

Chapter 2 Physical layer

- [1. 物理层概述](#)

- [1.1. 物理层要实现的功能](#)
- [1.2. 物理层的接口特性](#)
 - [1.2.1. 机械特性](#)
 - [1.2.2. 电气特性](#)
 - [1.2.3. 功能特性](#)
 - [1.2.4. 过程特性](#)

- [2. 物理层下面的传输媒体](#)

- [2.1. 传输媒体的分类](#)
- [2.2. 导向型传输媒体](#)
 - [2.2.1. 同轴电缆](#)
 - [2.2.1.1. 基带同轴电缆 \(50Ω\)](#)
 - [2.2.1.2. 宽带同轴电缆 \(75Ω\)](#)
 - [2.2.2. 双绞线](#)
 - [2.2.3.1. 多模光纤](#)
 - [2.2.3.2. 单模光纤](#)
- [2.3. 非导向型传输媒体](#)
 - [2.3.1. 无线电波](#)
 - [2.3.1.1. 中低频](#)
 - [2.3.1.2. 高频甚高频](#)
 - [2.3.2. 微波](#)
 - [2.3.2.1. 地面微波接力通信](#)
 - [2.3.2.2. 卫星通信](#)
 - [2.3.3. 红外线](#)
 - [2.3.4. 激光](#)
 - [2.3.4.1. 大气激光通信](#)
 - [2.3.4.2. 光纤通信](#)
 - [2.3.5. 可见光](#)

- [3. 传输方式](#)

- [3.1. 串行传输和并行传输](#)
 - [3.1.1. 串行传输](#)
 - [3.1.2. 并行传输](#)
- [3.2. 同步传输和异步传输](#)
 - [3.2.1. 同步传输](#)
 - [3.2.2. 异步传输](#)
- [3.3. 单向通信、双向交替通信和双向同时通信](#)

- [4. 编码与调制](#)

- [4.1. 编码与调制的基本概念](#)
 - [4.1.1. 调制](#)
 - [4.1.2. 码元](#)
- [4.2. 常用编码方式](#)
 - [4.2.1. 双极性不归零编码](#)
 - [4.2.2. 双极性归零编码](#)
 - [4.2.3. 曼彻斯特编码](#)
 - [4.2.4. 差分曼彻斯特编码](#)
- [4.3. 基本的带通调制方法和混合调制方法](#)
 - [4.3.1. 基本的带通调制方法](#)
 - [4.3.2. 混合调制方法](#)
 - [4.3.2.1. 正交振幅调制QAM-16](#)
- [5. 信道的极限容量](#)
 - [5.1. 造成信号失真的主要因素](#)
 - [5.1.1. 码元的传输速率](#)
 - [5.1.2. 信号的传输距离](#)
 - [5.1.3. 噪声干扰](#)
 - [5.1.4. 传输媒体的质量](#)
 - [5.2. 奈氏准则](#)
 - [5.3. 香农公式](#)
- [6. 信道复用技术](#)
 - [6.1. 信道复用技术的基本原理](#)
 - [6.2. 常见的信道复用技术](#)
 - [6.2.1. 频分复用FDM](#)
 - [6.2.2. 时分复用TDM](#)
 - [6.2.3. 波分复用WDM](#)
 - [6.2.4. 码分复用CDM](#)
- [7. 题目](#)

