

计算机网络

xiaochuan

2026 年 2 月 8 日

目录

第一章 物理层	1
1.1 通信基础	1
1.1.1 信号的最大数据速率	1
1.2 数字调制	1
1.2.1 基带传输	1
1.2.2 通带传输	1
1.2.3 链路复用	2
1.3 链路复用	2
1.3.1 频分复用 (FDM)	2
1.3.2 波分复用 (WDM)	2
1.3.3 时分复用 (TDM)	2
1.3.4 码分复用 (CDM)	2
1.4 交换	2
第二章 链路层	3
2.1 链路层结构	3
2.2 逻辑链路层 LLC	3
2.3 成帧	3
2.4 差错控制	3
2.4.1 奇偶校验	3
2.4.2 CRC 校验	4
2.4.3 海明码	4
2.5 流量控制	4
2.6 可靠数据传输	5
2.7 介质访问控制子层 MAC	5
2.7.1 静态介质访问控制	5
2.7.2 动态介质访问控制	5
2.8 以太网	6
2.9 802.11 无线网	6
2.9.1 帧间间隔	6
2.9.2 帧结构	6
2.10 交换机	7

第一章 物理层

1.1 通信基础

基带：基础的比较低的频率
通带：高频的频率

1.1.1 信号的最大数据速率

奈奎斯特定理
最大数据速率 = $2B \log_2 V$ (/) V 是数字调制中的符号状态数
香农定理
最大比特率 = $B \log_2(1 + S/N)$, 其中 S/N 为信噪比, 分贝 = $10 \log_{10} S/N$

1.2 数字调制

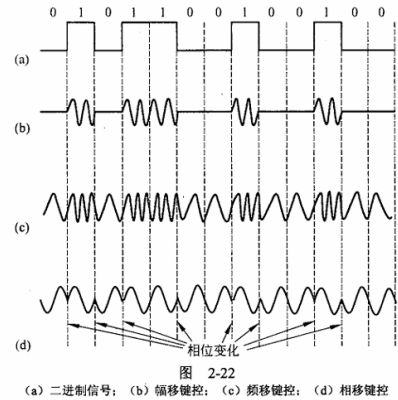
1.2.1 基带传输

直接传输原始的数据, 1 表示正电压 0 表示负电压

1.2.2 通带传输

把信号转换到高频信号上传输

幅移键控 (ASK)	通过不同的振幅表示 01
频移键控 (FSK)	通过不同的频率表示 01
相移键控 (PSK)	通过不同的相位表示 01 二进制相移键控 (BPSK): 有两种不同的相位 正交相移键控 (QPSK): 有 4 种不同的相位



1.2.3 链路复用

1.3 链路复用

1.3.1 频分复用（FDM）

传统的 FDM

把子信号直接加载一起，传统的评分复用于信号要求频率不能重叠并且不同子信号的频率之间需要有间隔，在接受方通过不同频率的滤波器来分离

正交频分复用 (OFDM)

不要求子信号的频率不能重叠，使用傅里叶变换来实现信号的叠加和分离

1.3.2 波分复用（WDM）

就是光信号的频分复用

1.3.3 时分复用（TDM）

把时域分成每个等长的 TDM 帧（这里的帧并不是链路层帧，只是一段固定的时间），每个帧里面有每个子信号的时隙，时隙之间有细小间隔

统计时分复用（STDM）

通过集中器收集不同子信号的时隙，每个时隙都被填满，TDM 帧内部的时隙没有固定位置

1.3.4 码分复用（CDM）

也叫码分多址（CDMA），每个子信号都有一个二进制码片，子信号发送码片表示 1，发送码片反码表示 0，不同子信号的码片之间正交，也就是码片对于的向量内积为 0

1.4 交换

项目	电路交换	包交换
呼叫建立	需要	不需要
专用物理路径	是	不是
每个包遵循相同的路由	是	不是
包按序到达	是	不是
交换机崩溃是否致命	是	不是
可用带宽	固定	动态
可能拥塞的时间	在建立时	在每个包
潜在浪费带宽	是	不是
存储-转发传输	不是	是
收费	按分钟计	按包计

