

第四章介质访问控制子层（二）

袁华 hyuan@scut.edu.cn

华南理工大学计算机科学与工程学院

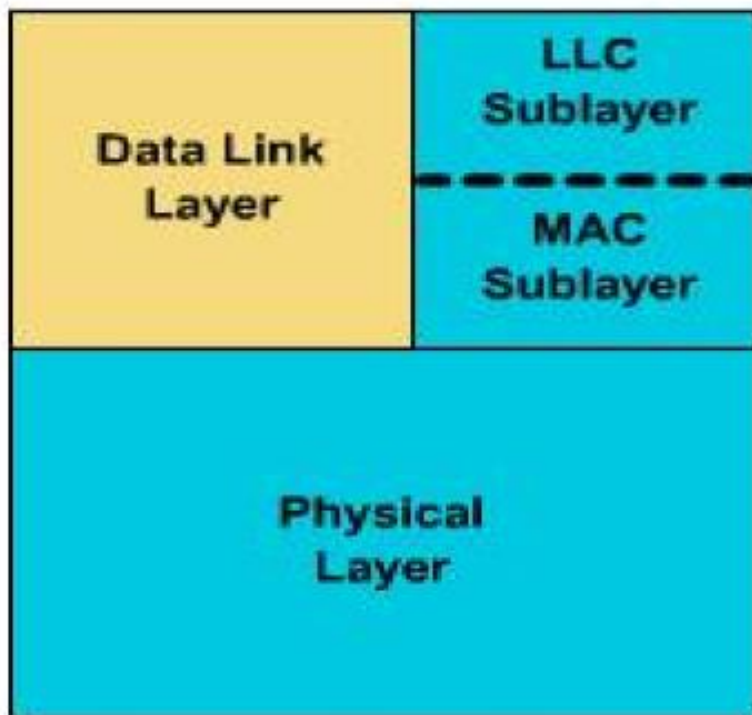
广东省计算机网络重点实验室

本节主要内容（4.3节）

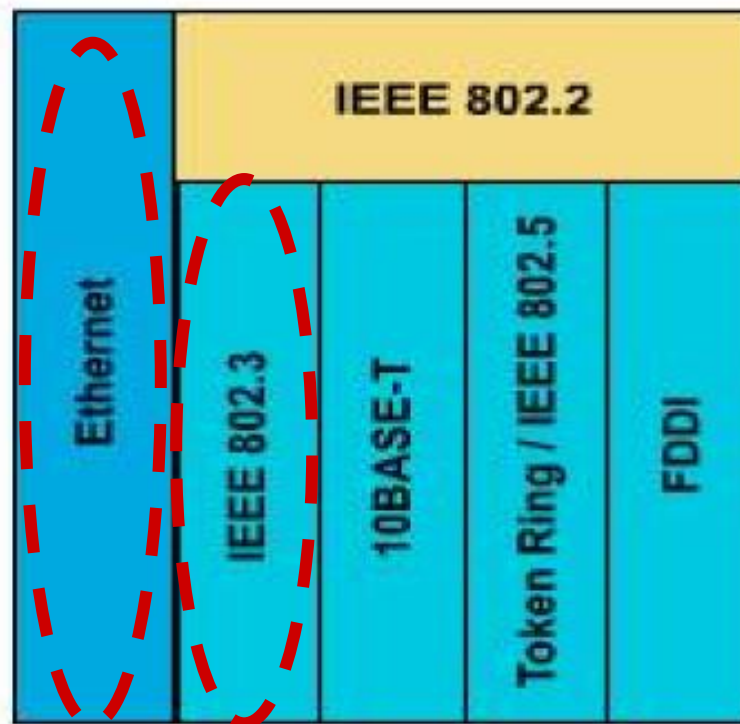
- 了解**IEEE802**系列标准
- 掌握以太网/**IEEE802.3**工作原理
- 理解以太网/**IEEE802.3**帧格式
- 了解各种以太网的技术特点

IEEE802.3/以太网和OSI参考模型

OSI Layers



LAN Specification



以太网的发展史

- **Robert Metcalfe**及其同事设计了以太网雏形（施乐公司）
- **1980**年，**DIX**发布最早的以太网标准，**开放**标准
- **1985**年，**IEEE802.3**对以太网作了小的修改，基本一致，兼容
- **1995**年，**IEEE**宣布了**100Mbps**以太网标准
- **1998**年和**1999**年，吉比特以太网标准（**1000M**）
- **2002**年，**IEEE**通过了**10Gbps**以太网标准

Ethernet Standard	Date	Description
Experimental Ethernet	1973 ^[1]	2.94 Mbit/s (367 kB/s) over coaxial cable (coax) bus
Ethernet II (DIX v2.0)	1982	10 Mbit/s (1.25 MB/s) over thick coax. Frames have a Type field. This frame format is used in the protocol suite .
IEEE 802.3 standard	1983	10BASE5 10 Mbit/s (1.25 MB/s) over thick coax. Same as Ethernet II (above) except Type field follows the 802.3 header. Based on the CSMA/CD Process.
802.3a	1985	10BASE2 10 Mbit/s (1.25 MB/s) over thin Coax (a.k.a. thinnet or cheapernet)
802.3b	1985	10BROAD36
802.3c	1985	10 Mbit/s (1.25 MB/s) repeater specs
802.3d	1987	Fiber-optic inter-repeater link
802.3e	1987	10BASE5 or StarLAN
802.3i	1990	10BASE-T 10 Mbit/s (1.25 MB/s) over twisted pair
802.3j	1993	10BASE-F 10 Mbit/s (1.25 MB/s) over Fiber-Optic

802.3j	1993	10BASE-F 10 Mbit/s (1.25 MB/s) over Fiber-Optic
802.3u	1995	100BASE-TX, 100BASE-T4, 100BASE-FX Fast Ethernet at 100 Mbit/s (12.5 MB/s) w/au
802.3x	1997	Full Duplex and flow control; also incorporates DIX framing, so there's no long
802.3v	1998	100BASE-T2 100 Mbit/s (12.5 MB/s) over low quality twisted pair
802.3z	1998	1000BASE-X Gbit/s Ethernet over Fiber-Optic at 1 Gbit/s (125 MB/s)
802.3-1998	1998	A revision of base standard incorporating the above amendments and errata
802.3ab	1999	1000BASE-T Gbit/s Ethernet over twisted pair at 1 Gbit/s (125 MB/s)
802.3ac	1998	Max frame size extended to 1522 bytes (to allow "Q-tag") The Q-tag includes 802
802.3ad	2000	Link aggregation for parallel links, since moved to IEEE 802.1AX
802.3-2002	2002	A revision of base standard incorporating the three prior amendments and errata
802.3ae	2002	10 Gigabit Ethernet over fiber; 10GBASE-SR, 10GBASE-LR, 10GBASE-ER, 10GBASE-SW,