1. 物理层概述

1.1. 物理层要实现的功能

- “透明”传输比特流
- 数据链路层只管“享受”物理层提供的比特流传输服务，不需知道其具体传输方法

1.2. 物理层的接口特性

1.2.1. 机械特性

- 形状和尺寸
- 引脚数目和排列
- 固定和锁定装置

1.2.2. 电气特性

- 信号电压的范围
- 阻抗匹配的情况
- 传输速率
- 距离限制

1.2.3. 功能特性

- 规定接口电缆的各条信号线的作用

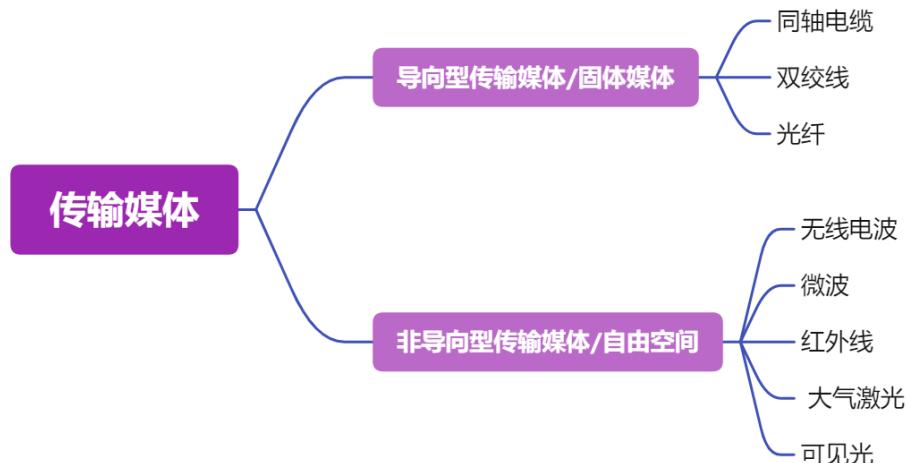
1.2.4. 过程特性

- 规定在信号线上传输比特流的一组操作过程，包括各信号间的时序关系

2. 物理层下面的传输媒体

2.1. 传输媒体的分类

- 传输媒体是计算机网络设备之间的物理通路，也称为传输介质或传输媒介
- 传输媒体并不包含在计算机网络体系结构中



2.2. 导向型传输媒体

2.2.1. 同轴电缆

- 价格较贵且布线不够灵活和方便

2.2.1.1. 基带同轴电缆 (50Ω)

- 用于数字传输，在早期局域网中广泛使用

2.2.1.2. 宽带同轴电缆 (75Ω)

- 用于模拟传输，目前主要用于有线电视的入户线。

2.2.2. 双绞线

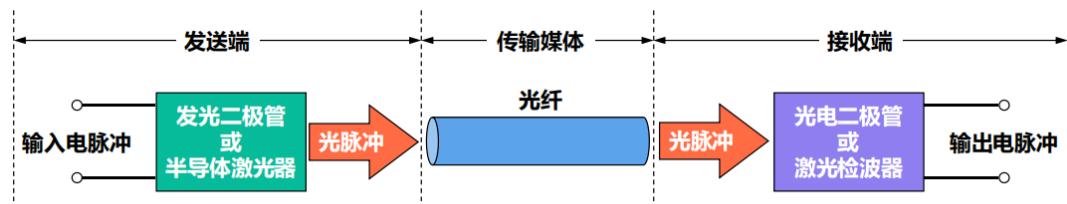
- 局域网领域基本上都采用双绞线作为传输媒体



- 绞合的作用
 - 减少相邻导线间的电磁干扰
 - 抵御部分来自外界的电磁干扰

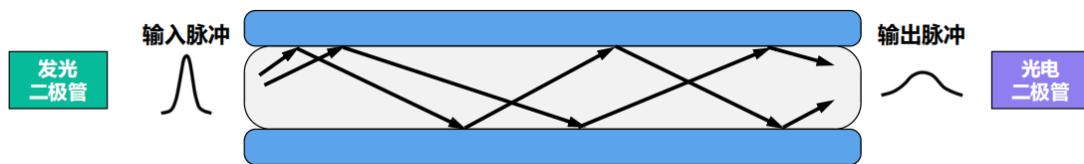
2.2.3. 光纤

- 光纤通信系统的传输带宽远大于目前其他各种传输媒体的带宽
- 优点
 - 通信容量非常大
 - 抗雷电和电磁干扰性能好
 - 传输损耗小，中继距离长
 - 无串音干扰，保密性好
 - 体积小，重量轻
- 缺点
 - 切割光纤需要较贵的专用设备
 - 目前光电接口还比较昂贵



