

第三章 数据链路层

出错就丢 不可靠的

规程 = 协议

> 重点: 3.3 3.6 3.7

- 点对点信道：一对一通信
- 广播信道：一对多通信

3.1 数据链路层的基本概念

3.1.1 数据链路和帧

- **链路 / 物理链路 link**:
 - 一个节点**到相邻节点**的一段物理线路（有线/无线），**中间没有其他交换节点**。
 - 路径的一部分
- **数据链路 / 逻辑链路 data link**
 - 实现协议的软硬件 + 链路
- **帧**: **点对点信道** 数据链路层的 协议**数据单元**

点对点信道 通信的主要步骤

- 数据链路层把网络层交下来的**IP数据报添加首部和尾部，封装成帧**。
- 把封装好的帧，**发送**给对方的数据链路层。
- 对方的数据链路收到的帧**无差错**，则从收到的帧中**提取出IP数据报**交给上面的网络层；**否则，丢弃帧**。

3.1.2 三个基本问题

1. 封装成帧

- 原理：添加首部和尾部
- 作用：帧定界
- 帧的数据部分长度上限：最大传送单元 MTU Maximum Transfer Unit
- 帧定界符：
 - SOH Start of Header
 - EOT End of Transmission

2. 透明传输

- 透明：对传送的数据来说，帧定界符就好像不存在
- **字节填充 / 字符填充**：
 - 发送端：SOH / EOT / ESC 前插入转义字符 "ESC"
 - 接收端：删除转义字符

3. 差错检测

- 比特差错：0变1 1变0
- 检错技术：**循环冗余码CRC Cyclic Redundancy Check**

概念辨析

- 无比特差错：没有0和1的错误
- 无传输差错：没有帧丢失、帧重复、帧失序；没有比特差错。
- 可靠传输：没有帧丢失、帧重复、帧失序

3.2 组帧

- 组帧：在一段数据的前后分别添加首部和尾部
- 目的：使接收方能准确识别帧的边界（**帧定界**）

帧定界（帧同步）的方法

- 字节计数法
- 字符填充法
- 比特填充法
- 违法编码法

1. 字节计数法

- 思想：在帧头设置一个长度域，放置该帧的字节数，当收方收到帧后，通过帧的长度，确定帧的开始。
- 问题：长度域错误，帧同步完全丢失。

2. 字符填充法（掌握）

- 思想：使用特殊ASCII字符，作为首尾定界。
- 问题：如果出现与帧定界符一样的字符，产生区分结束点问题。
- 解决：数据段中的所有字符前，新增填充字符
- 缺点：传输二进制比特不变

Start of Header 0x01
End of Transmission 0x04
ESC 0x1B

例：以SOH为开始帧定界符，EOT为结束帧定界符。

SOH // ESC A / ESC A / ESC SOH / ESC C / ESC EOT / ESC ESC // EOT

3. 比特填充法（掌握）

- 思想：
 - 以特殊比特模式01111110作为起始和结束标志
 - 发送方发边查，每连续5个1后，插入0（修改）
 - 接受方边收边查，每联系5个1后，删除0（还原）
- 优点：通用性强

例：发送数据

1. 01011111 -> 010111110 //以5个1结尾，要加0

2. 011111100 -> 0111111000 //只有5个1，也要加0

4.违法编码法

- 思想：若物理截止上由荣誉码字，利用冗余定界。

3.3 差错控制

- 前向纠错
- 自动重发请求
- 若发送信息丢失，接收端收不到？
 - -> 发送端引入计数器，计时器时间到期，仍未收到应答。则默认丢失，进行重发。
- 若多发怎么办？
 - -> 为避免相同帧多次接收，对帧进行编号。
- 差错如何发现？
 - 检错码：奇偶校验码，CRC（CRC必考）
 - 纠错码：海明码（汉明码）

3.3.1 差错控制技术

*前向纠错 FEC - Forward Error Correction

- 应用：航天/航空，没有反向信道或反向传输时间很长的场合
- 优点：实时性好
- 缺点：传送效率低

*自动重复请求 ARQ – Automatic Repeat reQuest

- 原理：检测冗余位，正确/错误，给出应答，（重发）。
- 优点：设备简单，只重复无纠错
- 缺点：信息传递连贯性差

3.3.2 差错编码技术

差错编码

- 差错编码：数据块中插入冗余信息的过程
- 思想：使数据块中的比特信息形成管理，进行判断

检错码

- 构造
 - 检错码 = 信息位 + 冗余校验位
 - 码字长 $n = K$ (信息位位数) + r (校验位位数)
 - 编码效率 $R = K / n$

1. *奇偶校验码

- 奇校验：码字中'1'为奇数个。
- 偶校验：码字中'1'为偶数个。
- 奇偶校验码：
 - 水平奇/偶校验码
 - 垂直奇/偶校验码
 - 水平垂直奇/偶校验码（方阵校验）