802.3bw		100BASE-T1 - 100 Mbit/s Ethernet over a single twisted pair for automotive applications
802.3-2015	2015	802.3bx - a new consolidated revision of the 802.3 standard including amendments 802.2bk/bj/bm
802.3by	~Sep 2016	25 Gbit/s Ethernet ^[3]
802.3bz	~Aug 2017 ^[4]	2.5 Gigabit and 5 Gigabit Ethernet over Cat-5/Cat-6 twisted pair - 2.5GBASE-T and 5GBASE-T

Robert Metcalfe 梅特卡夫

- 1969, MIT本科毕业, 双学位
- 1970年, 哈佛大学硕士学位
- 1973年, PhD, 哈佛大学
 - 第二次通过答辩, 以ALOHA为基础
- 1973年起, [Xerox](#) 工作
- May 22, 1973 , 以太网誕生日
 - November 11, 1973 (David Boggs)
- 1979年, 离开施乐, 创建3COM
- 1990年, 被迫离开3COM
- 专栏作家、投资家。。。。。

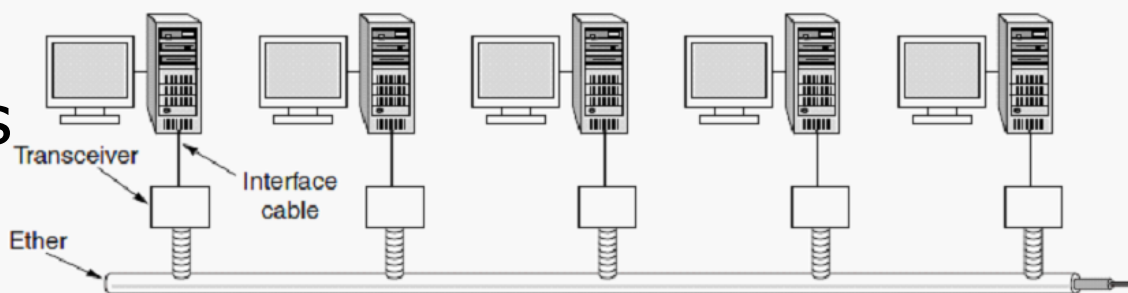


2 种以太网_{P216}

□ 经典以太网

- 3M~10Mbps

- 不再使用



□ 交换式以太网

- 10M,100M,1G

- 广泛使用

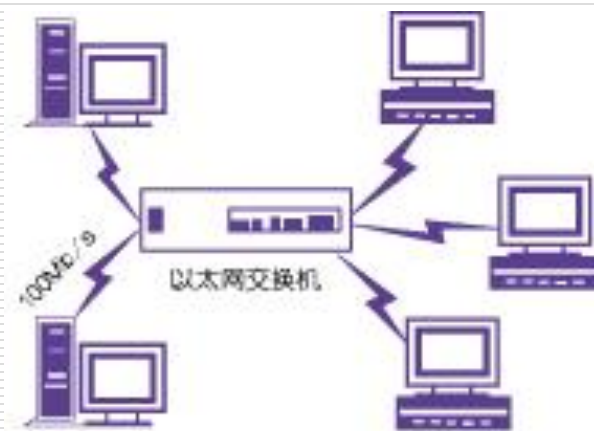


图4 交换式以太网

IEEE以太网命名规则

□ 10Base2 (IEEE 802.3a)

- -10: 传输带宽 (单位Mbps)
- -Base: 基带传输
- -2 (或5): 支持的分段长度 (100米为单位, 四舍五入)

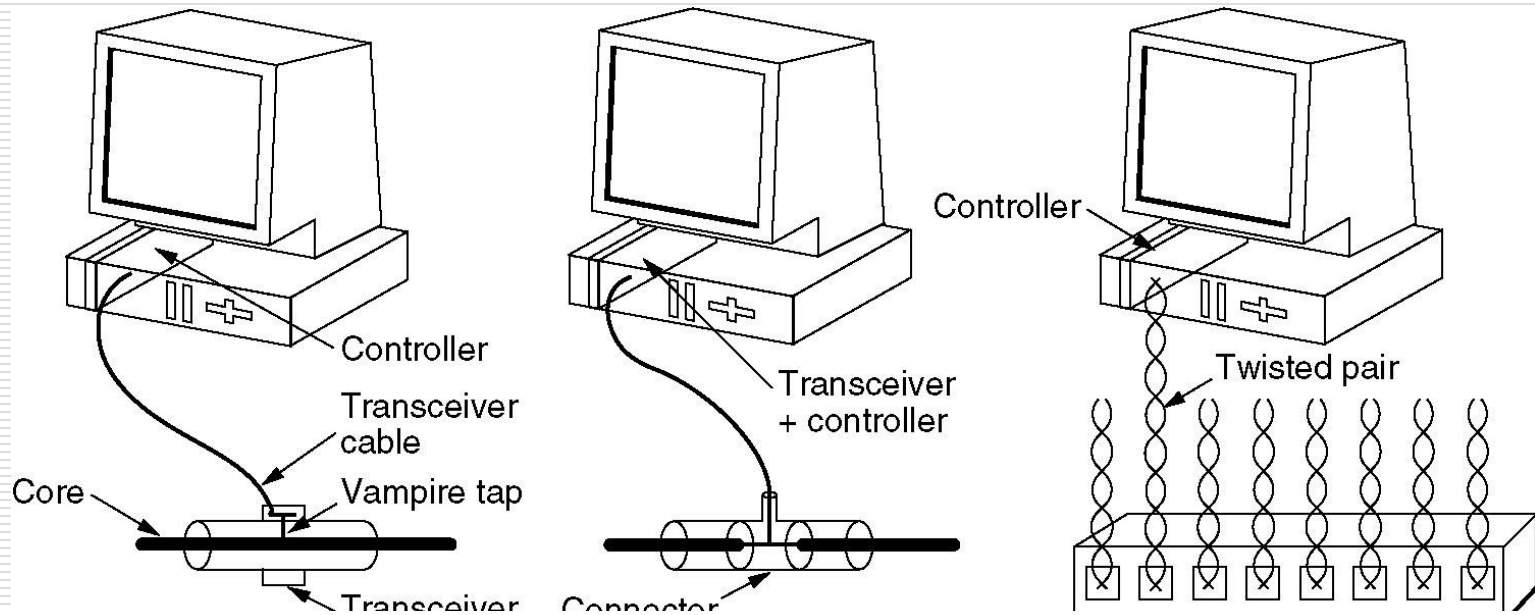
□ 10Base-TX (IEEE 802.3X)

