

## 内 容

01

造成信号失真的主要因素

02

奈氏准则

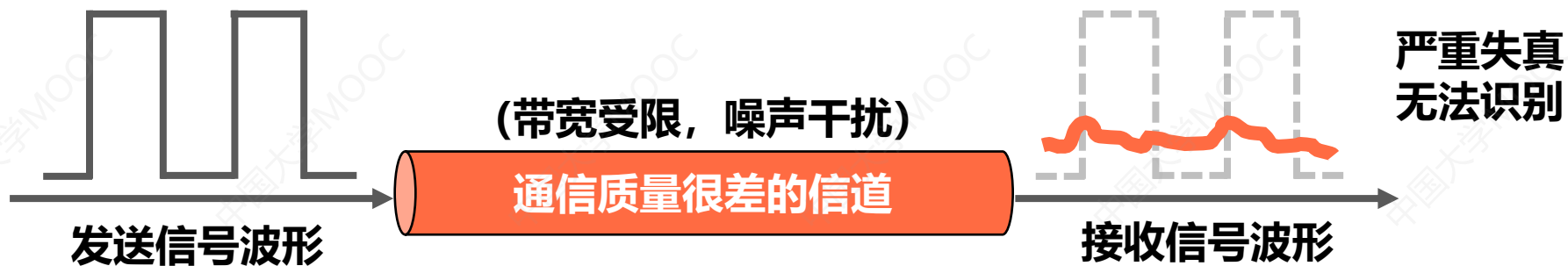
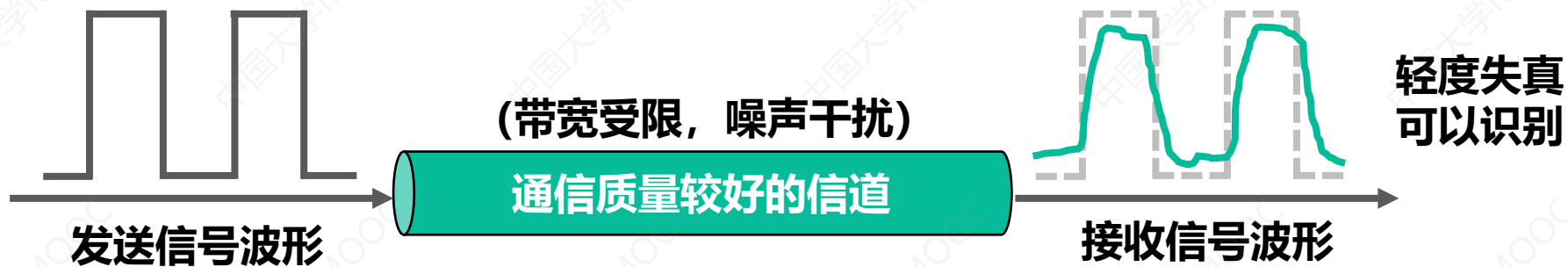
03