典型光纤通信系统结构示意图

2.2.3.1. 多模光纤



- 多条光波在多模光纤中不断地全反射
- 只适合于建筑物内的近距离传输

2.2.3.2. 单模光纤

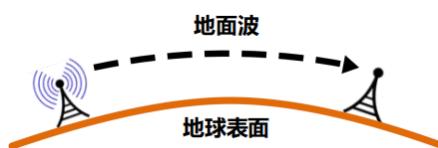


- 光在单模光纤中一直向前传播
- 适合长距离传输且衰减更小

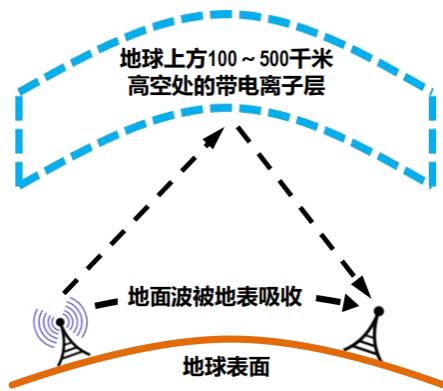
2.3. 非导向型传输媒体

2.3.1. 无线电波

2.3.1.1. 中低频



2.3.1.2. 高频甚高频



2.3.2. 微波

2.3.2.1. 地面微波接力通信



2.3.2.2. 卫星通信

- 三颗同步卫星
- 中低轨道同步卫星

2.3.3. 红外线

- 点对点无线传输
- 直线传输，中间不能有障碍物，传输距离短
- 传输速率低 (4Mb/s ~ 16Mb/s)

2.3.4. 激光

2.3.4.1. 大气激光通信

- 优点
 - 通信容量大
 - 保密性强
 - 结构轻便
 - 设备经济
- 缺点
 - 通信距离受限于视距
 - 易受气候影响
 - 瞄准困难

2.3.4.2. 光纤通信

2.3.5. 可见光

- LIFI可见光通信

3. 传输方式

3.1. 串行传输和并行传输

- 网卡同时具有串行传输和并行传输（并串转换、串并转换）

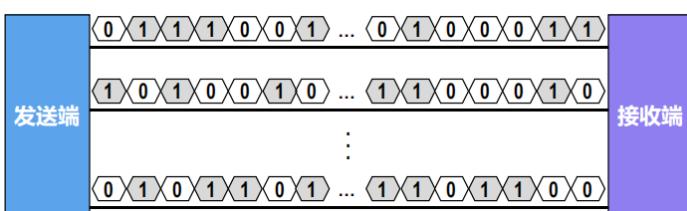
3.1.1. 串行传输

- 用于远距离传输



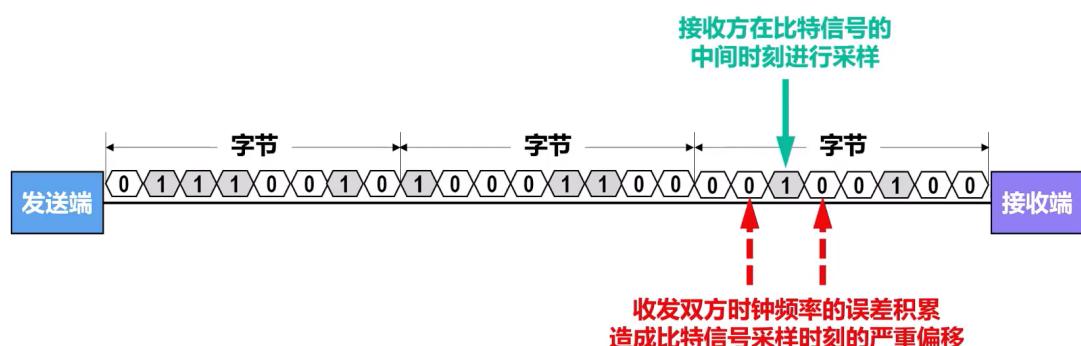
3.1.2. 并行传输

- 用于短距离传输



3.2. 同步传输和异步传输

3.2.1. 同步传输



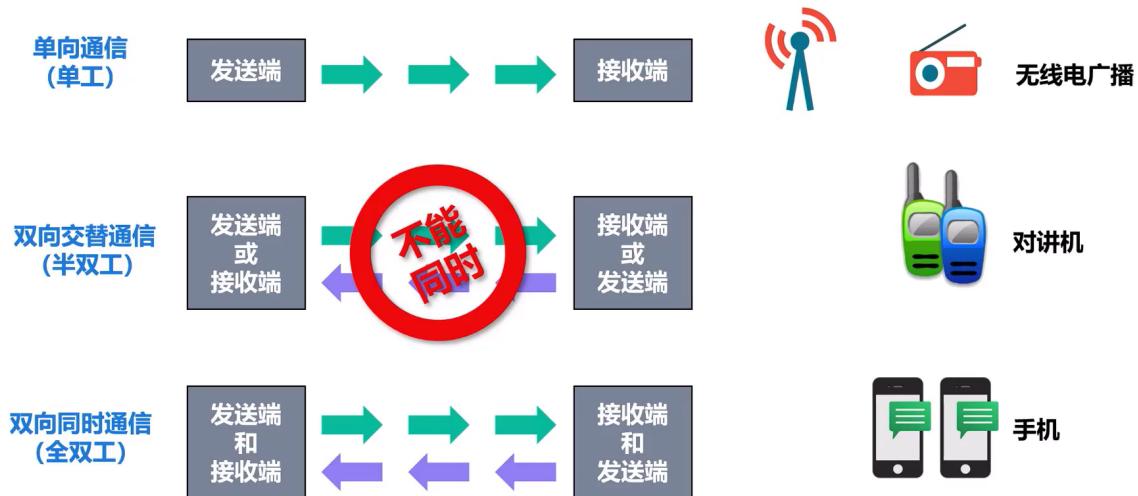
- 以比特为传输单位，字节之间没有间隔，也没有起始位和终止位。
- 收发双方时钟同步的方法
 - 外同步：在收发双方之间增加一条时钟信号线。
 - 内同步：发送端将时钟信号编码到发送数据中一起发送（例如曼彻斯特编码）。

