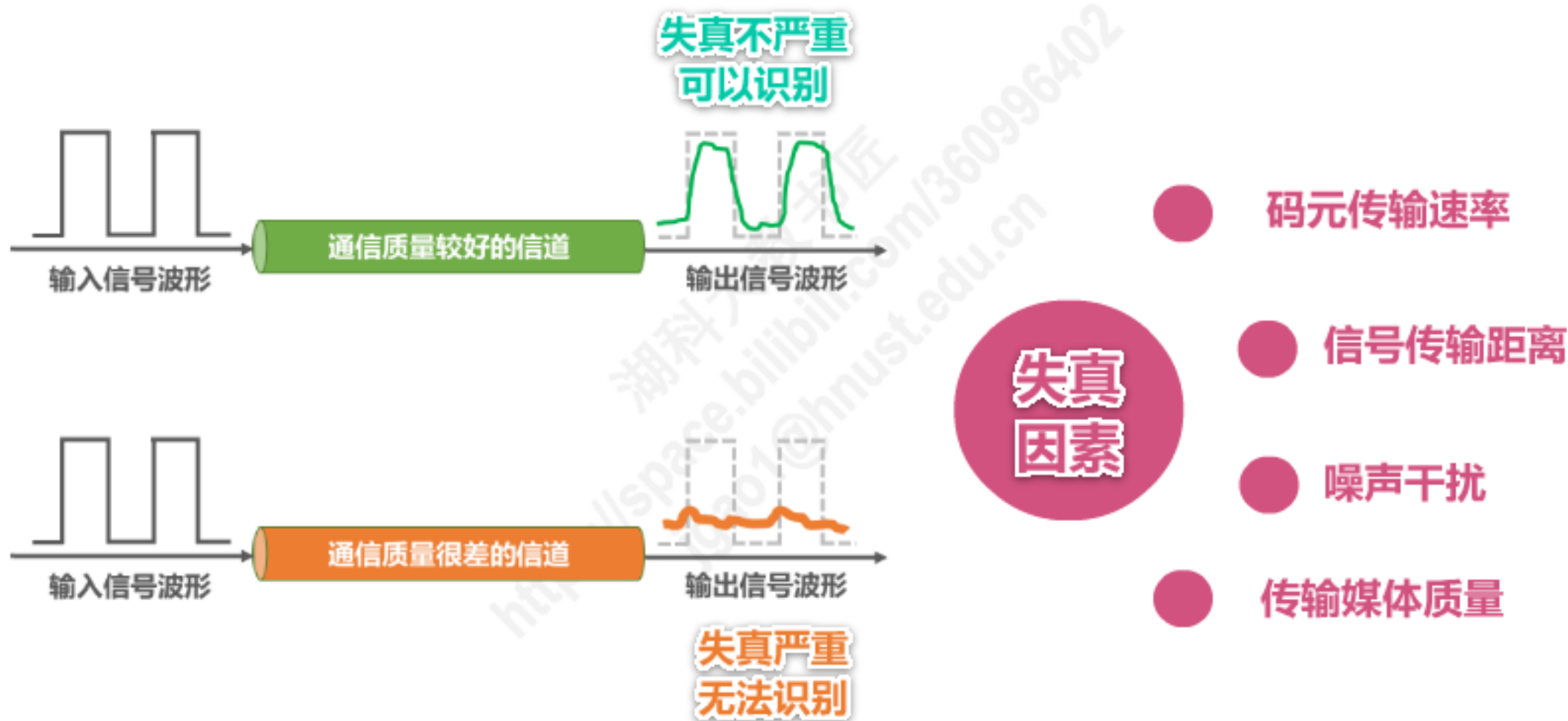


## 2.5 信道的极限容量



## 2.5 信道的极限容量



## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

在假定的理想条件下，**为了避免码间串扰，码元传输速率是有上限的。**

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  码元/秒

$W$ : 信道带宽 (单位为Hz)

Baud: 波特, 即码元/秒

## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

在假定的理想条件下，**为了避免码间串扰，码元传输速率是有上限的。**

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  码元/秒

$W$ : 信道带宽 (单位为Hz)