- -T: 铜制非屏蔽双绞线
- -F: 表示光缆

以太网线缆

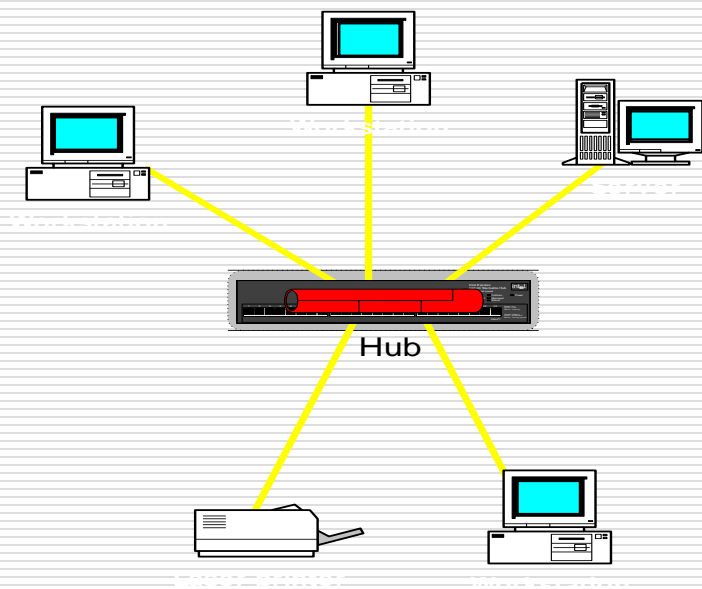
名称	电缆	最大区间长度	节点数/段	优点	接口
10Base5	粗缆	500m	100	用于主干	AUI
10Base2	细缆	200m(185)	30	廉价	BNC
10Base-T	双绞线	100m	1024	易于维护	RJ-45
10Base-F	光纤	2km	1024	用于楼间	ST

以太网连接方式的比较图示

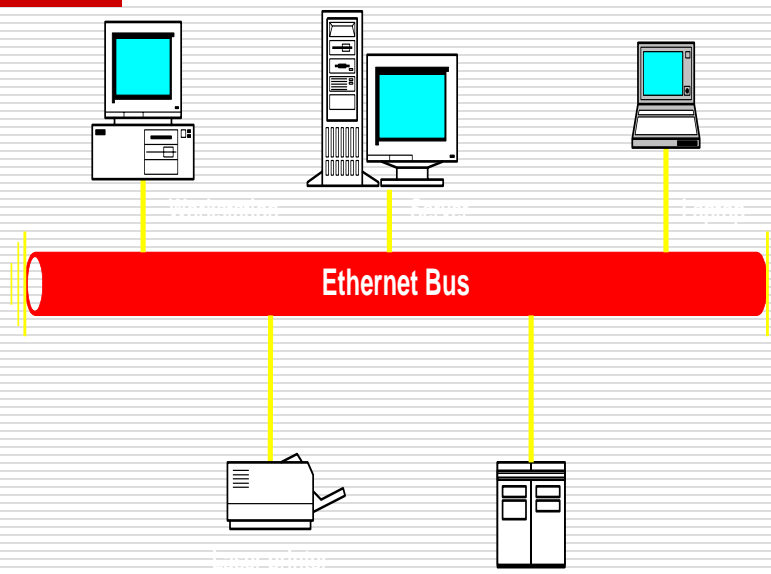


Name	Cable	Max. seg.	Nodes/seg.	Advantages
10Base5	Thick coax	500 m	100	Original cable; now obsolete
10Base2	Thin coax	185 m	30	No hub needed
10Base-T	Twisted pair	100 m	1024	Cheapest system
10Base-F	Fiber optics	2000 m	1024	Best between buildings

10Base-T的拓扑结构



物理结构



逻辑结构

- 物理连接是星型/扩展星型结构
- 逻辑上是总线结构（站点争用总线）

10BaseT的特点

□ 与同轴电缆相比的优点

- 安装成本大大降低
- 即插即用，组网灵活
- 星型结构，故障隔离
- 适于大批量制造
- 具有开放式标准的互操作能力

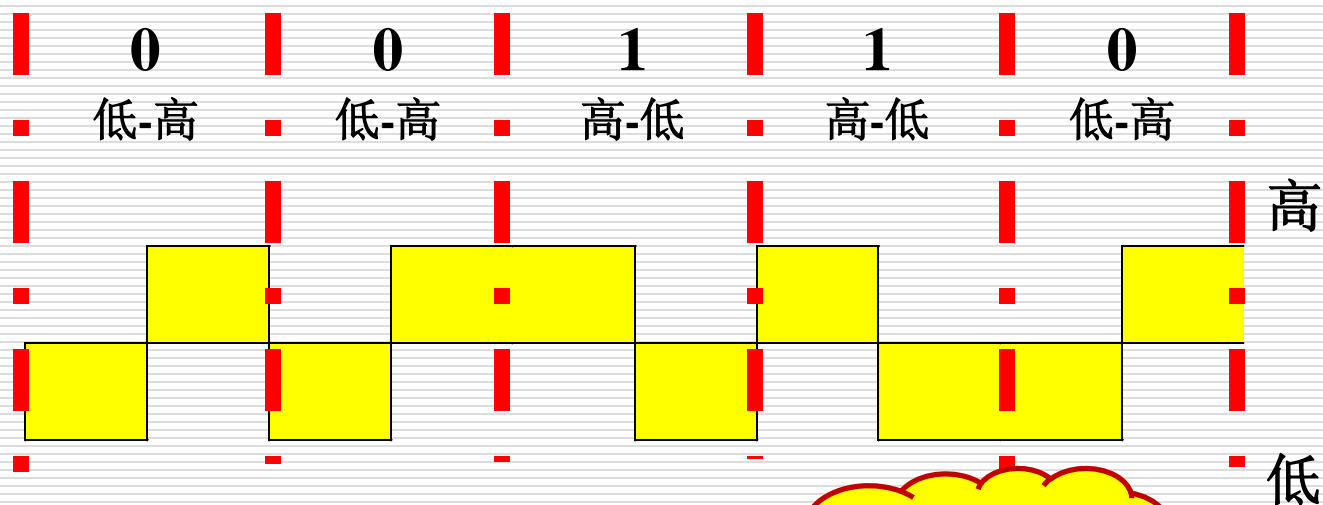
□ 问题

- 多用户共享一条10M速率信道

以太网编码

- 以太网采用曼彻斯特编码
 - 1: 高电压到低电压
 - 0: 低电压到高电压
 - 电压值
 - +0.85 volt: high signal
 - -0.85 volt: low signal
 - 0 volt: DC value
- 差分曼彻斯特编码
 - 802.5采用

曼彻斯特编码



悬赏!

