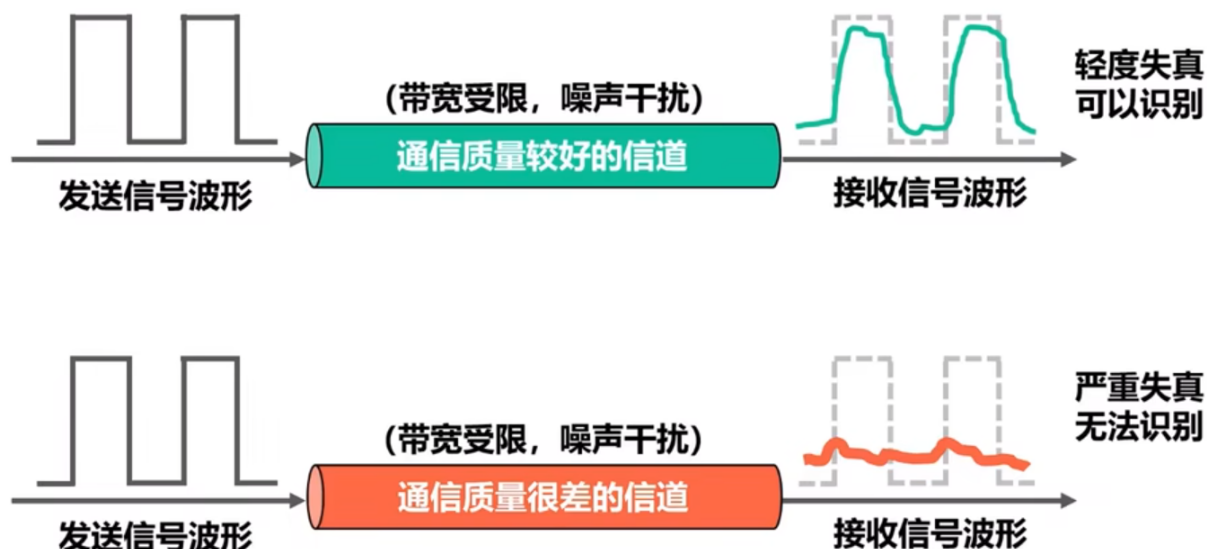


Lecture 7: 知识 - 信道的极限容量

信道失真的因素

失真



失真的因素

- 图示:

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。

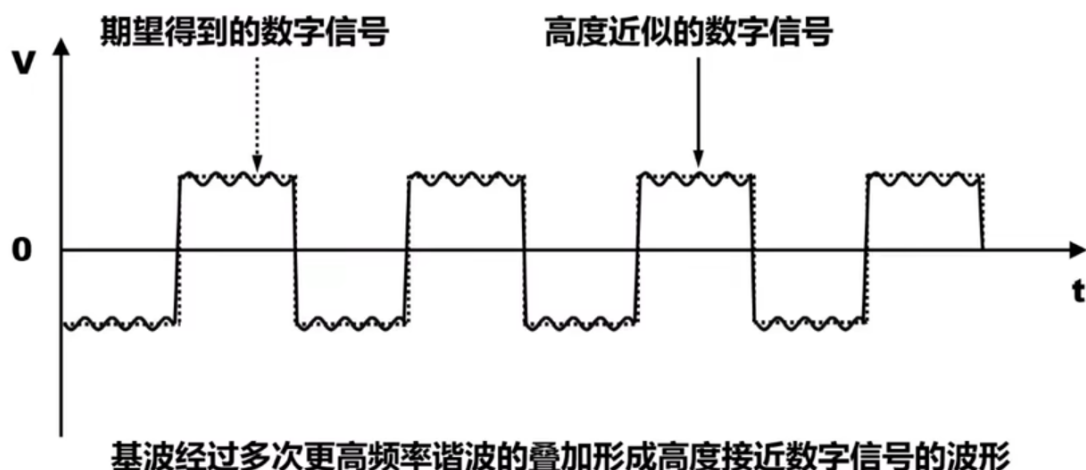
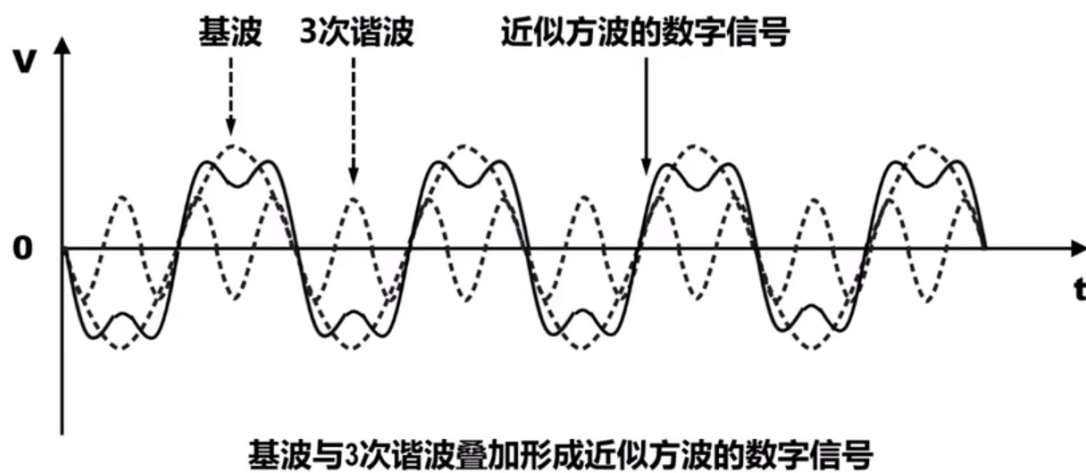
传输媒体的质量

