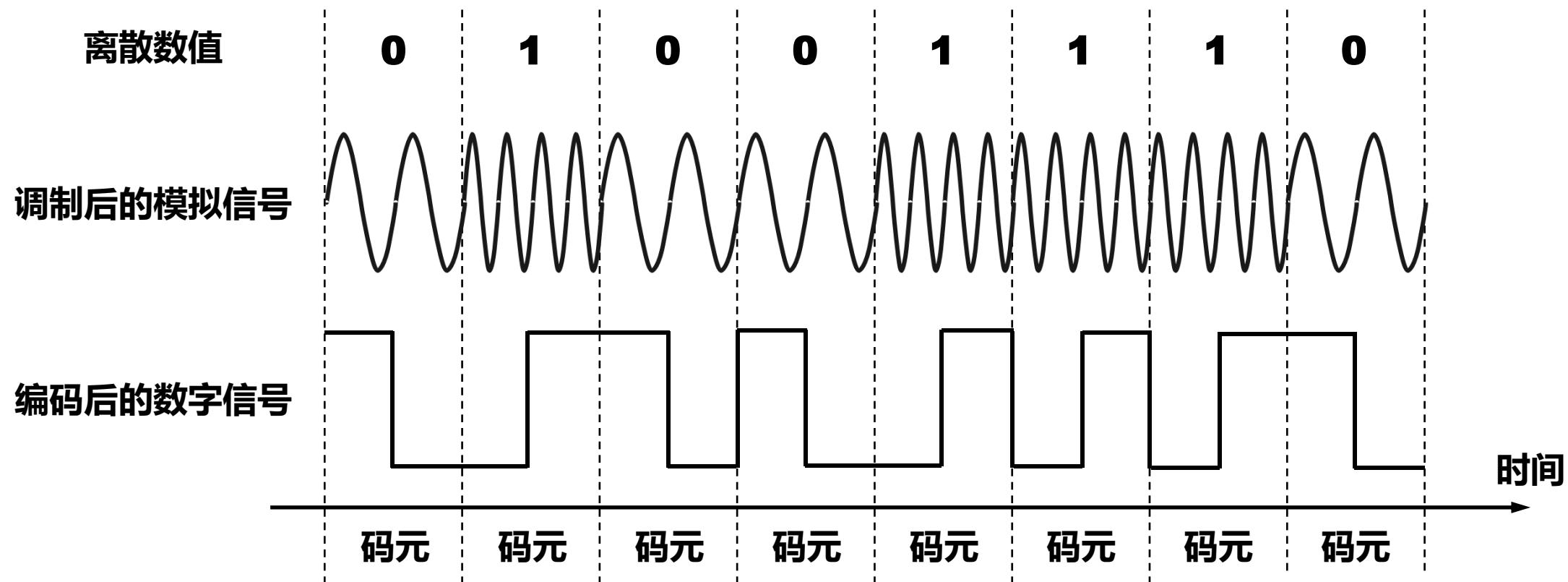


语音数据加载到模拟的载波信号中传输。
频分复用FDM技术，充分利用带宽资源。

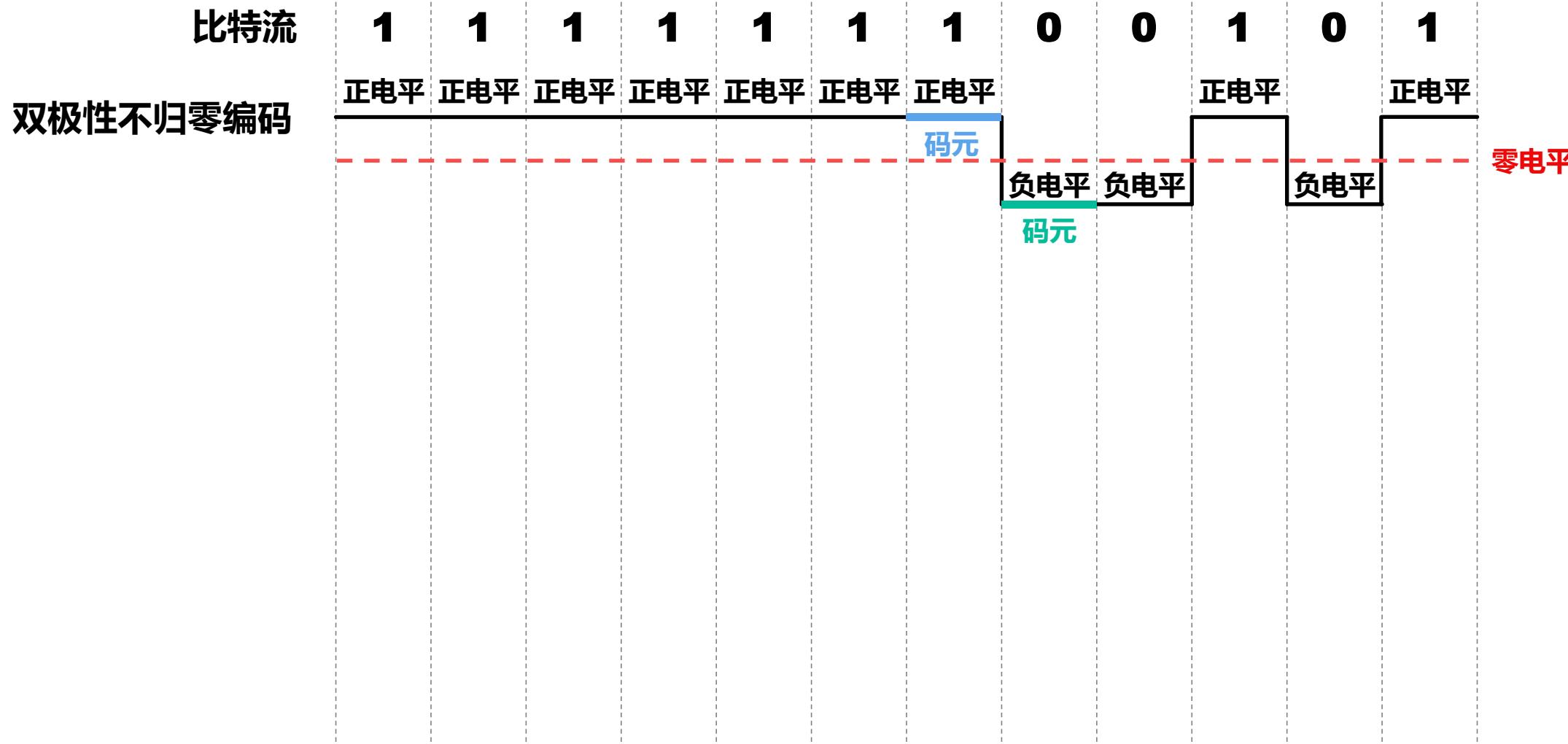
01 编码与调制的基本概念

■ 码元

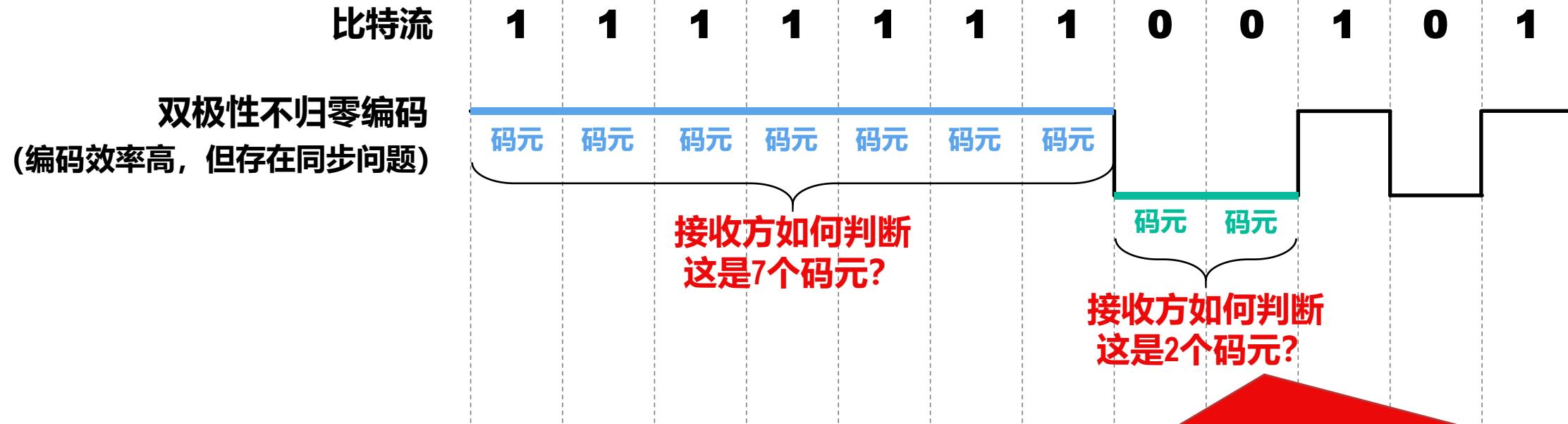
在使用时间域的波形表示信号时，代表不同离散数值的基本波形称为码元。



02 常用编码方式



02 常用编码方式



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。