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。

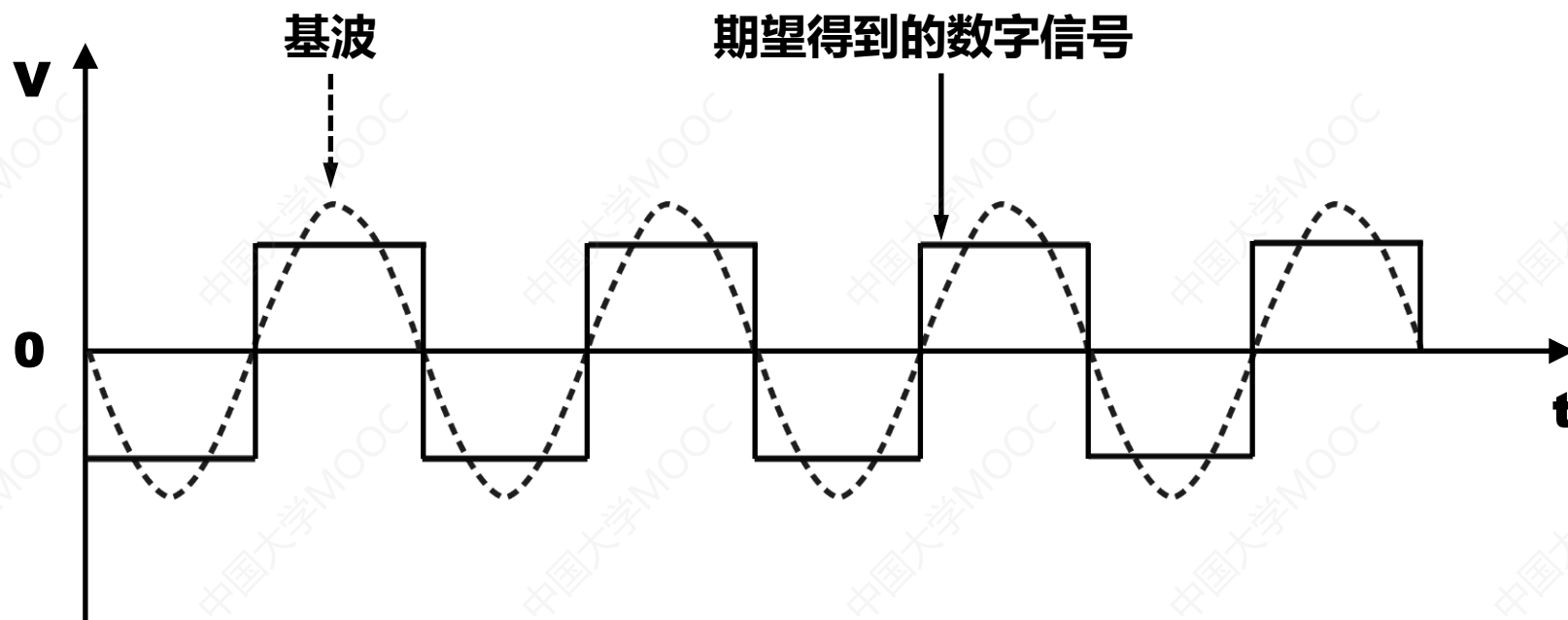
噪声干扰

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

## 01 造成信号失真的主要因素

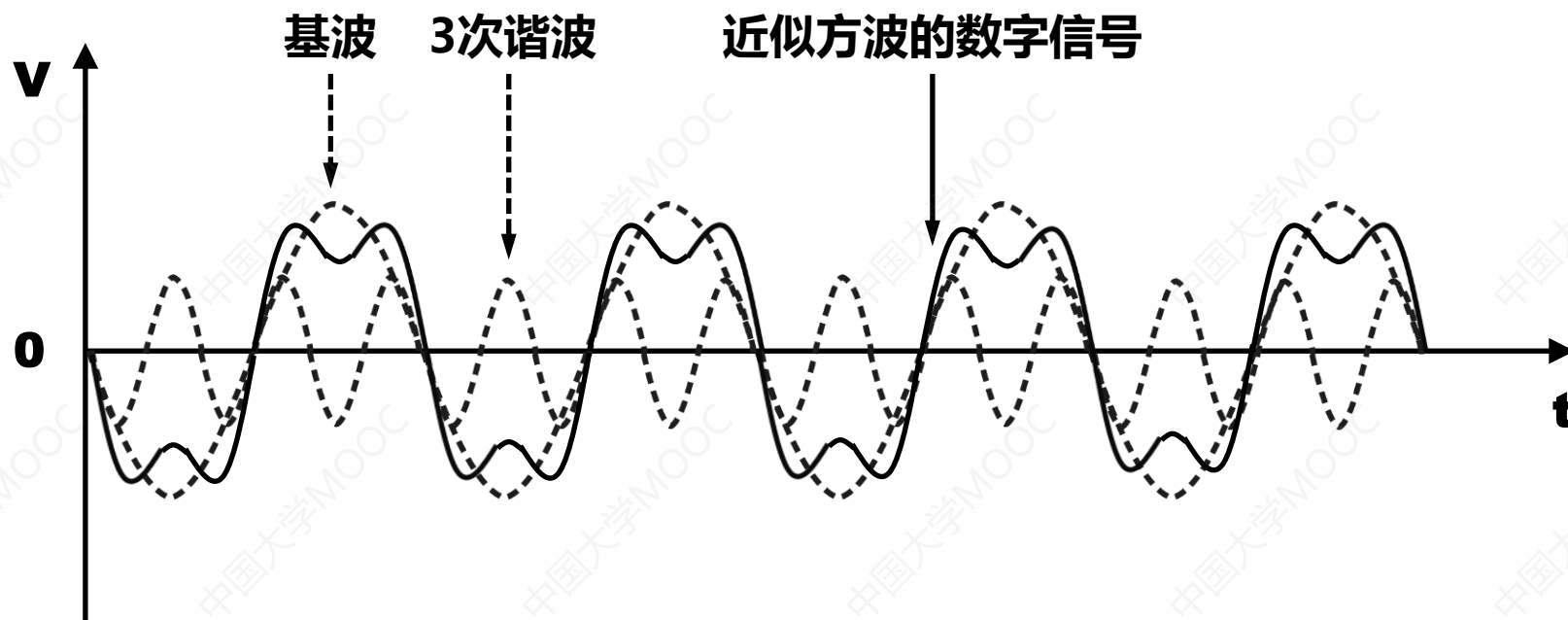
■ 信道上传输的**数字信号**，可以看做是**多个频率的模拟信号进行多次叠加后形成的方波**。