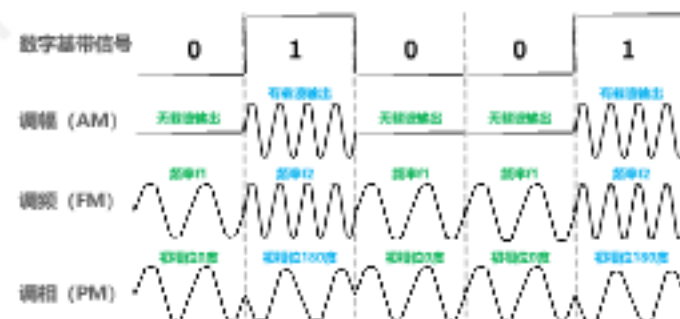
Baud: 波特, 即码元/秒

■ 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。它与比特率有一定关系:

- 当1个码元只携带1比特的信息量时, 则波特率 (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, 则波特率转换成比特率时, 数值要乘以 $n$ 。

■ 要提高信息传输速率 (比特率), 就必须设法使每一个码元能携带更多个比特的信息量。这需要采用多元制。

基本调制方法



## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

在假定的理想条件下，**为了避免码间串扰，码元传输速率是有上限的。**

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  码元/秒

$W$ : 信道带宽 (单位为Hz)

Baud: 波特, 即码元/秒

■ 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。它与比特率有一定关系:

- ☐ 当1个码元只携带1比特的信息量时, 则波特率 (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, 则波特率转换成比特率时, 数值要乘以 $n$ 。

■ 要提高信息传输速率 (比特率), 就必须设法使每一个码元能携带更多个比特的信息量。这需要采用多元制。

混合调制举例 —— 正交振幅调制QAM

■ QAM-16

- ☐ 12种相位
- ☐ 每种相位有1或2种幅值可选
- ☐ 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
- ☐ 码元与4个比特的对应关系采用格雷码
- 任意两个相邻码元只有1个比特不同



## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

在假定的理想条件下，**为了避免码间串扰，码元传输速率是有上限的。**

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  码元/秒

$W$ : 信道带宽 (单位为Hz)

Baud: 波特, 即码元/秒

■ 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。它与比特率有一定关系:

☐ 当1个码元只携带1比特的信息量时, 则波特率 (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, 则波特率转换成比特率时, 数值要乘以 $n$ 。

■ 要提高信息传输速率 (比特率), 就必须设法使每一个码元能携带更多个比特的信息量。这需要采用多元制。

■ 实际的信道所能传输的最高码元速率, 要明显低于奈氏准则给出的这个上限数值。



## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

在假定的理想条件下，**为了避免码间串扰，码元传输速率是有上限的。**

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  码元/秒

$W$ : 信道带宽 (单位为Hz)

Baud: 波特, 即码元/秒

只要采用更好的调制方法, 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?

答案是否定的。因为信道的极限信息传输速率还要受限于实际的信号在信道中传输时的信噪比。

■ 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。它与比特率有一定关系:

- ☐ 当1个码元只携带1比特的信息量时, 则波特率 (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, 则波特率转换成比特率时, 数值要乘以 $n$ 。

■ 要提高信息传输速率 (比特率), 就必须设法使每一个码元能携带更多个比特的信息量。这需要采用多元制。

■ 实际的信道所能传输的最高码元速率, 要明显低于奈氏准则给出的这个上限数值。

## 2.5 信道的极限容量

### 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。

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

C: 信道的极限信息传输速率 (单位: b/s)

W: 信道带宽 (单位: 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

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

■ 信道带宽或信道中信噪比越大, 信息的极限传输速率越高。

■ 在实际信道上能够达到的信息传输速率要比该公式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, 如各种脉冲干扰、信号在传输中的衰减和失真等, 这些因素在香农公式中并未考虑。



## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  (单位: 码元/秒)

### 香农公式

$$c = W \times \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{单位: bit/s})$$

- 在信道带宽一定的情况下, 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** (更好的调制方法) 和努力**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, 其目的都是为了尽可能地**接近香农公式给出的传输速率极限**。

## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率 =  $2W$  Baud =  $2W$  (单位: 码元/秒)  
理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  (单位: 码元/秒)

### 香农公式

$$c = W \times \log_2(1 + \frac{S}{N}) \quad (\text{单位: bit/s})$$

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

A. 信噪比

B. 频率带宽

C. 调制速度

D. 信号传播速度

香农公式

奈氏准则

不影响  
数据传输速率

自由空间:  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

铜 线:  $2.3 \times 10^8 \text{ m/s}$

光 纤:  $2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$

## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  (单位: 码元/秒)