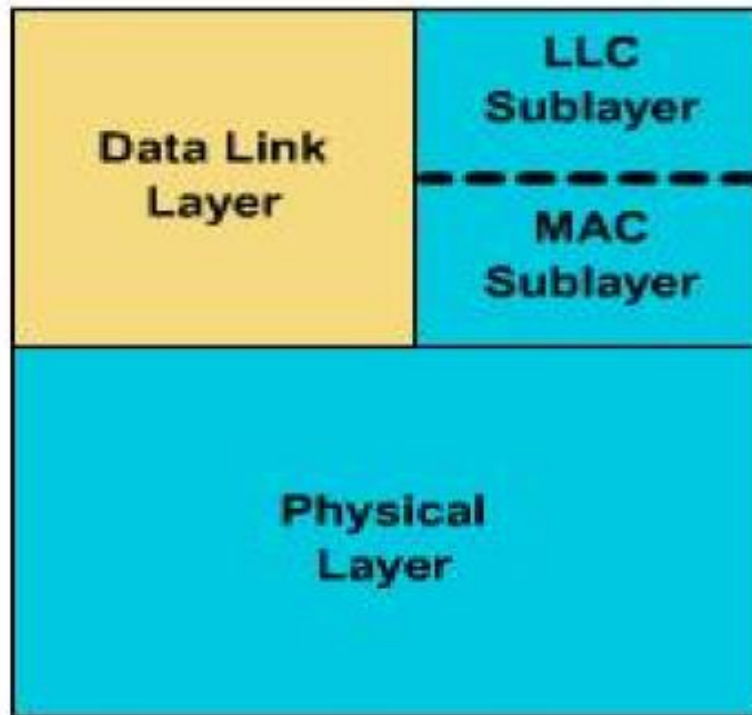
- 比特率 $b = 10 \text{ Mbps}$
- 波特率 $B = 20 \text{ MHz}$ (信号的变化频率)

IEEE 802 标准

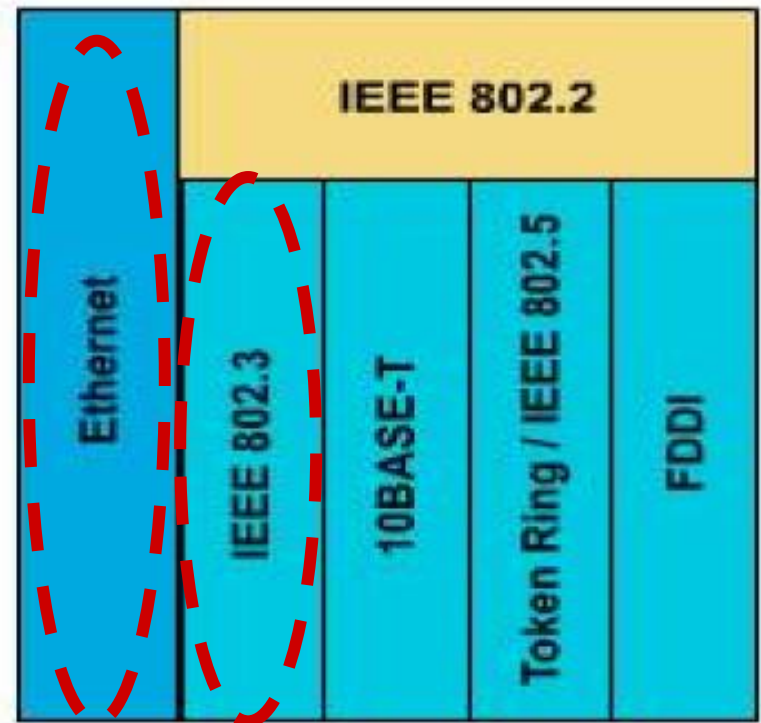
Number	Topic
802.1	Overview and architecture of LANs
802.2 ↓	Logical link control
802.3 *	Ethernet
802.4 ↓	Token bus (was briefly used in manufacturing plants)
802.5	Token ring (IBM's entry into the LAN world)
802.6 ↓	Dual queue dual bus (early metropolitan area network)
802.7 ↓	Technical advisory group on broadband technologies
802.8 †	Technical advisory group on fiber optic technologies
802.9 ↓	Isochronous LANs (for real-time applications)
802.10 ↓	Virtual LANs and security
802.11 *	Wireless LANs
802.12 ↓	Demand priority (Hewlett-Packard's AnyLAN)
802.13	Unlucky number. Nobody wanted it
802.14 ↓	Cable modems (defunct: an industry consortium got there first)
802.15 *	Personal area networks (Bluetooth)
802.16 *	Broadband wireless
802.17	Resilient packet ring

以太网所处的层次

OSI Layers



LAN Specification



IEEE 802.3/以太网MAC子层协议

- **IEEE802.3**协议描述了运行在各种介质上**1 Mb/s~10 Mb/s**的**1-持续CSMA/CD**协议的局域网标准。
- 很多人对以太网和**IEEE802.3**不加区分，但二者确有差别（如帧格式）。