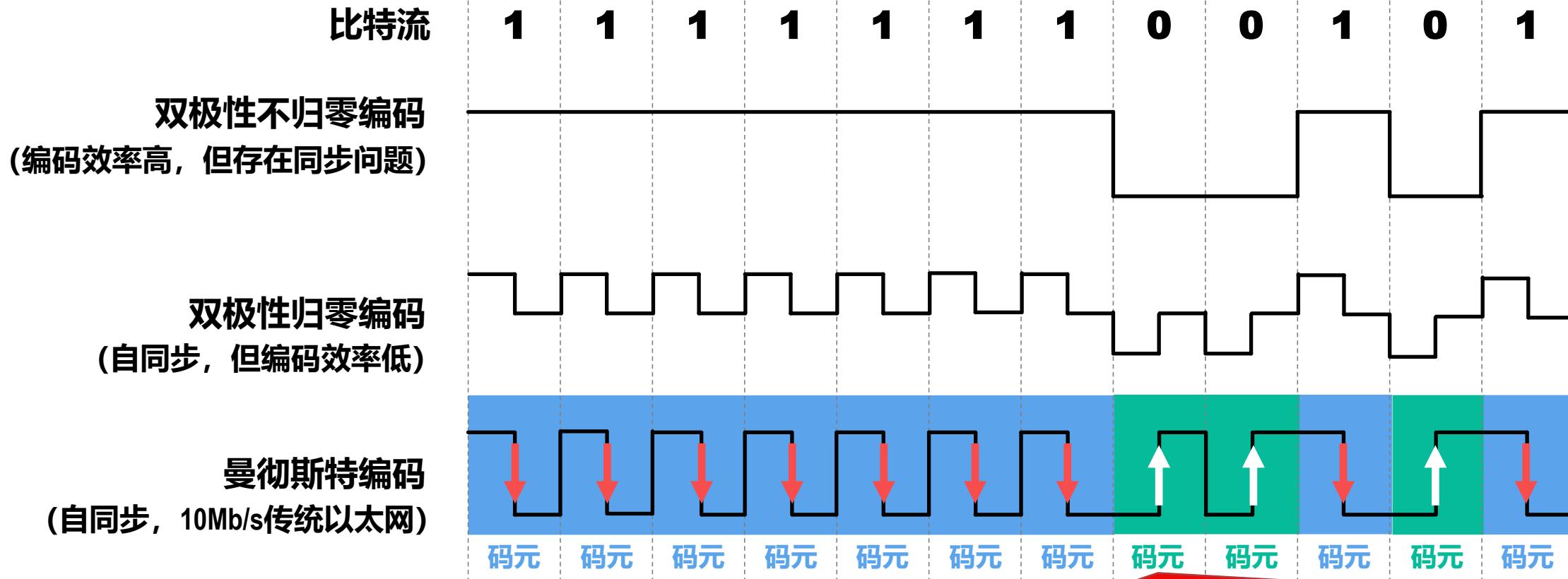
接收方按照接收到的时钟信号的节拍, 对数据信号线上的信号进行采样。

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

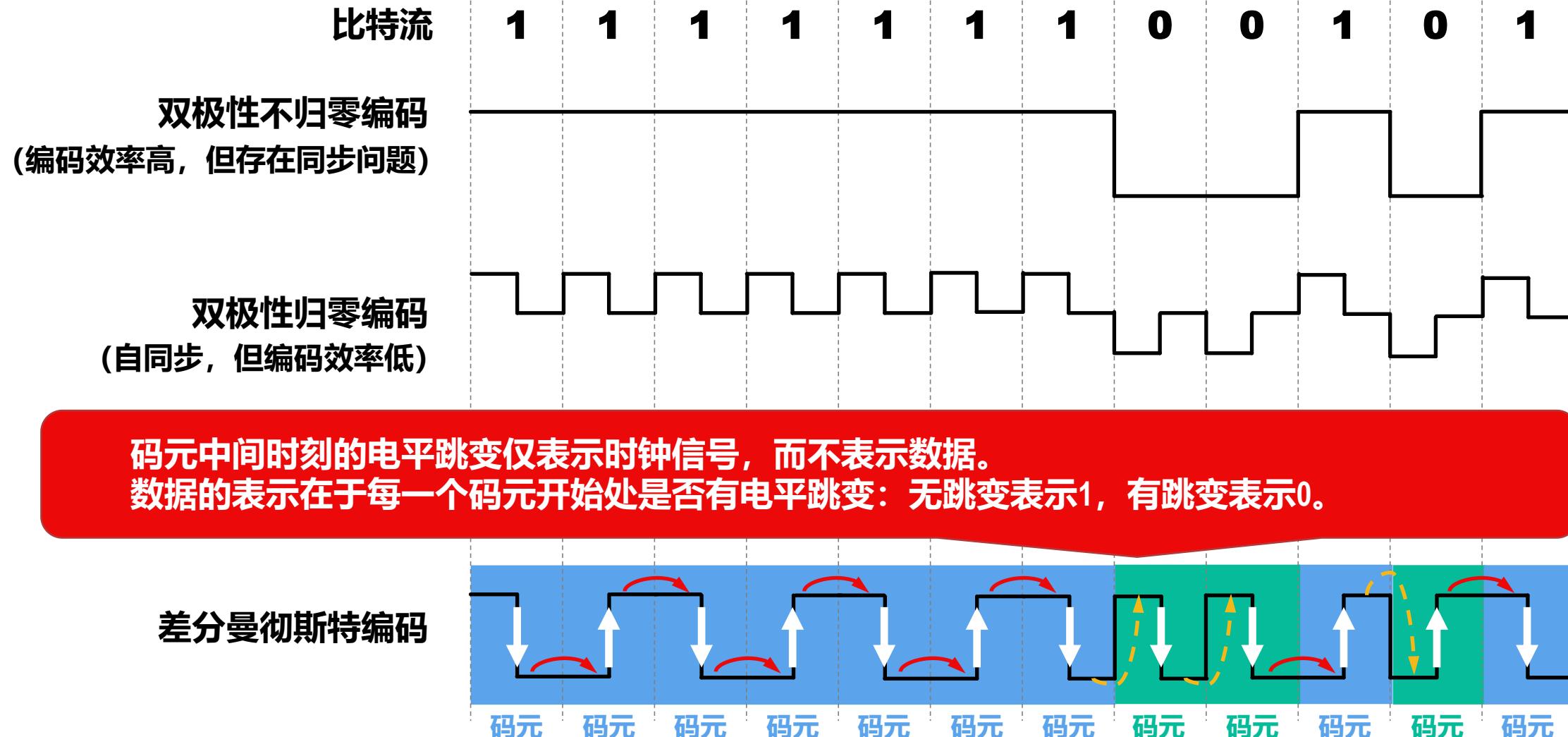


02 常用编码方式

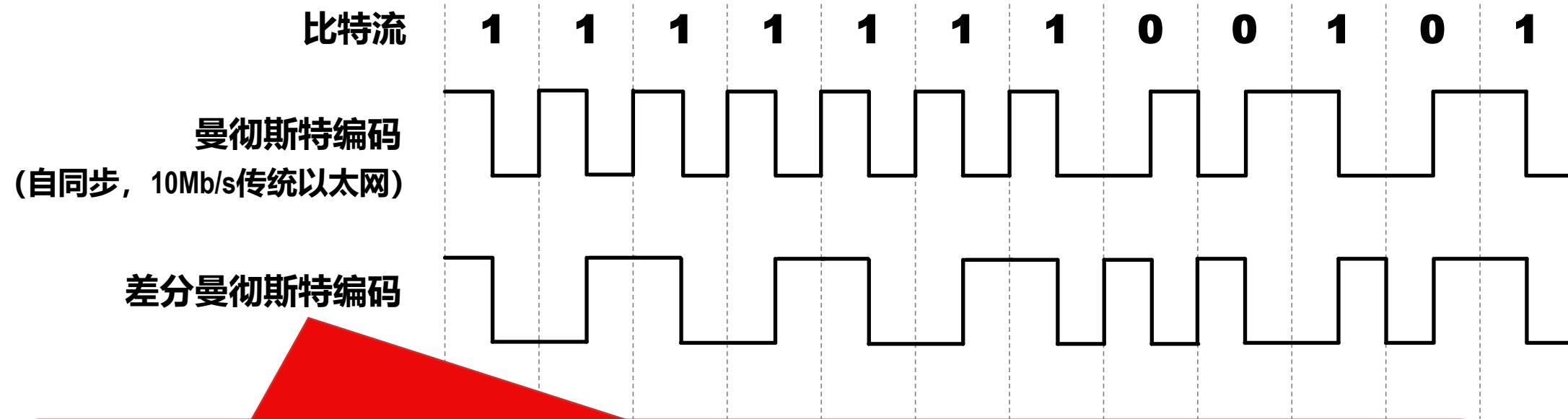


码元中间时刻的电平跳变既表示时钟信号，也表示数据。