选择一个与数字信号频率相同的模拟信号作为基波

## 01 造成信号失真的主要因素

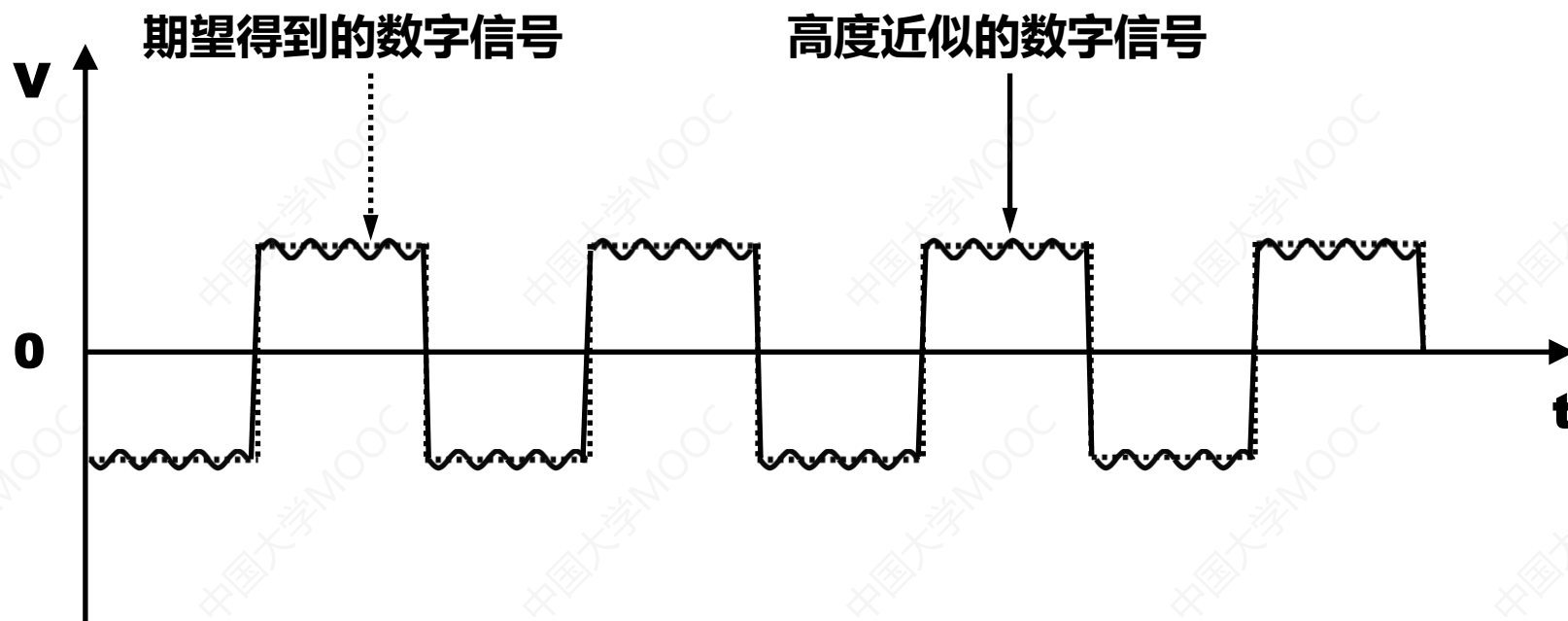
■ 信道上传输的**数字信号**，可以看做是**多个频率的模拟信号进行多次叠加后形成的方波**。