### 香农公式

$$C = W \times \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{单位: bit/s})$$

【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. 12 kbps

B. 24 kbps

C. 48 kbps

D. 96 kbps

### 【解析】

(1) 根据奈氏准则可知,该通信链路的最高码元传输速率 =  $2 \times 3\text{k} = 6\text{k}$  (Baud) =  $6\text{k}$  (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 ( $\log_2 16 = 4$ )。换句话说,每个码元可以携带的信息量为4比特;

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

## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  (单位: 码元/秒)

### 香农公式

$$C = W \times \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{单位: bit/s})$$

不管题目给出的调制技术多么“牛”或对于我们而言有多陌生，这都不会影响我们解题。

我们只需关心这种调制技术可以调制出多少个不同的基本波形（码元）即可。

【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. 12 kbps

B. 24 kbps

C. 48 kbps

D. 96 kbps

### 【解析】

(1) 根据奈氏准则可知，该通信链路的最高码元传输速率 =  $2 \times 3\text{k} = 6\text{k}$  (Baud) =  $6\text{k}$  (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 ( $\log_2 16 = 4$ )。换句话说，每个码元可以携带的信息量为4比特；

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

## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  (单位: 码元/秒)

### 香农公式

$$C = W \times \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{单位: bit/s})$$

不管题目给出的调制技术多么“牛”或对于我们而言有多陌生，这都不会影响我们解题。

我们只需关心这种调制技术可以调制出多少个不同的基本波形（码元）即可。

【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个不同的码元进行编码，需要使用2个比特（ $\log_2 4 = 2$ ）。换句话说，每个码元可以携带的信息量为2比特；

(2) 数据传输速率 = 波特率（码元传输速率）× 每个码元所携带的信息量

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

$$\text{解得: 波特率} = 1200 \text{ (码元/秒)} = 1200 \text{ (Baud)} = 1200 \text{ (波特)}$$



## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  (单位: 码元/秒)

### 香农公式

$$c = W \times \log_2(1 + \frac{S}{N}) \quad (\text{单位: bit/s})$$

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

【2016年 题34】若连接R2和R3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. 8 kbps

B. 20 kbps

C. 40 kbps

D. 80 kbps

【解析】

$$\text{理论最大数据传输速率 } c = 8k \times \log_2(1 + \frac{S}{N})$$

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

$$c = 8k \times \log_2(1 + 1000) \approx 80 \text{ kbps}$$

$$\text{该链路的实际数据传输速率 } c \times 50\% = 40 \text{ kbps}$$



## 2.5 信道的极限容量

## 奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率 =  $2W$  Baud =  $2W$  (单位: 码元/秒)理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  (单位: 码元/秒)

## 香农公式

$$C = W \times \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{单位: bit/s})$$

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

【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  $X \geq 32$

## 2.5 信道的极限容量

### 奈氏准则

在假定的理想条件下，**为了避免码间串扰，码元传输速率是有上限的。**

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

理想带通信道的最高码元传输速率 =  $W$  Baud =  $W$  码元/秒

$W$ : 信道带宽 (单位为Hz)

Baud: 波特, 即码元/秒

只要采用更好的调制方法, 让码元可以携带更多的比特, 岂不是可以无限地提高信息的传输速率?

答案是否定的。因为信道的极限信息传输速率还受限于实际的信号在信道中传输时的信噪比。

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。它与比特率有一定关系:

☐ 当1个码元只携带1比特的信息量时, 则波特率 (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, 则波特率转换成比特率时, 数值要乘以 $n$ 。

要提高信息传输速率 (比特率), 就必须设法使每一个码元能携带更多个比特的信息量。这需要采用多元制。

实际的信道所能传输的最高码元速率, 要明显低于奈氏准则给出的这个上限数值。

### 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。

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

$C$ : 信道的极限信息传输速率 (单位: b/s)

$W$ : 信道带宽 (单位: 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

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

信道带宽或信道中信噪比越大, 信道的极限传输速率越高。

在实际信道上能够达到的信息传输速率要比该公式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, 如各种脉冲干扰、信号在传输中的衰减和失真等。这些因素在香农公式中并未考虑。

在信道带宽一定的情况下, 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** (更好的调制方法) 和努力**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, 其目的都是为了尽可能地**接近香农公式给出的传输速率极限**。