IEEE 802.3和以太网帧的比较^{P218}

• 以太网的帧结构

7	1	2/6	2/6	2	0~1500	0~46	4
先导字段		目的地址	源地址		数 据	填充字符	校验和
10101010	↑			↑			

帧开始字符10101010

类型：表示上层使用的协议
如IP协议为2048

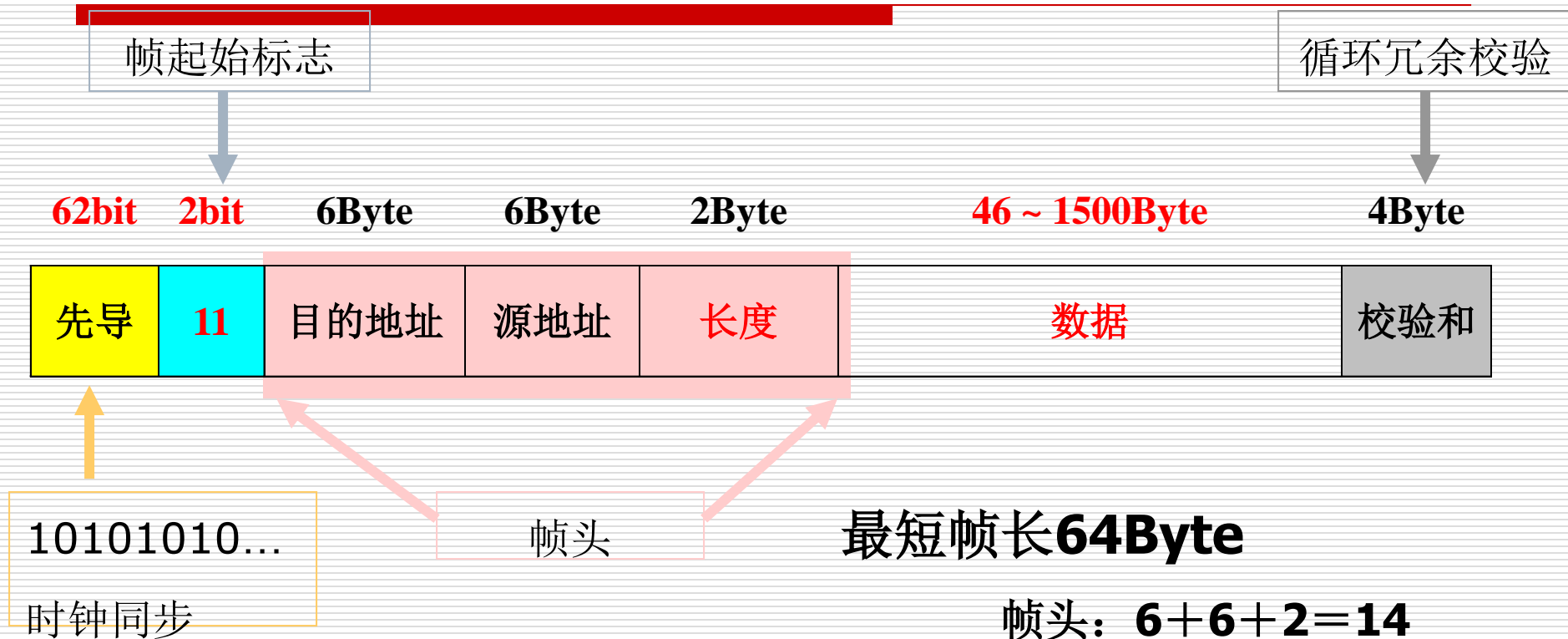
• 802.3的帧结构

7	1	2/6	2/6	2	0~1500	0~46	4
先导字段		目的地址	源地址		数 据	填充字符	校验和
10101010	↑			↑			

帧开始字符10101011

数据字段长度

IEEE802.3帧格式



帧结构的各个字段含义 (1/3)

□ 前导码与帧起始字段

- **前导码**：7个字节，**10101010...101010**比特序列。
- **帧起始符**：1字节，**10101011**。

□ 目的地址和源地址字段

- 地址字段长度：2个字节或6个字节 。
- 目的地址类型：
 - 单一结点地址（**unicast address**）；
 - 组播地址（**multicast address**）；
 - 广播地址（**broadcast address**）。

帧结构的各个字段含义 (2/3)

□ 6字节的MAC地址（48位）

■ P218组播标志位：第40位

■ IP组播地址：01: 00: 5E: XX: XX: XX

位	47	46	45.....41	40	39.....24	23.....0
	制造厂商标识	全局/局部地址标志	制造厂商标识	组播标志位	制造厂商标识	系列号

■ 组播地址只能做目的地址

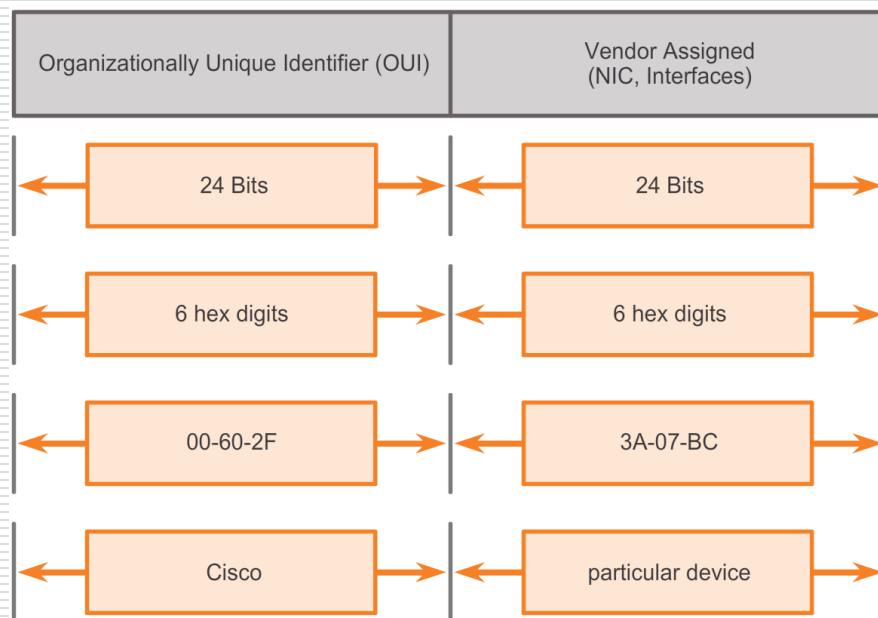
物理地址（MAC地址）

- ❑ 地址数约 7×10^{13} ，7万亿个。
- ❑ Ethernet地址 = Manufacture ID + NIC ID=24bit (OUI)+ 24bit