正跳变表示1还是0，负跳变表示0还是1，可以自行定义。

02 常用编码方式



02 常用编码方式



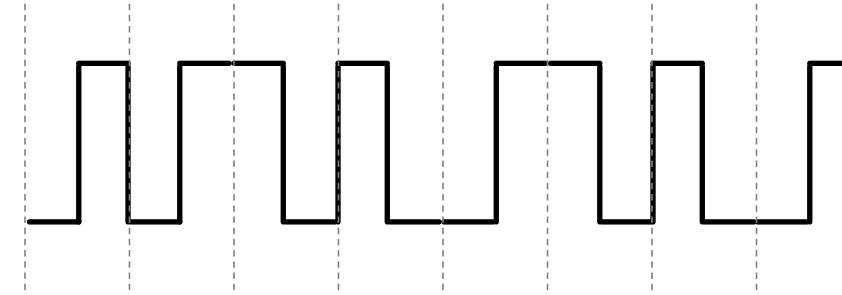
在传输大量连续1或连续0的情况下，差分曼彻斯特编码信号比曼彻斯特编码信号的变化少。

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

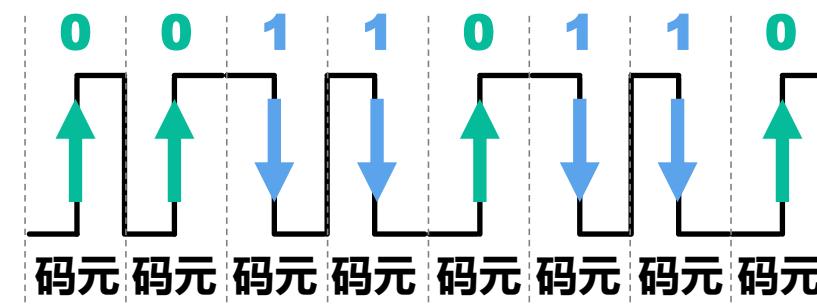
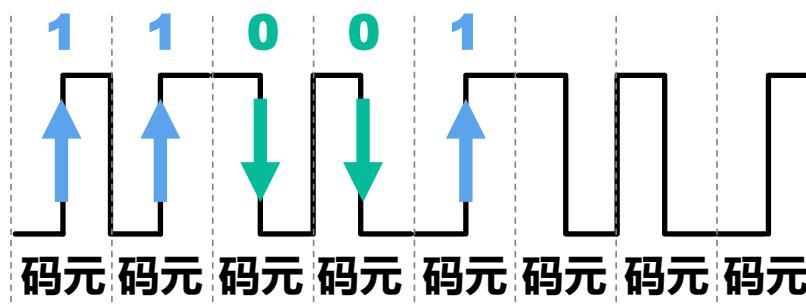
