

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

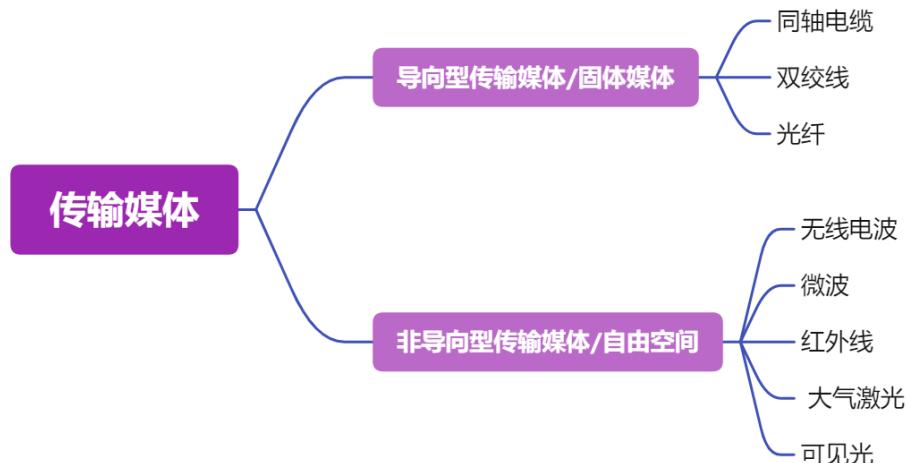
1.2.4. 过程特性

- 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

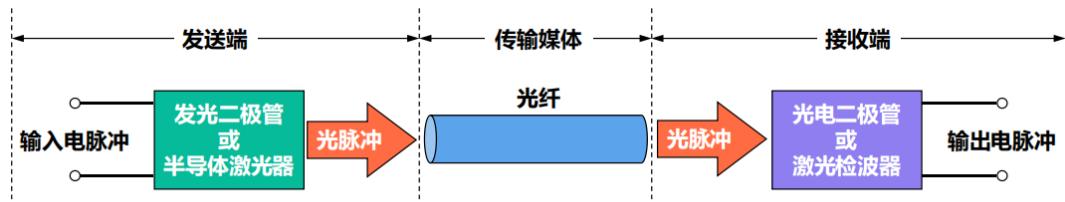
- 局域网领域基本上都采用双绞线作为传输媒体



- 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

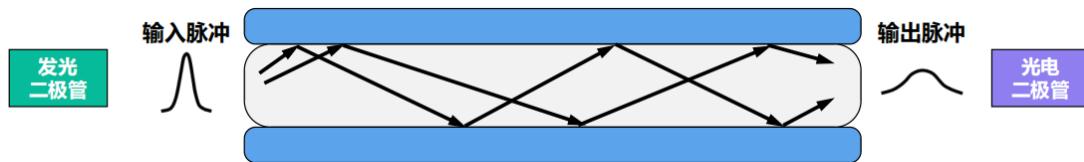
2.2.3. 光纤

- 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

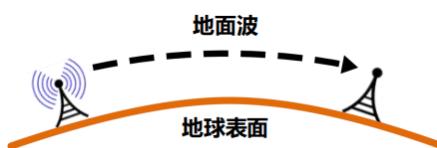


- 光在单模光纤中一直向前传播
- 适合长距离传输且衰减更小

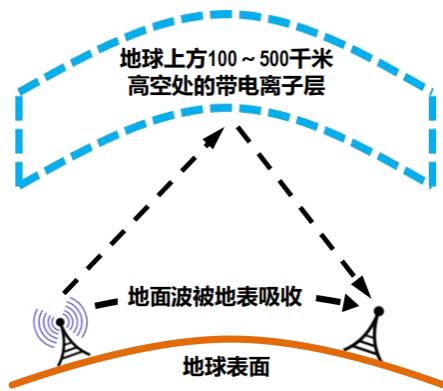