3.2.2. 异步传输



- 以字节为传输单位。
- 接收端只在每个字节的起始处对字节内的比特实现同步。
- 要给每个字节添加起始位和结束位。
- 异步：指字节之间异步，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。

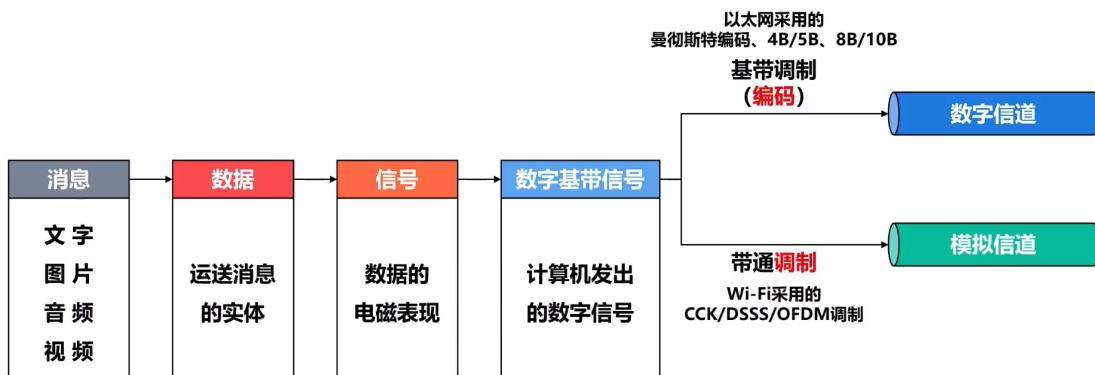
3.3. 单向通信、双向交替通信和双向同时通信



- 单向通信（单工）：无线电广播
- 双向交替通信（半双工）：不能同时、如对讲机
- 双向同时通信（全双工）：可同时、如手机

4. 编码与调制

4.1. 编码与调制的基本概念

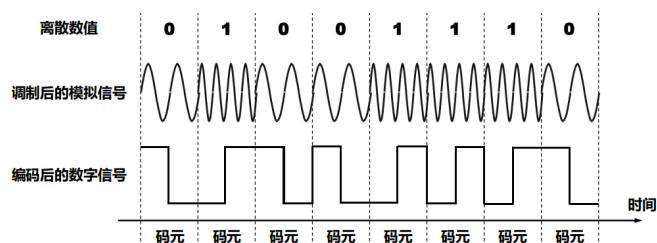


4.1.1. 调制

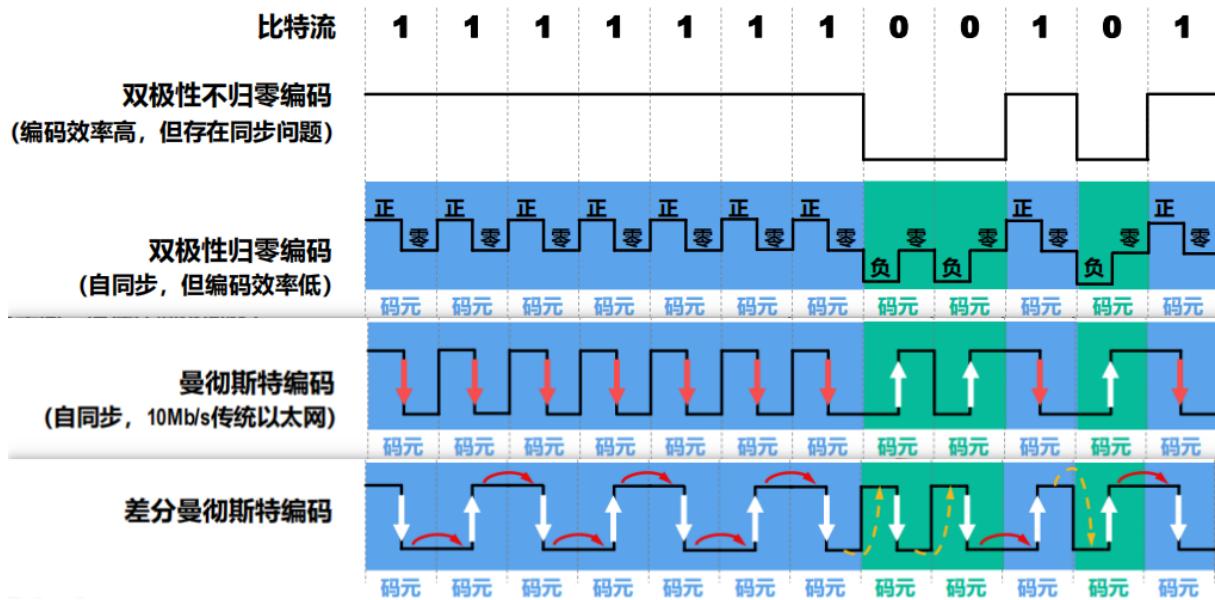
- 基带调制（编码）：数字信道
 - 以太网采用的曼彻斯特编码、4B/5B、8B/10B
- 带通调制：模拟信道