【2013年 题34】若下图为10BaseT网卡接收到的信号波形，则该网卡收到的比特串是（A）。



- A. 0011 0110 B. 1010 1101 C. 0101 0010 D. 1100 0101

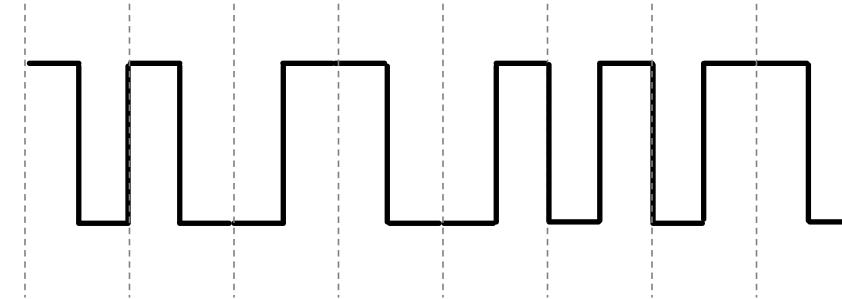
解析

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 常用编码方式

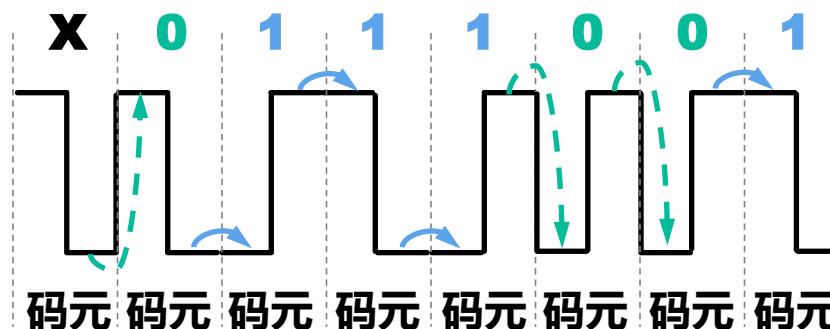
【2021年 题34】若下图为一段差分曼彻斯特编码信号波形，则其编码的二进制位串是（A）。