2.3. 非导向型传输媒体

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

- 网络同时具有串行传输和并行传输（并串转换、串并转换）

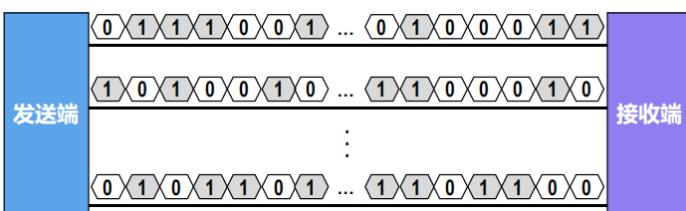
3.1.1. 串行传输

- 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

- 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

- 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

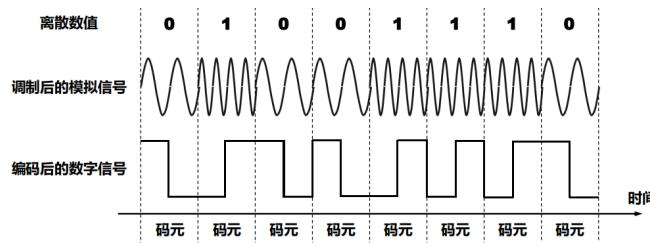
4.1. 编码与调制的基本概念

4.1.1. 调制

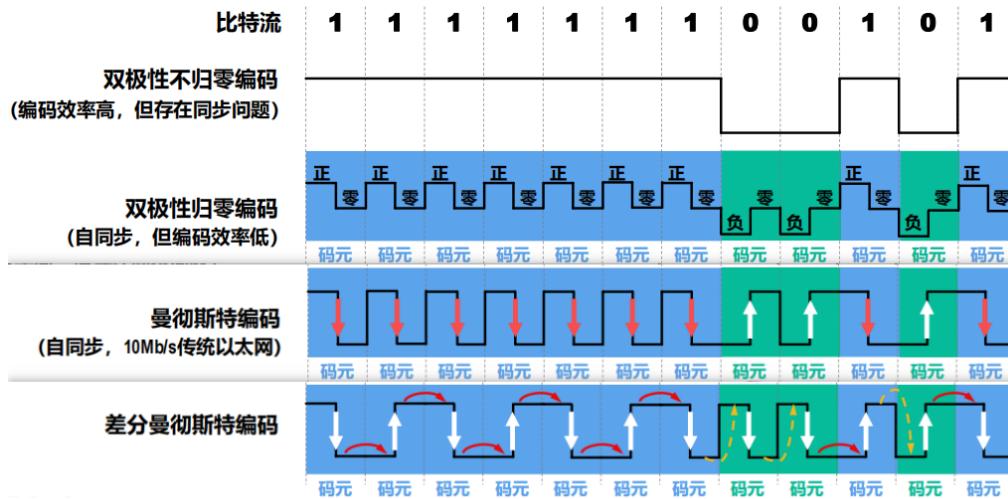
- 基带调制（编码）：数字信道
 - 以太网采用的曼彻斯特编码、4B/5B、8B/10B
- 带通调制：模拟信道
 - Wi-Fi采用的CCK/DSSS/OFDM调制