 - Wi-Fi采用的CCK/DSSS/OFDM调制

4.1.2. 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



4.2. 常用编码方式



4.2.1. 双极性不归零编码NRZ

- 编码效率高, 但存在同步问题

4.2.2. 双极性归零编码RZ

- 自同步, 但编码效率低
- 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。

4.2.3. 曼彻斯特编码

- 正中间时刻发生电平跳变, 既表示时钟信号, 也表示数据。
- 自同步, 10Mb/s传统以太网

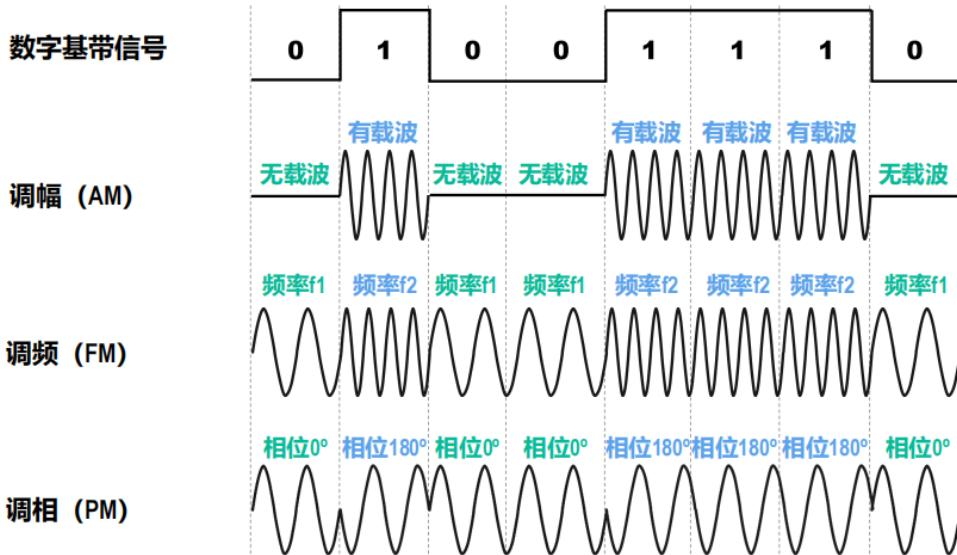
4.2.4. 差分曼彻斯特编码

- 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。
- 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。