- A. 1011 1001 B. 1101 0001 C. 0010 1110 D. 1011 0110

解析

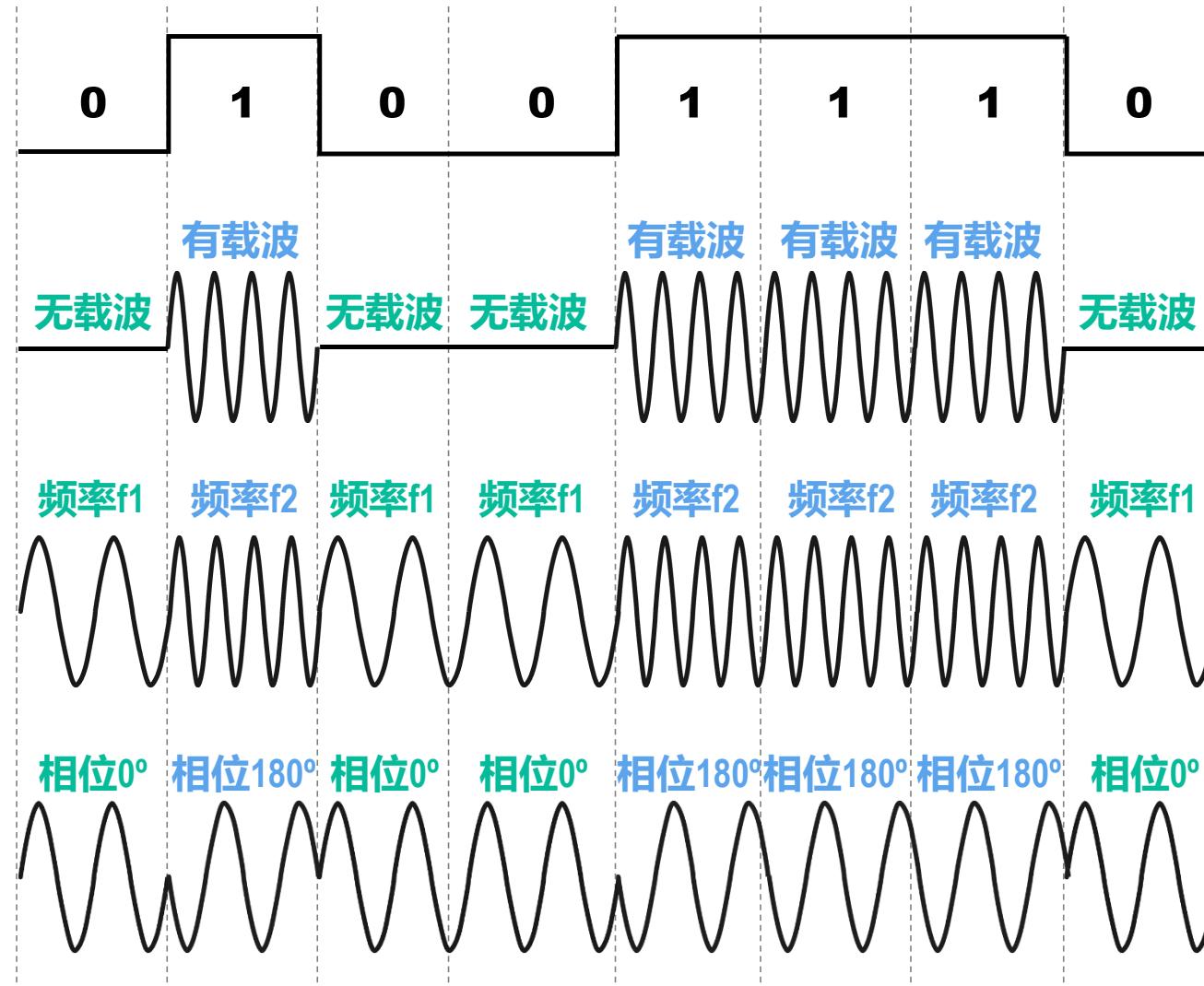
1. 码元中间时刻的电平跳变仅表示时钟信号，而不表示数据。
2. 数据的表示在于每一个码元开始处是否有电平跳变：无跳变表示1，有跳变表示0。



03

基本的带通调制方法和混合调制方法

数字基带信号



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

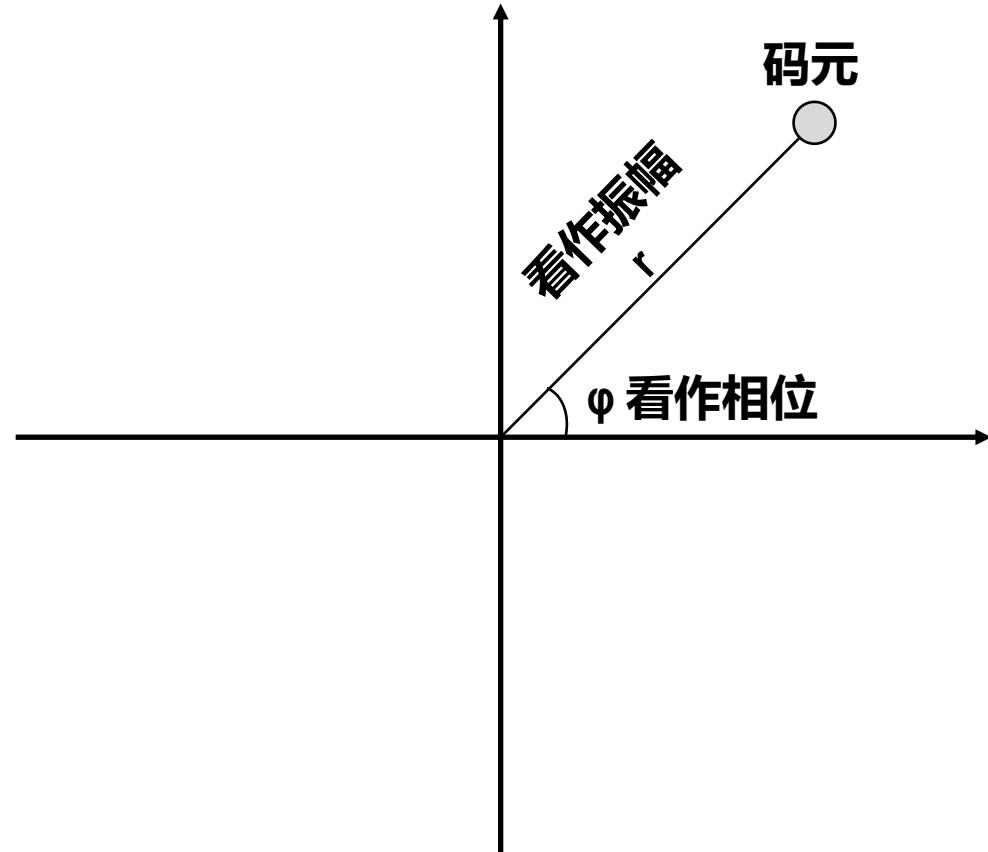
通常情况下，载波的相位和振幅可以结合起来一起调制，例如**正交振幅调制QAM**。