*水平奇/偶校验

- 编码效率： $Q/(Q+1)$ (信息字段占Q个比特)

- 应用：
 - 异步传输：偶校验
 - 同步传输：奇校验

*垂直奇/偶校验

```
0111001|
0010101|
0101011|
1010101|
0101101 //校验位
```

- 编码效率： $PQ/P(Q+1)$ （假设信息分组占Q行P列）

*水平垂直奇/偶校验

- 编码效率： $PQ/(P+1)(Q+1)$ （假设信息分组占Q行P列）

2. 循环冗余码 CRC Cyclic Redundancy Check (重要!!!)

- > - 使用最广泛的检错码
- > - 漏检率低，实现简单
- 原理
 - 发送方，接收方实现约定一个除数K
 - 约定发送数据能被K整除
 - 接收方检测，若被K整除，则无差错；反之，出错。
- CRC（多项式编码）：每一串0和1，都对应多项式的系数。
 - $101101 \rightarrow \{x^5 + x^3 + x^2 + 1\}$

冗余码的计算（重要）

- 除数 P：生成多项式 $P(X)$ （确定的n+1位）
- 被除数：在数据位后面添加n个0，其中n是生成多项式位数-1(即最高幂次)
- 除法：做二进制除法，把减法当做模二加法，不进位。
- 冗余码 / 帧检验序列 FCS Frame Check Sequence：
 - 即余数，位数也是n位。把余数作为冗余码添加上在最后。
- 传输数据：源数据 + 冗余码

发送方用P生成冗余位

- 注意发送的是0 / 1序列，还是多项式

接收方用P进行校验

- $T(X)$ 传输帧多项式 / $P(X)$ 生成多项式
 - $\neq 0$ (除不尽)，则有错（1）
 - $= 0$ (除尽)，则无错或漏检（2）
- 漏检：只要选择位数足够的P，可以使得差错的概率足够小。

CRC算法解题思路

1. 已知：信息多项式 $M(X)$ ，生成多项式 $P(X)$
求：传送的信息序列
 - + 多项式与二进制代码的对应关系
 - + 求出余数
 - 根据 $P(X)$ 得到 n
 - 二进制除法
2. 求某个比特出错时，接收方能否检验出来
 - 用接收到的序列/生成多项式，看余数是否为0

3.信源编码和信道编码

- 信源编码：无失真的压缩信息
- 信道编码

汉明码

- 汉明码属于**信道编码**，是**纠错码**
- 码距（汉明码距离）：不同二进制的位数个数
- 编码系统的码距：整个编码系统中任意两个码字的最小距离。

两个结论

- 如果要检测出 d 个比特的错，则编码的汉明距离至少为 $d+1$ 。
- 如果要纠正 d 个比特的错，则编码集的汉明距离至少为 $2d+1$ 。

1. 对于3位的汉明码，若要检测出1个比特的错，汉明编码的距离至少为2。（留空间）

例：000,011,101...都有着不同的含义。如果有一位写错，000变为001，则001并不是有效的汉明编码。因此可以检错。如果只有一位，那么每一个编码

- 2.（可二分）只有对于存在距离更近的汉明码，才能够实现纠错。



发送方冗余位计算

- $2^r \geq K + r + 1$

若 $k = 5$ ，则 $r = 4$

汉明码计算

- 确定校验比特和信息比特的位置
- 将每个信息比特的位置写成2的次幂之和的形式

3.4 点对点协议 PPP

3.4.1 PPP协议的特点

组成

- 数据部分 IP数据报
- 链路控制协议 LCP Link Control Protocol
- 网络控制协议 NCP Network Control Protocol

3.2.2 PPP协议格式

1. 字段含义

F标志 + A地址 + C控制 + 协议 + 信息部分（IP数据报）+FCS + F标志

透明传输问题

字节填充法

- 出现每一个(7D5E = 7E), (7D5D = 7D)

编码后数据:

7D 5E EE FE 26 7D 5D 5D 7D 5D 7D 5E
(7E) EE FE 26 (7D) 5D (7D) (7E)