- 补充: 码元传输速率与失真的关系

- 概念:

- 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
- 比如: 对基波加上三次谐波后, 会产生类似方波的数字信号;

- 图示:



码间串扰:

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**。

奈氏准则

概念：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。

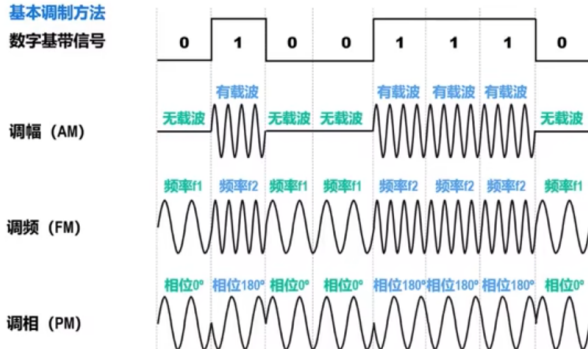
■ 码元传输速率又称为波特率、调制速率、波形速率或符号速率。

■ 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。

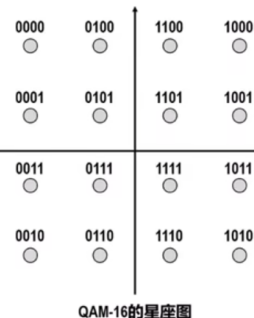
☐ 当1个码元携带n比特的信息量时，波特率（码元/秒）转换成比特率（比特/秒）时，数值要乘以n

基本调制方法
数字基带信号



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



香农公式

概念：香农公式

• 引入：

• 问题：

- 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？

• 答案：

- 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；

• 概念：

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

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

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

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

■ 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。

总结

理想低通信道的最高码元传输速率
= 2W Baud = 2W 码元/秒

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

总结

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**
- $$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$$
- 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
- $$\text{信噪比 (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) (dB)$$
- 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**。

例题

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

【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) $\times$ 每个码元所携带的信息量
 2400 (比特/秒) = 波特率 $\times 2$ (比特/码元)
波特率 = 1200 (码元/秒) = 1200波特

【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

C. 调制速度

D. 信号传播速度

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

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

不影响
信道数据传输速率

自由空间: 3.0×10^8 m/s
铜 线: 2.3×10^8 m/s
光 纤: 2.0×10^8 m/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 $C \times 50\% = 80kbps \times 50\% = 40kbps$