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

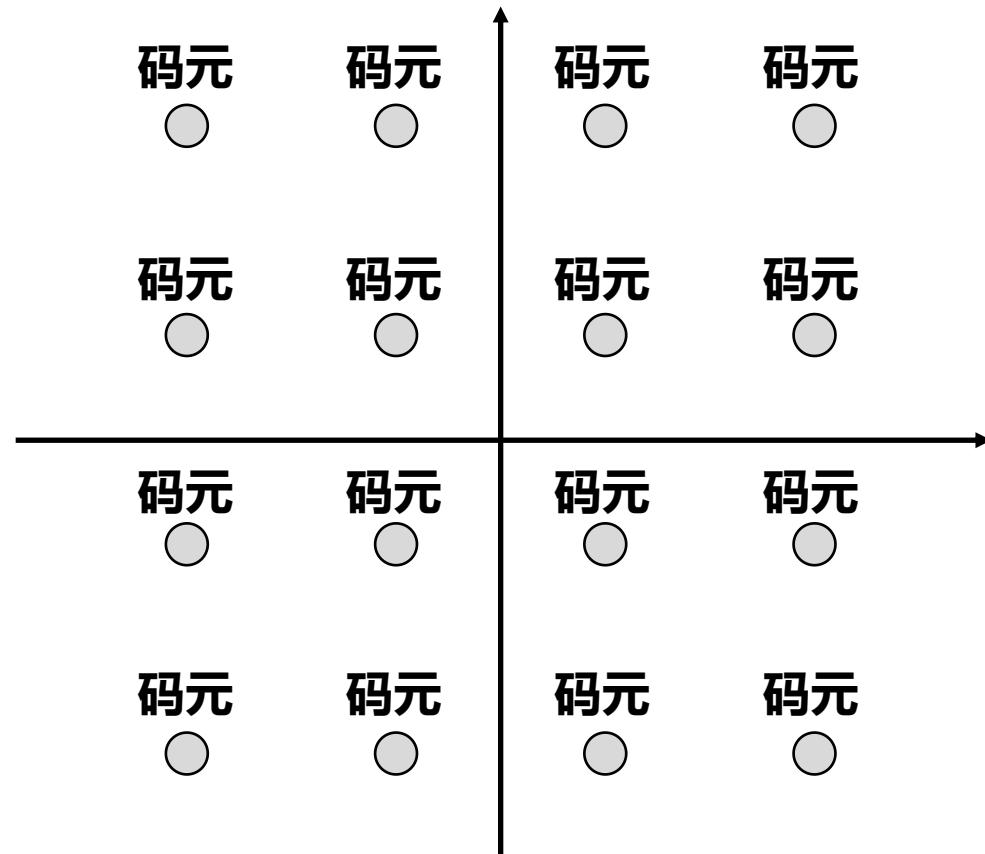


QAM-16的星座图

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 ($\log_2 16 = 4$)



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：

两种手势（码元）

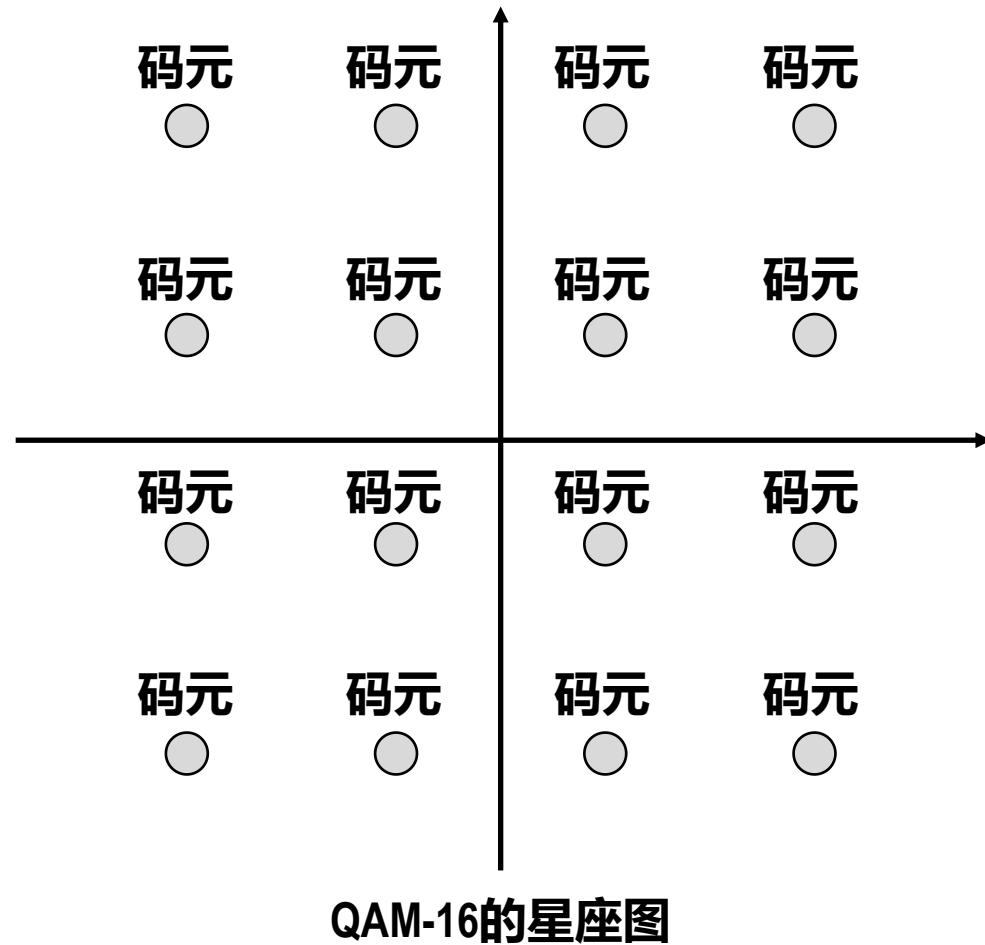


0



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 $\log_2 2 = 1$ 。



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 ($\log_2 16 = 4$)