- ❑ 前24位例子：

公司：Cisco 00-00-0c
Novell 00-00-1B、
3Com 00-20-AF、
IBM 08-00-5A

- ❑ 典型的Ethernet地址：
00-60-8C-01-28-12



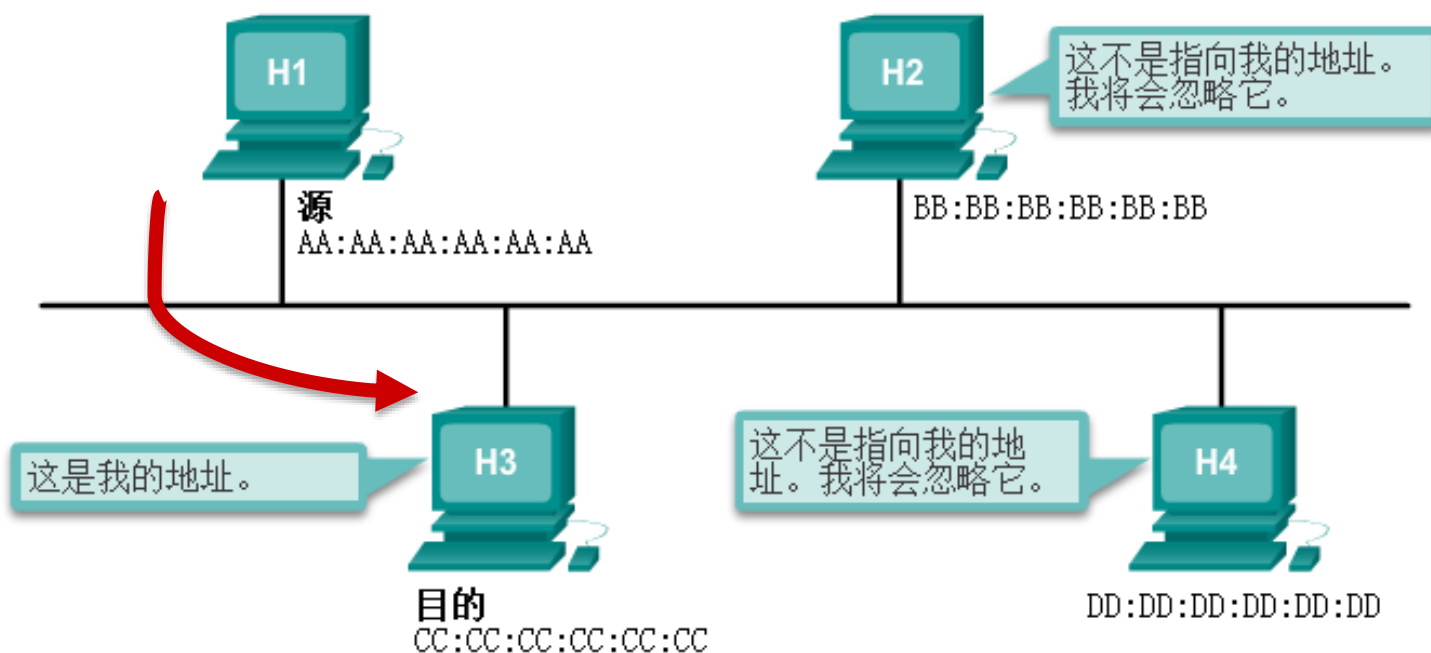
注意1

□ P218

- 工作站的源地址有个有趣的特性，那就是它的**全球唯一性（globally unique）**，由**IEEE**分配，保证世界上没有两个工作站具有的**MAC**地址是相同的
- 当一台计算机启动时，**MAC**地址从**ROM**拷贝到**RAM**

注意 2

目的地址	源地址	数据
CC:CC:CC:CC:CC:CC	AA:AA:AA:AA:AA:AA	封装的数据
帧寻址		



注意3

□ MAC地址的3种表示

使用破折号 00-60-2F-3A-07-BC

使用冒号 00:60:2F:3A:07:BC

使用句点 0060.2F3A.07BC

□ IEEE 要求厂商遵守两条简单的规定：

- 必须使用该供应商分配的**OUI**作为**前3个字节**
- **OUI相同**的所有MAC地址的**最后3个字节**必须**分配**唯一的值

帧结构的各个字段含义 (3/3)

□ 长度字段 P219

帧的最小长度为**64**字节，最大长度为**1518**字节，不包括前导码。

□ 数据字段

LLC数据字段是帧的数据字段，长度最小为**46**个字节，如果少于**46**个字节，需要填充。

□ 帧校验字段

采用**32**位的**CRC**校验

校验范围：目的/源地址、长度、LLC数据等字段。

类型/长度字段 P219

□ 在DIX以太帧中, **type** 字段指明上层网络协议的类型

■ DIX以太帧是事实上的使用标准, 通常抓取到的报文都是以太帧, 该字段是类型字段。

□ 在IEEE 802.3帧中, **length** 字段指明了携带的数据的长度。

□ 怎么区分到底代表 **类型** 还是 **长度** 呢?

■ 检查这个字段的数值: 如果小于等于 **1536(0x600)**, 则是长度 (**802.3**) 字段, 如果大于 **1536**, 则表示类型 (**DIX**) 字段。

```
⊕ Frame 8 (74 bytes on wire, 74 bytes captured)
⊖ Ethernet II, Src: Cisco_67:8c:00 (00:12:44:67:8c:00), Dst: LgElectr_0f:34:6b (00:e0:91:0f:34:6b)
    Destination: LgElectr_0f:34:6b (00:e0:91:0f:34:6b)
    Source: Cisco_67:8c:00 (00:12:44:67:8c:00)
    Type: IP (0x0800)
⊕ Internet Protocol, Src: 202.38.192.101 (202.38.192.101), Dst: 202.112.18.89 (202.112.18.89)
⊕ Transmission Control Protocol, Src Port: 44868 (44868), Dst Port: 3000 (3000), Seq: 0, Ack: 0, Len: 0
```