4.3. 基本的带通调制方法和混合调制方法

4.3.1. 基本的带通调制方法

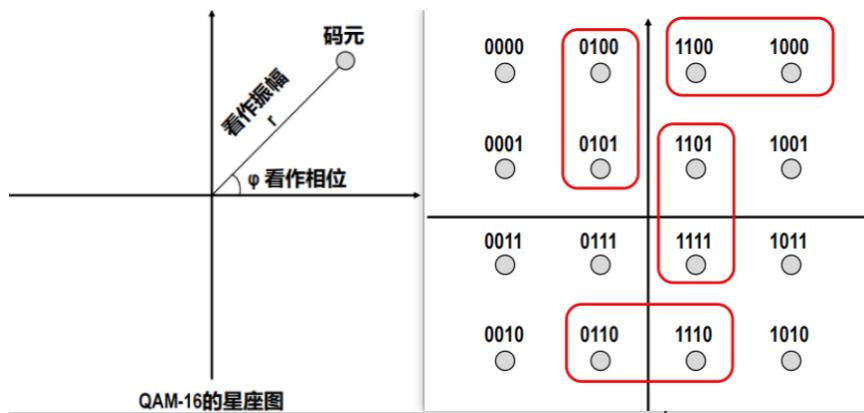
- 调幅 (AM) 、调频 (FM) 、调相 (PM)



4.3.2. 混合调制方法

- 频率和相位不能进行混合调制（频率是相位随时间的变化率）
- 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。

4.3.2.1. 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

5. 信道的极限容量

5.1. 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。
- 码间串扰
 - 接收端接收到的信号波形失去了码元之间的清晰界限
 - 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。
- 信道的频率带宽是有上限的 --> 码元的传输速率也有上限

5.1.1. 码元的传输速率

- 越高越严重

5.1.2. 信号的传输距离

- 越远越严重

5.1.3. 噪声干扰

- 越大越严重

5.1.4. 传输媒体的质量

- 越差越严重

5.2. 奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率 = $2W$ Baud

W: 信道的频率带宽 (单位为Hz)

Baud: 波特, 即码元/秒 = $2 W$ 码元/秒

- 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

5.3. 香农公式

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

- 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: 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

$\frac{S}{N}$: 信噪比, 使用分贝 (dB) 作为度量单位

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

6. 信道复用技术

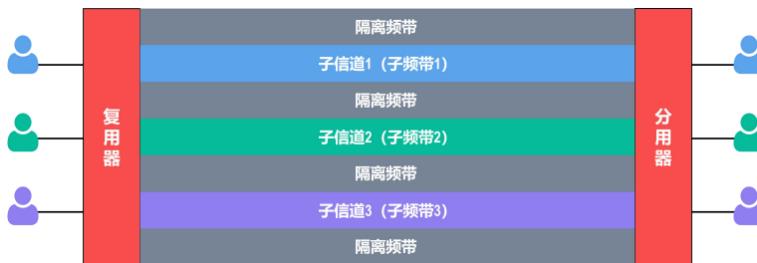
6.1. 信道复用技术的基本原理

- 复用 (Multiplexing) 就是在一条传输媒体上同时传输多路用户的信号。
- 当一条传输媒体的传输容量大于多条信道传输的总容量时, 就可以通过复用技术, 在这条传输媒体上建立多条通信信道, 以便充分利用传输媒体的带宽。

6.2. 常见的信道复用技术

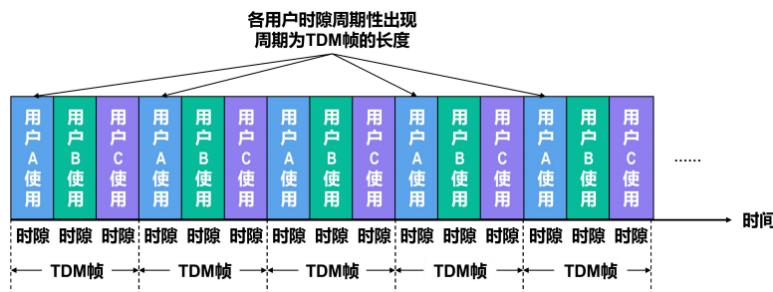
6.2.1. 频分复用FDM

- 频分复用的所有用户同时占用不同的频带资源并行通信



6.2.2. 时分复用TDM

- 时分复用的所有用户在不同的时间占用同样的频带



6.2.3. 波分复用WDM

- 根据频分复用的设计思想，可在一根光纤上同时传输多个频率（波长）相近的光载波信号，实现基于光纤的频分复用技术。
- 目前可以在一根光纤上复用80路或更多路的光载波信号。因此，这种复用技术也称为密集波分复用DWDM。