比特填充法

- 发送方: "11111" + 0
- 接收方: "111110" - 0

3.2.3 PPP 工作状态

- 设备之间无连接
- 物理链路
- LCP链路
- 已鉴别的LCP链路
- 已鉴别的LCP链路和NCP链路

3.5 使用广播信道的数据链路层

3.5.1 局域网的数据链路层

特点

- 网络为一个单位所拥有，且地利范围和站点数目均有限。

优点

- 具有**广播**功能。共享软硬件资源
- 便于系统的**扩展**和**演变**，设备的位置可灵活调整和改变。
- 提高系统的**可靠性**、**可用性**和**生存性**。

拓扑分类

- 星形网
- 环形网
- 总线网

局域网信道分配策略

- 静态划分信道：代价高，局域网不适用
- **动态媒体接入控制 / 多点接入**：
 - 随机接入：**随机**发送信息，若**产生碰撞**，则**解决碰撞**。

- 特点：信道利用率低、网络延迟短
- 适用：以太网；卫星通讯
- 受控接入：发送信息服从统一控制。

1. 以太网两个主要标准

- 逻辑链路控制 LLC Logical Link Control
- 媒体接入控制 **MAC** Medium Access Control :
 - 与接入媒体传输相关内容

2. 适配器的作用

- 适配器：计算机与外界局域网连接的工具
 - **网络接口卡 / 网卡 NIC** Network Interface Card
- 适配器 - 局域网： 电缆 / 双绞线 串行传输
- 适配器 - 计算机： I/O总线 并行传输
- 存储器：计算机软件地址 IP地址
- 适配器：计算机硬件地址 MAC地址

网卡作用

- 进行串行/并行转换。
- 对数据进行缓存。
- 实现以太网协议。
- 在计算机的操作系统安装设备驱动程序。

3.5.2 CSMA/CD 协议

总线一对一通信

- 每台计算机适配器 有 独有的地址
- 发送：帧首部 写 接收地址
- 接收：仅目的地址 可以接收
- 不匹配，则丢弃

两种方式

- 无连接：不编号，不要求确认信息
- 曼彻斯特编码

CSMA / CD 协议

- Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection 载波监听多点接入/碰撞检测
 - 载波监听：边发送边监听
 - 碰撞检测/冲突检测： 有多个站同时发送，则及时停止

- > - 有人发送，要等待，无人发送，可以发送。
- > - 但不能完全避免碰撞。
- > 例如：从A->B发送数据，数据从A发送的过程中，B端也发送数据，会产生冲突。

如何检测冲突

争用期

- 争用期（碰撞窗口）： 2τ 【用于确定最短有效帧长】
- 最短有效帧长： $2\tau * \text{带宽 (M bps)}$
- 无效帧：长度小于最短有效帧长的帧

以太网的争用期： $51.2\mu\text{s}$

检测到碰撞后 重传

二进制指数退避算法

1. 令基本退避时间 $T=2\tau$ （即争用期）； **$51.2\mu\text{s}$**
2. $k=\min[\text{重传次数}, 10]$ ；（ **k 最大为10**）
3. r =在 $[0, 1, \dots, (2^k-1)]$ 中随机取一个数；
4. 退避时间= rT 。
5. 超过16次，则丢弃，并报告

最短帧长

- 64 字节 512比特
- 数据过短，则加入填充字符
- 小于64字节，认为是废弃，丢弃。

强化碰撞

- 发生碰撞，则发送32比特/48比特人为干扰信号

小结

特点

- 先听后讲
- 边讲边听
- 冲突停止
- 随机等待

判断

- CSMA/CD一定可以减少争用型总线上的冲突（ \times ）

3.5.3 使用集线器的星型拓扑

- 集线器
 - 工作在物理层
- 以太网 10BASE-T 双绞线
 - 10： 10Mbit/s
 - BASE： 基带信号
 - T: 双绞线

3.5.4 以太网的信道利用率

- 参数 $a=\tau$ (传播时延) / T_0 (发送时间)
- $T_0 = L$ (bit 帧长) / C (bit/s 数据发送速率)
- a 越小，利用率越高