基波与3次谐波叠加形成近似方波的数字信号

## 01 造成信号失真的主要因素

■ 信道上传输的**数字信号**，可以看做是**多个频率的模拟信号进行多次叠加后形成的方波**。



基波经过多次更高频率谐波的叠加形成高度接近数字信号的波形

## 01 造成信号失真的主要因素

- 信道上传输的**数字信号**，可以看做是**多个频率的模拟信号进行多次叠加后形成的方波**。
- 如果数字信号中的高频分量在传输时受到衰减甚至不能通过信道，则接收端接收到的波形前沿和后沿就变得不那么陡峭，每一个码元所占的时间界限也不再明确。这样，在接收端接收到的信号波形就失去了码元之间的清晰界限，这种现象称为**码间串扰**。
- 如果**信道的频带越宽**，则能够**通过的信号的高频分量就越多**，那么**码元的传输速率就可以更高**，而**不会导致码间串扰**。
- 然而，**信道的频率带宽是有上限的**，不可能无限大。因此，**码元的传输速率也有上限**。



## 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。

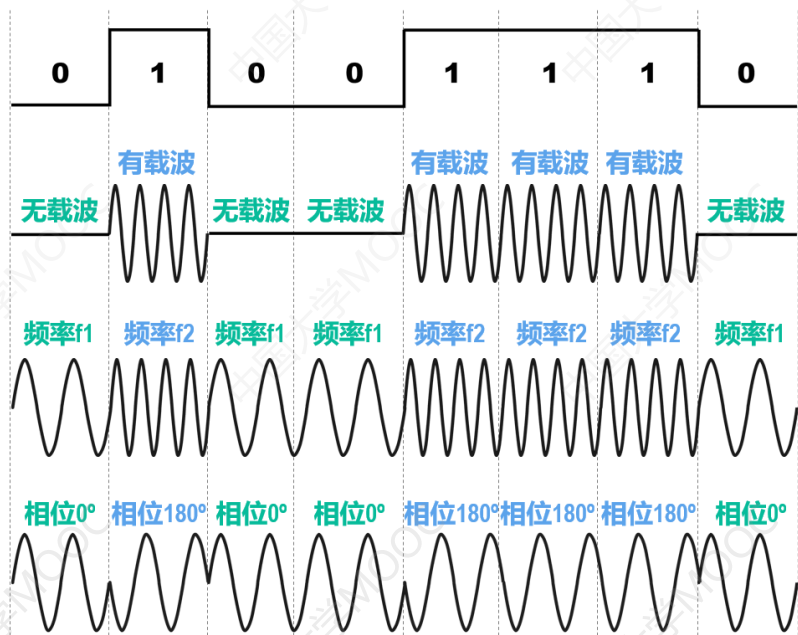
### 基本调制方法

数字基带信号

调幅 (AM)

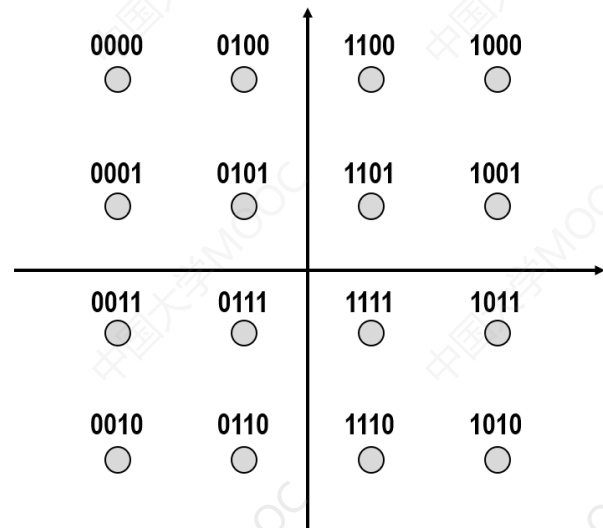
调频 (FM)