6.2.4. 码分复用CDM

- 码分复用 (Code Division Multiplexing, CDM) 常称为码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA) ，它是在扩频通信技术的基础上发展起来的一种无线通信技术。
- 与FDM和TDM不同，CDMA的每个用户可以在相同的时间使用相同的频带进行通信。
- 码片 (Chip)
 - CDMA将每个比特时间划分为m个更短的时间片
 - m的取值通常为64或128
- m比特码片序列 (Chip Sequence)
 - 某个站要发送比特1，则发送它自己的m比特码片序列
 - 某个站要发送比特0，则发送它自己的m比特码片序列的反码
- 码片向量
 - 将码片序列中的比特0记为-1，而比特1记为+1
- 码片序列规则
 - 每个站的码片序列必须各不相同，实际常采用伪随机码序列。
 - 每个站的码片序列必须相互正交，即各码片序列相应的码片向量之间的规格化内积为0。

令向量A表示站A的码片向量，向量B表示站B的码片向量，则

$$A \cdot B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_i B_i = 0$$

各手机用自己的码片向量与收到的叠加后的码片向量，做规格化内积运算：

$$(A + \bar{B}) \cdot A = A \cdot A + A \cdot \bar{B} = 1 + 0 = 1$$

运算结果为1，表明收到的是比特1

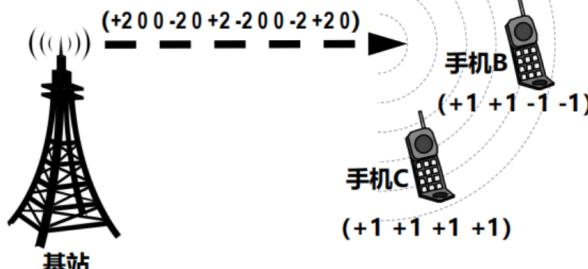
$$(A + \bar{B}) \cdot B = A \cdot B + \bar{B} \cdot B = 0 + (-1) = -1$$

运算结果为-1，表明收到的是比特0

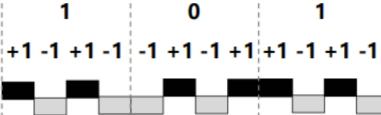
$$(A + \bar{B}) \cdot C = A \cdot C + \bar{B} \cdot C = 0 + 0 = 0$$

运算结果为0，表明没有收到信息

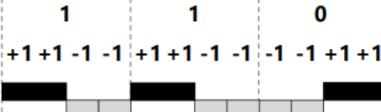
知道各手机的码片序列
给手机A发送比特串101
给手机B发送比特串110



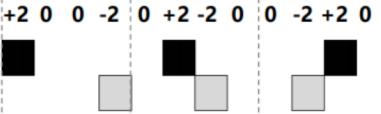
A发送数据
相应的码片向量
相应的信号



B发送数据
相应的码片向量
相应的信号



基站发送叠加向量
相应的信号



手机A收到基站发来的叠加后的信号，就用自己的码片向量与收到的叠加后的码片向量，做规格化内积运算：

$$\frac{(+1) \times (+2) + (-1) \times 0 + (+1) \times 0 + (-1) \times (-2)}{4} = 1$$

$$\frac{(+1) \times 0 + (-1) \times (+2) + (+1) \times (-2) + (-1) \times 0}{4} = -1$$

根据运算结果可知：
手机A收到基站发来的数据是比特串101。

手机B收到基站发来的叠加后的信号，就用自己的码片向量与收到的叠加后的码片向量，做规格化内积运算：

$$\frac{(+1) \times (+2) + (+1) \times 0 + (-1) \times 0 + (-1) \times (-2)}{4} = 1$$

$$\frac{(+1) \times 0 + (+1) \times (+2) + (-1) \times (-2) + (-1) \times 0}{4} = 1$$

根据运算结果可知：
手机B收到基站发来的数据是比特串110。

手机C收到基站发来的叠加后的信号，就用自己的码片向量与收到的叠加后的码片向量，做规格化内积运算：

$$\frac{(+1) \times (+2) + (+1) \times 0 + (+1) \times 0 + (+1) \times (-2)}{4} = 0$$

$$\frac{(+1) \times 0 + (+1) \times (+2) + (+1) \times (-2) + (+1) \times 0}{4} = 0$$