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

- 编码效率高，但存在同步问题

4.2.2. 双极性归零编码

- 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

- 自同步，10Mb/s传统以太网

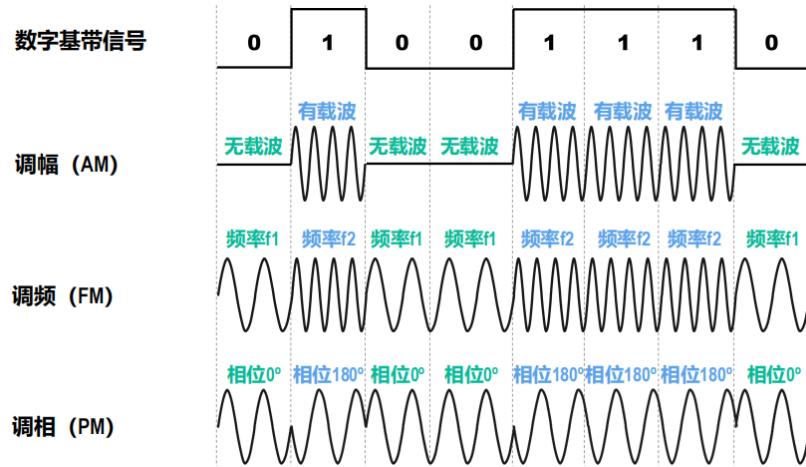
4.2.4. 差分曼彻斯特编码

- 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。

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

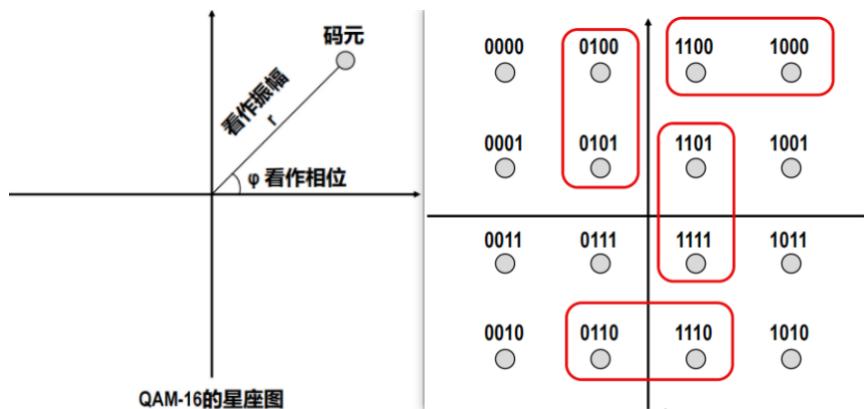
- 调幅 (AM)、调频 (FM)、调相 (PM)



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 \rightarrow 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