图 2-44 电路交换和数据包交换网络的比较

电路交换	电话
报文交换	电报
分组交换	IP 数据报

第二章 链路层

2.1 链路层结构

1. 逻辑链路控制层 LLC
2. 介质访问控制层 MAC

2.2 逻辑链路层 LLC

服务

1. 成帧
2. 差错控制（可靠数据传输）
3. 流量控制

2.3 成帧

字节计数	通过帧头指出字节数，很少用，出错了很难查出具体的出错位置
标志字节填充	通过 ESC 字符字节加标志分割的字节来界定，原始文件中的 ESC 前同样需要加 ESC 字节。PPP 协议使用标志字节填充
标志比特填充	开始和结束使用一个特殊的比特 01111110 也就是十六进制 7E 来分割，内部 bit 流如果出现 5 个 1 就在后面加一个 0
物理层编码违禁法	在物理层编码时（数据-> 数字信号符号），可能数字信号的符号数还有剩下的，比如 4B/5B 编码用 5 个 bit 一组的数字信号符号编码一个 4bit 的数据，还剩下 16 个数字信号符号没用，可以用来界定帧开始和结束，以太网使用。

2.4 差错控制

2.4.1 奇偶校验

校验位长度 1，加上校验位中 1 的个数为奇数为奇校验码，加上校验位中 1 的个数为偶数为偶校验码

奇校验：所有位数的异或的取反

偶校验：所有位数的异或

只能检出 1 位的错误，多位的不行，接收方通过计算校验码一样的算法计算出 0 或者 1，0 表示无错，1 表示有错

2.4.2 CRC 校验

使用给定的 G 生成多项式，用数据除这个生成多项式，使用模 2 除法，得到的余数是校验码
数据长度为 k ，校验码长度为 r ，生成多项式的长度为 $r+1$ 。实际计算中使用移位和异或

1. 数据左移 r 位
2. 生成多项式对齐数据的最高位（最高为 1 的位置）
3. 异或（此时数据的最高位会变成 0）
4. 重复 23 步直到数据的有效长度小于等于 r

检错能力：所有奇数个错，所有突发错误（从开始到结束的 bit 位长度小于等于 r ）

2.4.3 海明码

是一种分组多重偶校验，原数据位为 k 位，校验码长度 r 位，满足不等式 $k + r + 1 \leq 2^r$ ，这个式子表示校验码能表示的状态数应该大于等于校验后数据改变 1 位的状态（ $n = k + r$ ）加上数据原状态（1）

1. 计算校验码长度
2. 在原数据中找到每个校验码位所处位置 P ，所处位置是 2 的幂次，从左往右依次是 1 到 $k+r$ ，这个 P 也是偶校验码中所有位置的二进制表示中低 P 位为 1 的为为一组
3. 每组进行偶校验获得校验码填入校验位

例：数据 1101

1. 根据 $k + r + 1 \leq 2^r$ 有 $4 + r + 1 \leq 2^r$ ， $r = 3$ ，总共 7 位，位置 1(校验码 1) 位置 2(校验码 2) 位置 3(1) 位置 4(校验码 3) 位置 5(1) 位置 6(0) 位置 7(1)
2. 校验位分别占位位置 1 位置 2 位置 4，
3. 分组 1：位置 1(1)，位置 3(11)，位置 5(101)，位置 7(111)，校验码 $1 = 111 = 1$ ，分组 2：位置 2(10)，位置 3(11)，位置 6(110)，位置 7(111)，校验码 $2 = 101 = 0$ ，分组 3，位置 4(100)，位置 5(101)，位置 6(110)，位置 7(111)，校验码 $3 = 101 = 0$

最后的海明码为 1010101

接收放校验的时候也是一样的逻辑，然后对每组进行偶校验

标准海明码纠错 1 位检错 2 位

2.5 流量控制

停止等待协议和滑动窗口协议

2.6 可靠数据传输

协议	发送窗口大小	接受窗口大小	详细
停止等待协议	1	1	超时计时器，ack，帧编号
回退 N 帧协议	n	1	使用累计确认，有错重传上一个 ack 之后的帧片段
选择重传	n	n	使用 nak，只重传出错的帧

传输率 = 发送时间/一个发送周期的时间

停止等待协议	发送时间/发送时间 + 接收时间
回退 N 帧协议	n * 发送时间/(发送时间 + 接收时间)
选择重传	1

2.7 介质访问控制子层 MAC

在广播信道出现，多个设备共享同一条链路

2.7.1 静态介质访问控制

通过物理层的复用实现 (见上节)

2.7.2 动态介质访问控制

ALOHA

ALOHA	原始的动态介质访问控制，随机发送，有冲突后随机再发
时隙 ALOHA	信道分为等长时隙，只有在时隙开始时才能发送，发送一帧的时间小于等于时隙

CSMA

1 坚持 CSMA	信道空闲发送，信道忙则侦听至信道空闲
非坚持 CSMA	信道空闲发送，信道忙则随机等待一段时间再开始监听
p-坚持 CSMA	适用于时隙信道，信道空闲有 p 概率发送,1-p 概率到下一个时隙监听，信道忙则下一个时隙继续监听，