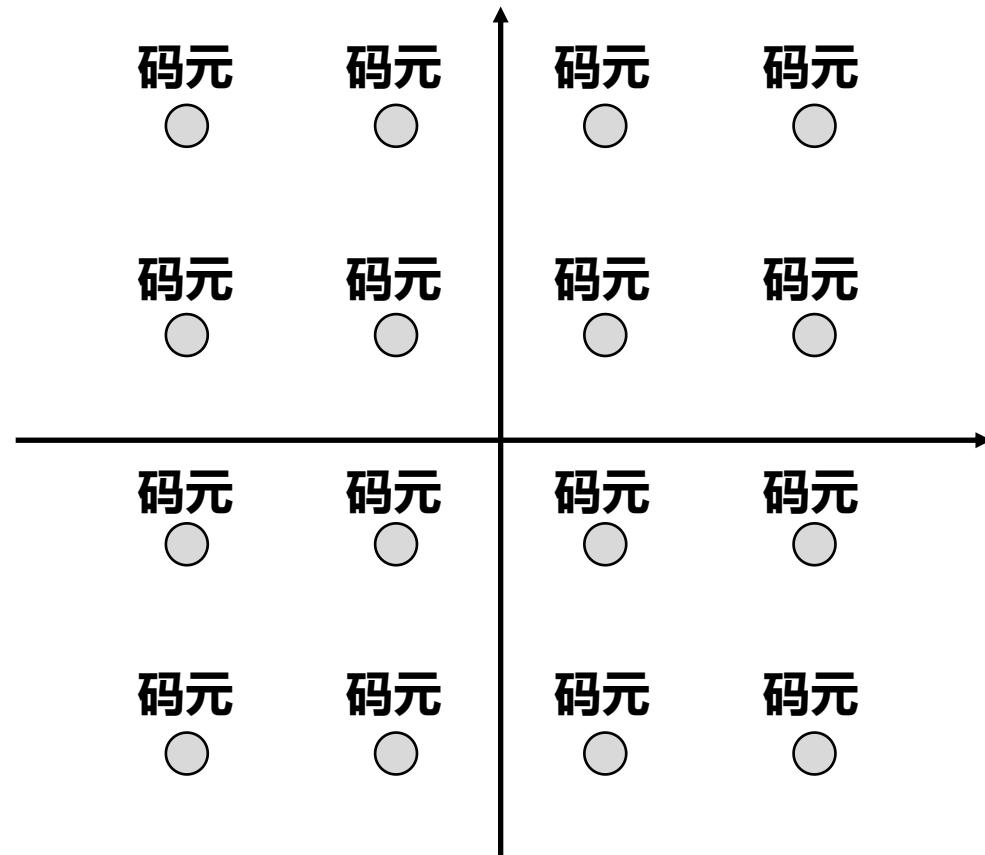
类比举例：

四种手势（码元）



00 01 10 11

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

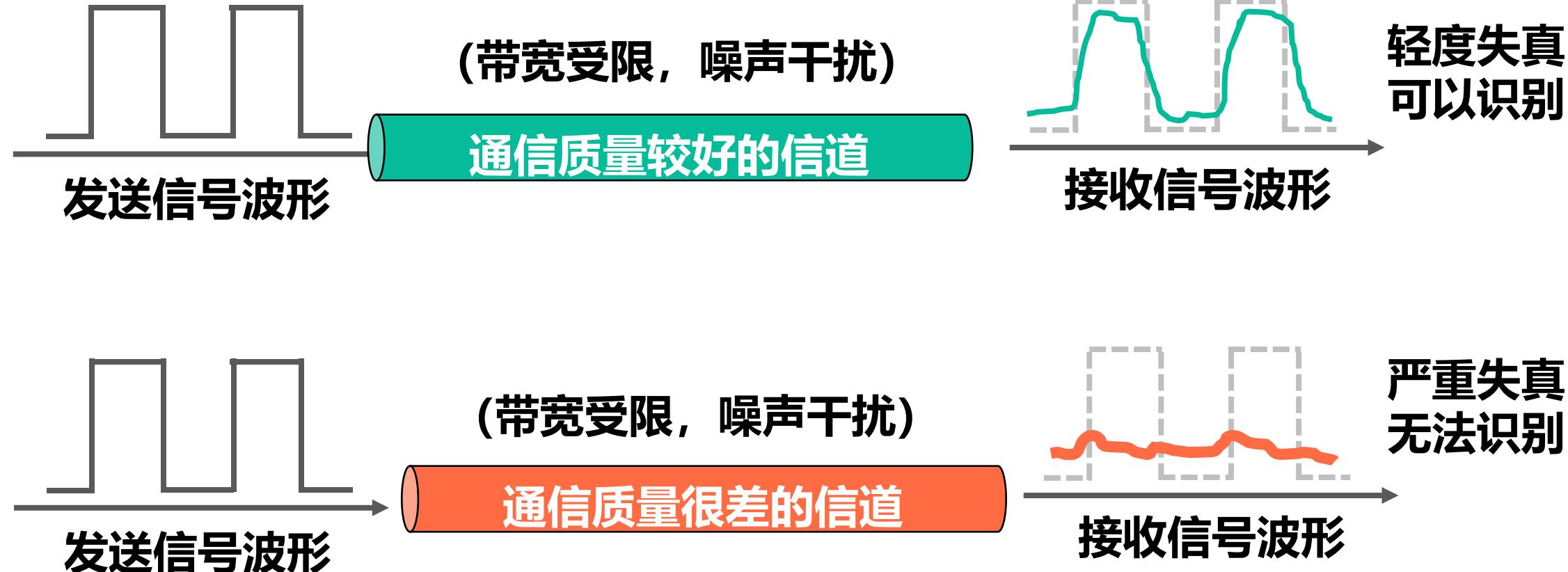
02

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

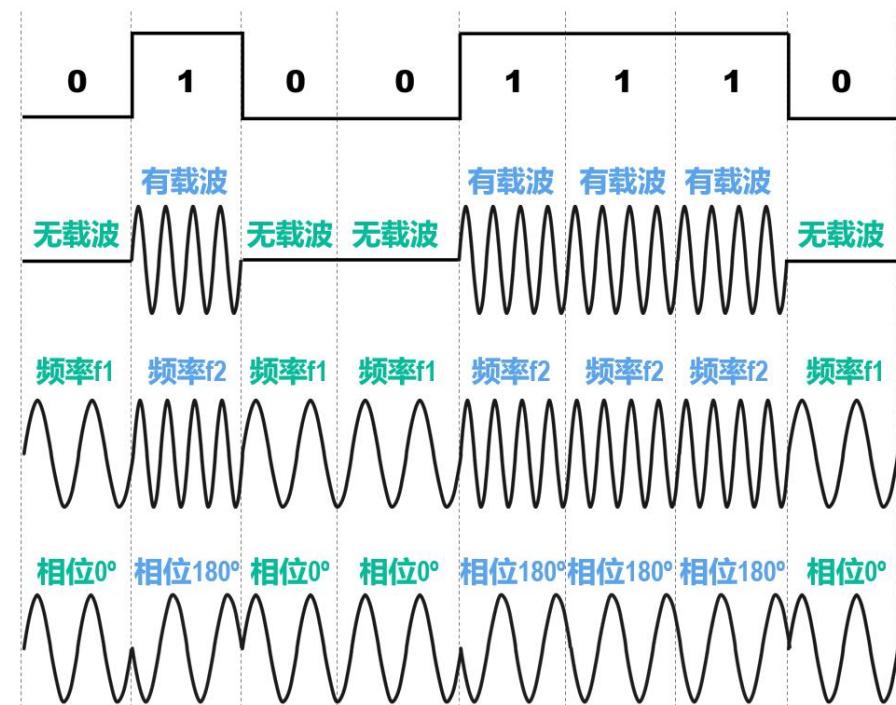
■ 码元传输速率又称为波特率、调制速率、波形速率或符号速率。

■ 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



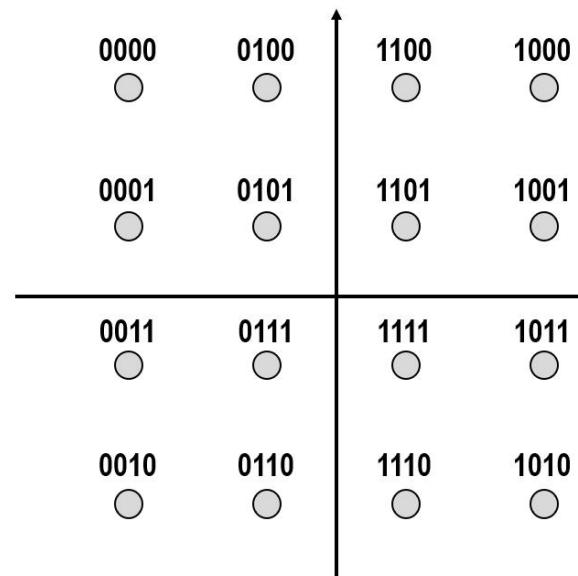
调幅 (AM)

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

- 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)
- 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） \times 每个码元所携带的信息量

$2400 \text{ (比特/秒)} = \text{波特率} \times 2 \text{ (比特/码元)}$

波特率 = 1200 (码元/秒) = 1200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。

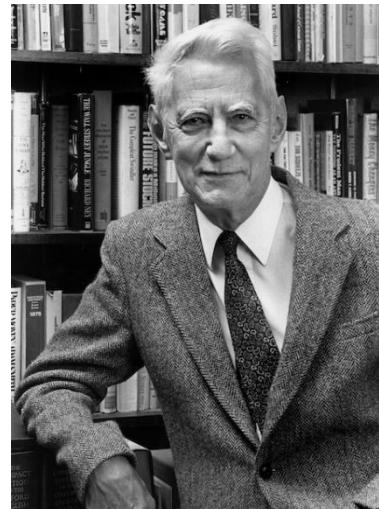


03 香农公式

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**)



香农 (1916-2001)

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