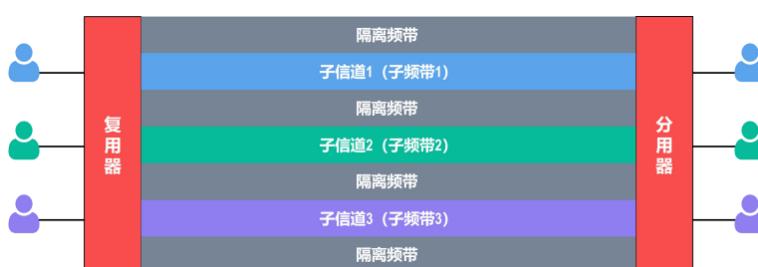
6.1. 信道复用技术的基本原理

- 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

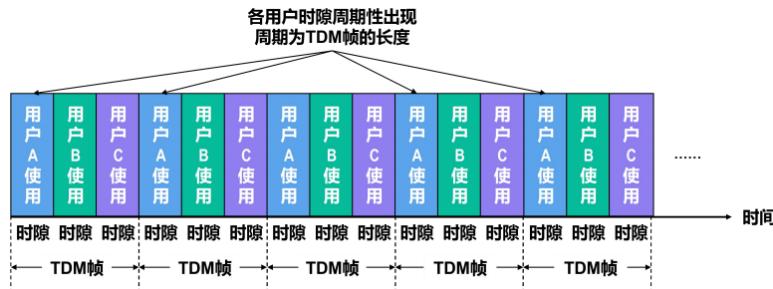
6.2.1. 频分复用FDM

- 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：

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

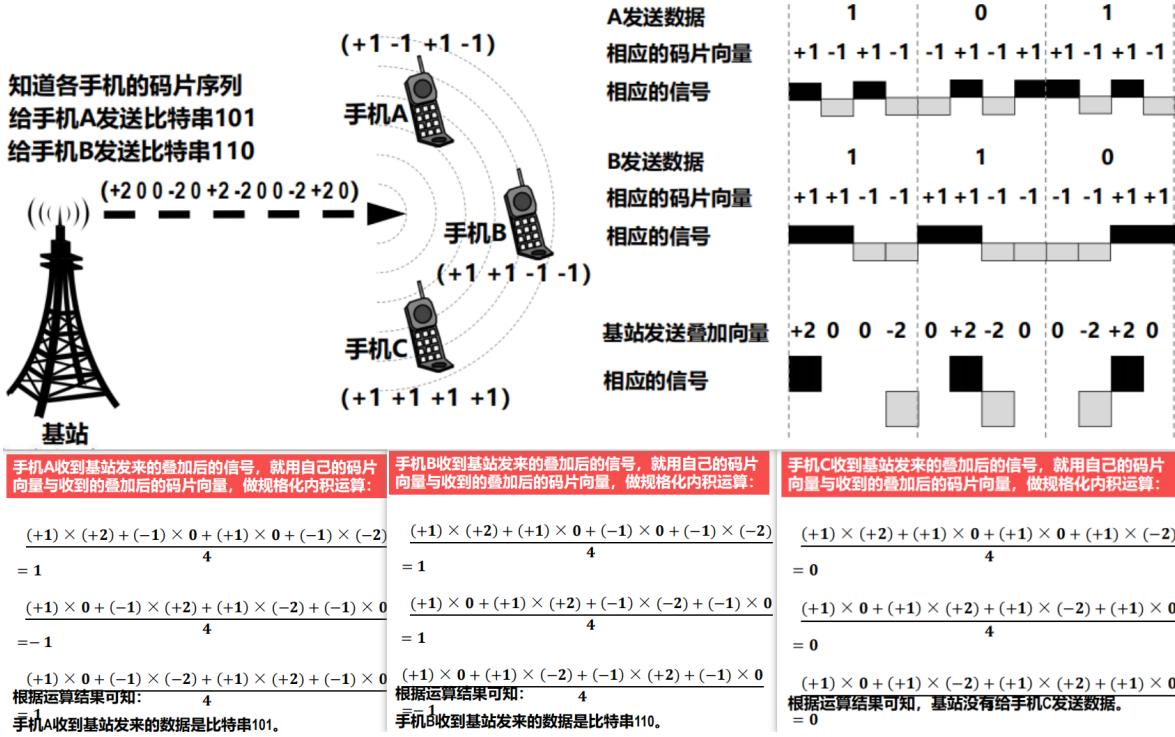
运算结果为1，表明收到的是比特1

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

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

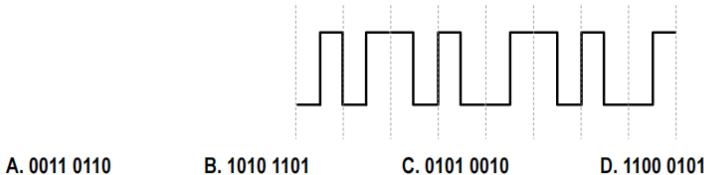


7. 题目

【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）。

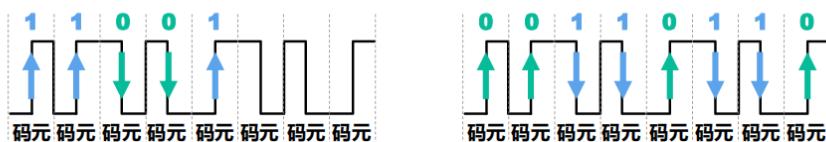
- A. 接口形状 物理层接口 机械特性
- B. 引脚功能 物理层接口 功能特性
- C. 物理地址** 硬件地址或MAC地址
- D. 信号电平 物理层接口 电气特性

【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）。



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。

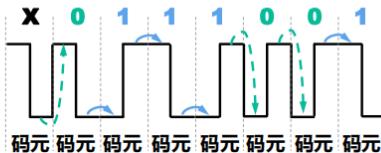


【2021年题34】若下图为一段差分曼彻斯特编码信号波形，则其编码的二进制位串是（A）。

- 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：

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

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

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

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

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