为什么有效帧长度 ≥ 64 Byte? P219

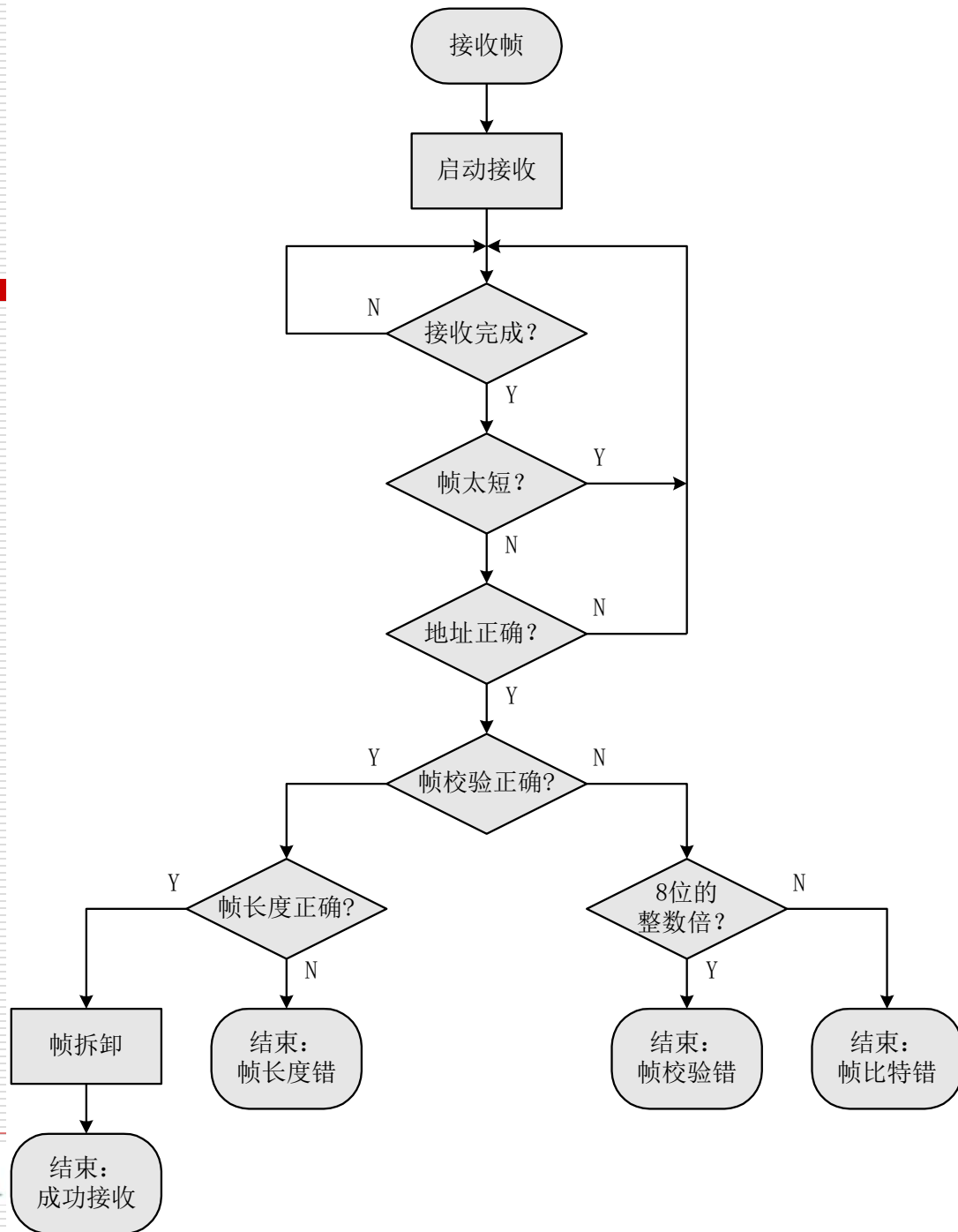
□ CSMA/CD的要求

- 最短帧的发送时间 \geq 争用时隙 2τ

□ 以太网（802.3）规定，在10Mbps局域网中

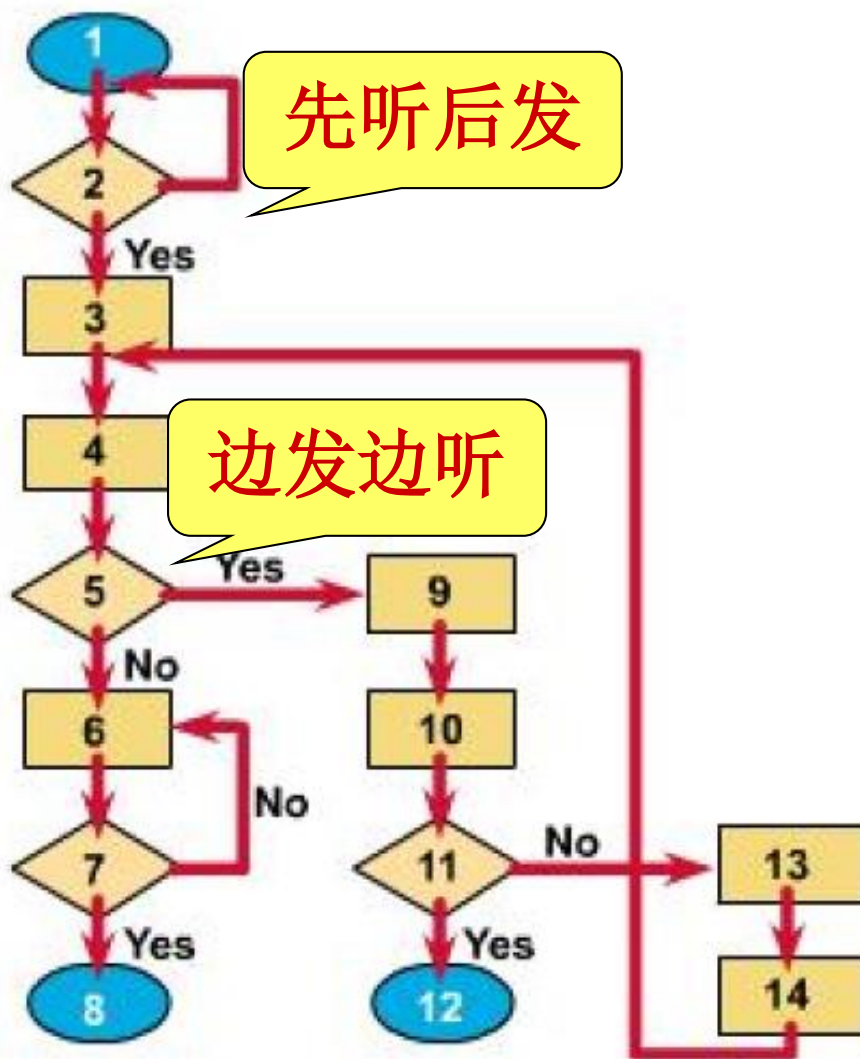
- 时隙： $2\tau = 51.2$ 微秒
- 最短帧长度： $10\text{Mbps} \times 2\tau / 8 = 64$ Byte
- 或者： $(51200/100\text{ns}) / 8 = 64\text{Byte}$

以太网工作站接收数据流程



以太网介质访问控制技术(CSMA/CD)