- 判断：
 - 当数据率一定时，以太网的连线的长度受到限制，否则 τ 的数值会太大。
 - 以太网的帧长不能太短，否则 T_0 的值会太小，使 a 值太大。

3.6 以太网的MAC层

3.6.1 以太网的标准

1. MAC层的硬件地址

- 硬件地址 = 物理地址 = MAC地址（6字节）= 适配器地址 / 适配器标识符
- 注册管理机构 RA Registration Authority:分配 **前3字节**
 - 组织唯一标识符 OUI Organizationally Unique Identifier / 公司标识符 compan_id
- 第一字节 最低有效位：I/G Individual/Group
 - 0：单个地址站
 - 1：组地址
- 网卡地址或网卡标识符常写为：EUI-48

网卡检查MAC地址

- 单播帧：一对一
- 广播帧：一对全体
- 多播帧：一对多

2. MAC 帧格式

- 以太网V2的格式（5个字段）
- MAC帧 = 【同步码】（8）+ 目的地址（6）+ 源地址（6）+ 类型（2）+ 数据字段（46-1500）+ FCS（4）
 - 类型：标志上一层用的是什么协议
 - 数据字段：最短46 = 64（以太网的最短有效帧）- 18（必有）
 - 同步码：实现比特同步
 - 前同步码（7）+ 帧开始定界符（1）
- 无效MAC帧：直接丢弃，无需重传。
 - 帧长度 非整数字节
 - FCS有差错
 - 数据字段不在 46 - 1500 之间

最小帧间隔

- 最小间隔为 9.6 μs ，相当于 96 bit 的发送时间。

格式无需默写，需要知道

3.7 扩展的以太网

3.7.1 物理层扩展以太网

- 本质：不同的协议层次上实现协议的彼此转换。

- 互联设备
 - 交换机（重点）
 - 中继器（重发器）
- 连接两个同轴电缆以太网，将信号放大整形后，以延伸网络的传输距离。
- 不具有信号通路的选择功能

集线器

- 多个站点连接在同一个总线上。
- 冲突域（碰撞域）：同一时间，仅有一个站发送数据
- 优点：
 - 不同碰撞域的局域网上的计算机能互联互通
- 缺点：
 - 总吞吐量没有提高。
 - 数据率不一致，不能连接。
 - 不能交换。

3.7.2 数据链路层扩展以太网

网桥和交换机

- 网桥：根据收到帧 MAC地址的 目的地址 进行 **转发** 和 **过滤**
- 交换式集线器/第二层交换机/交换机：**数据链路层** 工作
- 交换机接口 -> 主机；网桥接口 -> 网段。

网桥分类

- 固定路由网桥
- 透明网桥（使用最多）
- 源路由网桥

1. 以太网交换机放入特点

- 实质：**多接口**的网桥
- **全双工方式**
- 并行性：能同时连通多对接口，使多对主机能同时通信。
- 特点：
 - 即插即用设备，其内部的帧交换表（又称为地址表）是通过自学习算法自动地逐渐建立起来的。
- 优点：
 - 用户独享带宽，增加了总容量
 - 价格低
- 交换方式
 - 存储转发方式
 - 直通方式

2. 以太网交换机的自学习功能

- 无路径，记录**出发**路径（源地址 + 端口号）
- 广播找**接收**路径，不匹配丢弃，匹配则记录

生成树协议 STP Spanning Tree Protocol

- 切断链路，解决回路问题

3.7.3 虚拟局域网 VLAN Virtual LAN

- VLAN：给用户提供一种服务，不是一种新型的局域网
- MAC帧格式：
 - 目的地址 (6) + 源地址 (6) + **VLAN标记(4)** + 类型 (2) + 数据 (46-1500) + FCS
 - VLAN标记：长度/类型 = 802.1Q标记类型(2字节 固定) + 标记控制信息 VID (2字节)
- max：1522 (普通的 1518)
- 优点：
 - 安全性好
 - 网络分段：逻辑分段，与物理位置无关。
 - 灵活性好

3.8 高速以太网

- 高速以太网：>= 100 Mb/s 的以太网

3.8.1 100BASE-T 以太网

- 快速以太网 Fast Ethernet：100 BASE-T 以太网
- 双绞线 100 Mb/s 基带信号 星型拓扑以太网
- IEEE802.3 的 CSMA/CD 协议
- 帧间时间间隔：0.96 μ s

3.8.2 吉比特以太网

- 允许在 1 Gb/s 下全双工和半双工两种方式工作。
- 使用 802.3 协议规定的帧格式。
- 在半双工方式下使用 CSMA/CD 协议（全双工方式不需要使用 CSMA/CD 协议）。
- 与 10BASE-T 和 100BASE-T 技术向后兼容
- 载波延伸(carrier extension)：增加到512比特 填充