CSMA/CD

带冲突检测的 CSMD, 通过电压变化来检测冲突，发送时持续侦听。检测到碰撞后使用截断二进制指数退避算法。至少要 2 倍传播时延才能确定有没有冲突，争用期就是最小能检测到冲突的时间，也就是必须持续侦听 2 倍传播时延，即

最小帧长 = 把数据从网卡发送到链路的速度 (数据传输率) × 2 倍传播时延

截断二进制指数退避算法

- 1. 取争用期作为基本时间

2. 当前已重传次数为 n , $k = \min(10, n + 1)$, $r = rand(0, 2^{k-1})$
3. 取 r 倍的基本时间为推迟时间

CSMA/CA

碰撞避免。使用虚拟载波侦听，使用 RTS(Request To Send),CTS(Clear To Send) 来预约信道。发送方发送 RTS，接收方广播 CTS

2.8 以太网

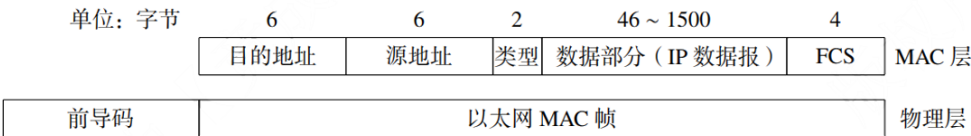


图 3.36 以太网 MAC 帧格式

只有以太网的帧地址目的地址在前源地址在后

2.9 802.11 无线网

使用正交频分复用 (OFDM)

1. 分布式模型
2. 自组织模型（用的很少）

2.9.1 帧间间隔

在监听到信道空闲后还需要等待一段时间才能发送帧，叫帧间间隔

SIFS (Shortest InterFrame Space)	优先级最高，CTS,ACK 帧使用
PIFS	在 PCF 模式下工作，介于 DIFS 和 SIFS
DIFS	正常数据帧和 RTS 帧使用

2.9.2 帧结构

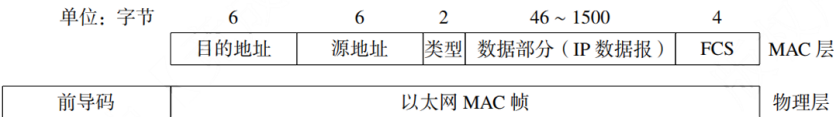


图 3.36 以太网 MAC 帧格式

DS 是 AP 背后的有线网络

Address 1	接收者地址	总是表示这一帧在当前传输阶段的直接接收者（即下一个要接收此无线电波的设备）。
Address 2	发送者地址	总是表示这一帧在当前传输阶段的直接发送者（即发出此无线电波的设备）。
Address 3	过滤/路由地址	这是最核心的地址。通常用于 AP 在无线和有线网络之间进行地址过滤或路由。在大多数情况下，它承载着最终目的地址或原始源地址。
Address 4	特殊情况下使用	仅在无线分布式系统中，数据在两个 AP 之间桥接时使用。

场景	To DS	From DS	场景描述	Address 1 (接收者)	Address 2 (发送者)	Address 3 (过滤/路由)	Address 4
1. 站到站	0	0	同一个 Wi-Fi 网络内的两个客户端直接通信 (Ad-hoc 模式, 或支持客户端直连)。	目的 MAC	源 MAC	BSSID	未使用
2. 客户端发送给 AP	1	0	客户端(如手机)发送数据给 AP, 目的是让 AP 将其转发到有线网络或另一个客户端。	AP 的 MAC	客户端 MAC	目的 MAC	未使用
3. AP 发送给客户端	0	1	AP 从有线网络收到数据, 将其发送给目标客户端。	客户端 MAC	AP 的 MAC	源 MAC	未使用
4. 无线中继 (WDS)	1	1	数据在两个 AP 之间进行无线桥接 (不常见)。	接收 AP 的 MAC	发送 AP 的 MAC	目的 MAC	源 MAC

注：BSSID（基本服务集标识符）通常就是 AP 的无线接口 MAC 地址。

2.10 交换机

交换机通过源 MAC 地址来学习填充交换表，如果目的地址不在交换表里面则广播除了发送地址接口的所有接口