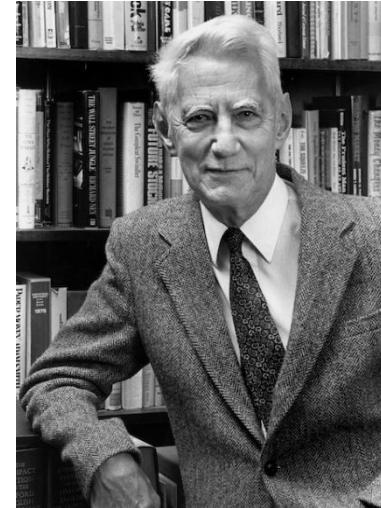
S/N: 信噪比, 使用分贝 (**dB**) 作为度量单位

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

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

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

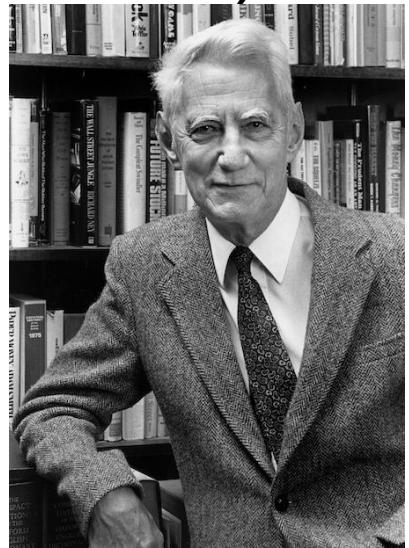


香农 (1916-2001)

- 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)



香农 (1916-2001)

理想低通信道的最高码元传输速率

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

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。

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

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

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 $C = 8k \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$

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

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

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

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 $X \geq 32$