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



## 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**)

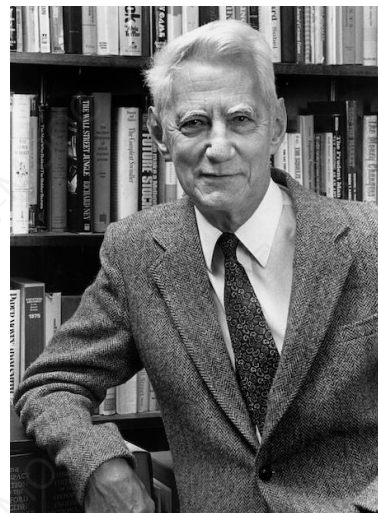
**W**: 信道的频率带宽 (单位为**Hz**)

**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, 常用分贝 (**dB**) 表示

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



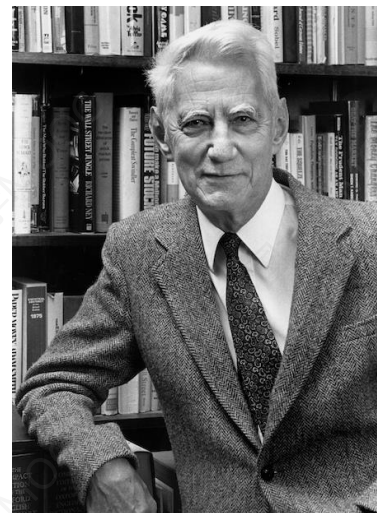
香农 (1916-2001)



## 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)

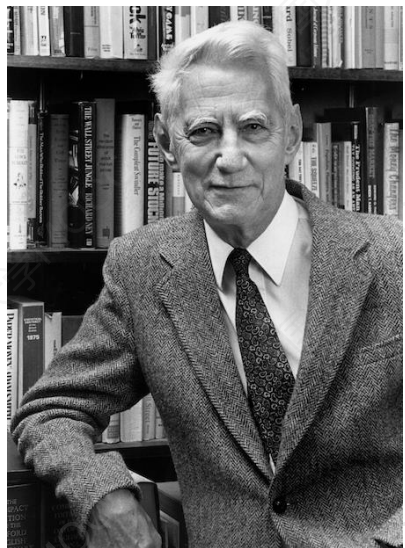
- 信道的频率带宽W或信道中的信噪比S/N越大，信道的极限信息传输速率C就越高。
- 实际信道不可能无限制地提高频率带宽W或信道中的信噪比S/N。
- 实际信道中能够达到的信息传输速率，要比香农公式给出的极限传输速率低不少。这是因为在实际信道中，信号还要受到其他一些损伤，例如各种脉冲干扰和信号衰减等，这些因素在香农公式中并未考虑。



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

【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  $4 \times 4 = 16$ 种不同的基本波形（码元）  
采用二进制对这16种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种相位不同的基本波形（码元）。  
采用二进制对这4种不同的码元进行编码，需要使用2个比特（ $\log_2 4 = 2$ ）。  
即每种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  
 $2400 \text{ (比特/秒)} = \text{波特率} \times 2 \text{ (比特/码元)}$   
 $\text{波特率} = 1200 \text{ (码元/秒)} = 1200 \text{ 波特}$

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

【2014年 题35】下列因素中，不会影响信道数据传输速率的是（**D**）。

## 解析

A. 信噪比

B. 频率带宽

从香农公式可知  
信噪比和频率带宽  
都会影响信道数据传输速率

C. 调制速度

从奈氏准则可知  
调制速度（码元传输速度）  
会影响信道的数据传输速率

D. 信号传播速度

不影响  
信道数据传输速率

自由空间:  $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$   
铜 线:  $2.3 \times 10^8 \text{ m/s}$   
光 纤:  $2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$



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

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

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

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 $X$

则每种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  $X \geq 32$



## 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

- 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。
- 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。

## 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**

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

**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, 常用分贝 (dB) 表示

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

- 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。

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。