根据运算结果可知，基站没有给手机C发送数据。

7. 题目

【2018年题34】下列选项中，不属于物理层接口规范定义范畴的是（C）。

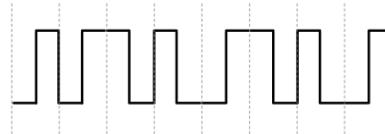
A. 接口形状 物理层接口 机械特性

B. 引脚功能 物理层接口 功能特性

数据链路层 C. 物理地址 硬件地址或MAC地址

D. 信号电平 物理层接口 电气特性

【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

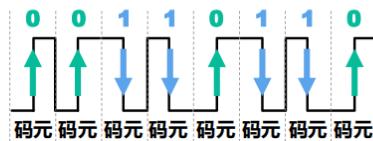
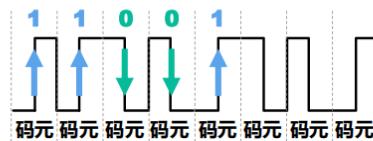
C. 0101 0010

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。

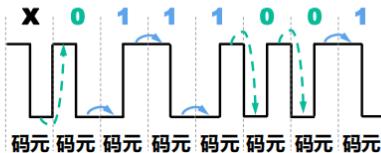


【2021年题34】若下图为一段差分曼彻斯特编码信号波形，则其编码的二进制位串是（A）。

- 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。



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

【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 (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

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: 3.0×10^8 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

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

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

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

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

【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 $X \geq 32$

【2014年题37】站点A、B、C通过CDMA共享链路，A、B、C的码片序列分别是(1,1,1,1)、(1,-1,1,-1)和(1,1,-1,-1)。若C从链路上收到的序列是(2,0,2,0,0,-2,0,-2,0,2,0,2)，则C收到A发送的数据是（B）。

- A. 000 B. 101 C. 110 D. 111

解析

由于题目所给各站的码片序列为4比特，因此将站点C收到的序列分成三部分，每部分也由4比特组成：

$$(2, 0, 2, 0, 0, -2, 0, 2, 0, 2) \longrightarrow (2, 0, 2, 0) \quad (0, -2, 0, -2) \quad (0, 2, 0, 2)$$

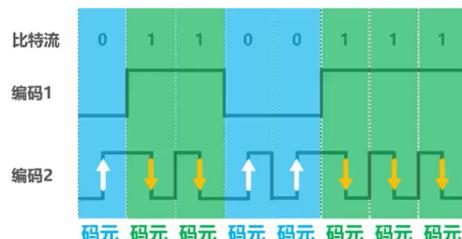
将站点A的码片序列（1,1,1,1）分别与上述三个部分进行规格化内积运算，根据结果可判断A发送的数据

$$(1, 1, 1, 1) \cdot (2, 0, 2, 0) = (1 \times 2 + 1 \times 0 + 1 \times 2 + 1 \times 0) \div 4 = 1 \quad \text{发送的是比特1}$$

$$(1, 1, 1, 1) \cdot (0, -2, 0, -2) = (1 \times 0 + 1 \times (-2) + 1 \times 0 + 1 \times (-2)) \div 4 = -1 \quad \text{发送的是比特0}$$

$$(1, 1, 1, 1) \cdot (0, 2, 0, 2) = (1 \times 0 + 1 \times 2 + 1 \times 0 + 1 \times 2) \div 4 = 1 \quad \text{发送的是比特1}$$

【题34】使用两种编码方案对比特流011001111编码的结果如下图所示，编码1和编码2分别是



- A. NRZ和曼彻斯特编码
B. NRZ和差分曼彻斯特编码
C. NRZI和曼彻斯特编码
D. NRZI和差分曼彻斯特编码

【解析】

常用编码

不归零编码NRZ

（存在同步问题）

1. 整个码元时间内电平不发生变化。
2. 需要额外的传输线来传输时钟信号。

归零编码RZ

（自同步，编码效率低）

- 每个码元传输结束后信号都要“归零”，所以接收方只要在信号归零后进行采样即可，不需要单独的时钟信号。

曼彻斯特编码

（传统以太网，10Mb/s）

1. 码元中间时刻的跳变既表示时钟，又表示数据。
2. 正/负跳变表示1/0可以自行定义。

差分曼彻斯特编码

（比曼彻斯特编码变化少，更适合较高的传输速率）

1. 跳变仅表示时钟。
2. 码元开始处电平是否发生变化表示0，不发生变化表示1。

反向不归零编码NRZI，在码元时间内不会出现零电平。若后一个码元时间内所持续的电平与前一个码元时间内所持续的电平不同（也称为电平反转）则表示0，若电平保持不变则表示1。