1. Host wants to transmit
2. Is carrier sensed?
3. Assemble frame
4. Start transmitting
5. Is a collision detected?
6. Keep transmitting
7. Is the transmission done?
8. Transmission completed
9. Broadcast jam signal
10. attempts = attempts + 1
11. attempts > too many?
12. Too many collisions; abort transmission
13. Algorithm calculates backoff
14. Wait for t seconds



二进制指数后退算法P220

- 发送方在检测到冲突后，双方（或多方）都将延时一段时间，那么这段时间到底是多长？
- 冲突检测到后，时间被分成离散的时隙
- 时隙的长度等于信号在介质上来回传输时间
(**$51.2\mu\text{s}$**)
- 一般地， **i** 次冲突后，等待的时隙数将从 (**$0 \sim 2^i - 1$**) **$\times 51.2\mu\text{s}$** 中随机选择。

随机等待的时间_{P221}

Retry Random Time Range

1	$2^1-1 = 0 \dots 1 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
2	$2^2-1 = 0 \dots 3 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
3	$2^3-1 = 0 \dots 7 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
4	$2^4-1 = 0 \dots 15 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
5	$2^5-1 = 0 \dots 31 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
6	$2^6-1 = 0 \dots 63 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
7	$2^7-1 = 0 \dots 127 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
8	$2^8-1 = 0 \dots 255 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$

Retry Random Time Range

9	$2^9-1 = 0 \dots 511 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
10	$2^{10}-1 = 0 \dots 1023 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
11	$2^{11}-1 = 0 \dots 1023 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
12	$2^{12}-1 = 0 \dots 1023 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
13	$2^{13}-1 = 0 \dots 1023 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
14	$2^{14}-1 = 0 \dots 1023 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
15	$2^{15}-1 = 0 \dots 1023 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$
16	$2^{16}-1 = 0 \dots 1023 \times 51.2_{\mu\text{sec}}$

注意

□ i 次冲突后时间片为:

■ $0 < i \leq 10$ 时, 取 $(0 \sim 2^i - 1) \times 2T$

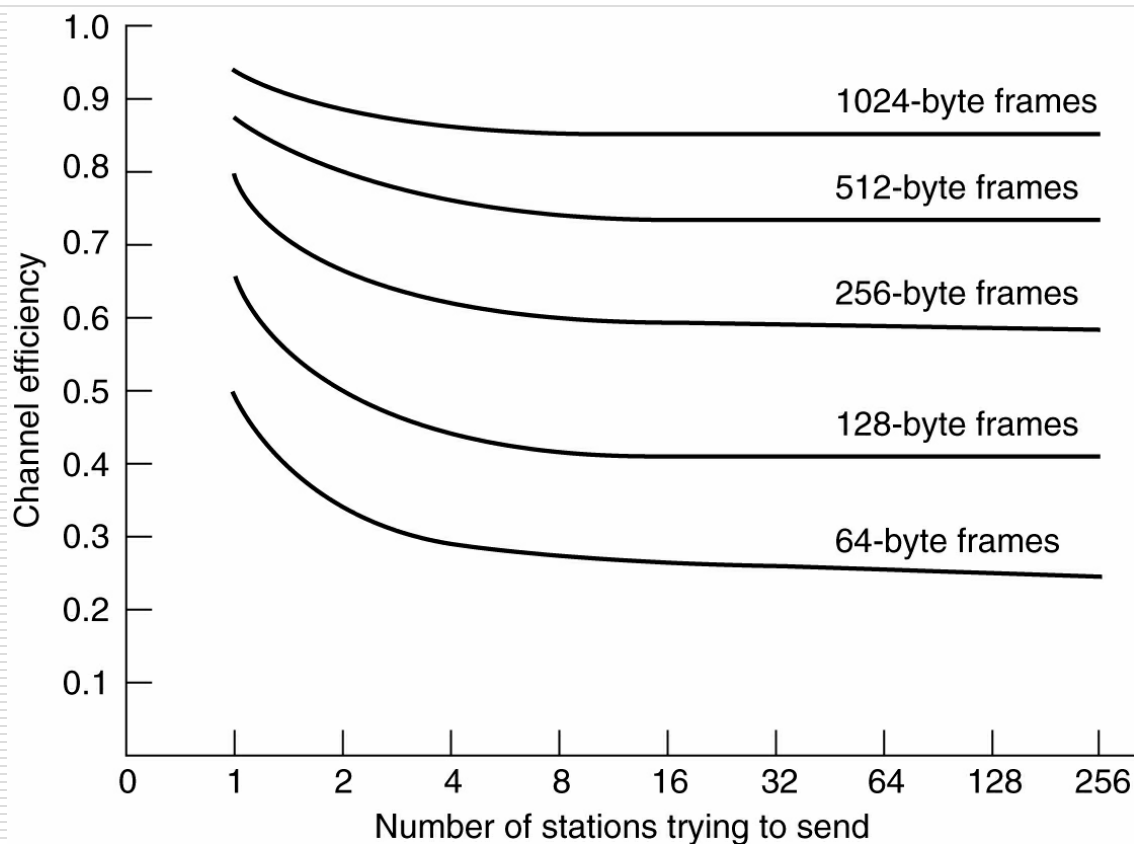
■ $10 < i < 16$ 时, 取 $(0 \sim 1023) \times 2T$

■ $i > 16$ 时, 放弃发送

二进制指数后退算法的优化P221

- 以上讨论的都是发送方怎样避免冲突，或冲突后怎样再次成功地发送。
- 但是，一旦成功发送后，接收方如需发确认帧，其中又有争用信道的问题。如把一次成功发送后的第一个时隙留给接收方，则可及时收到确认帧。

以太网性能（信道利用率） P222



经典以太网

❑ 10base2

❑ 10base5

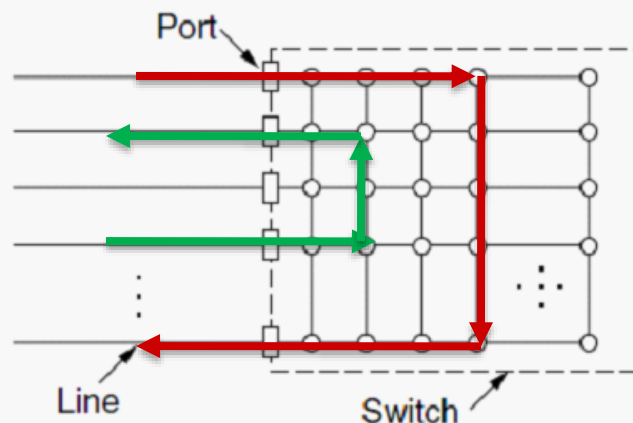
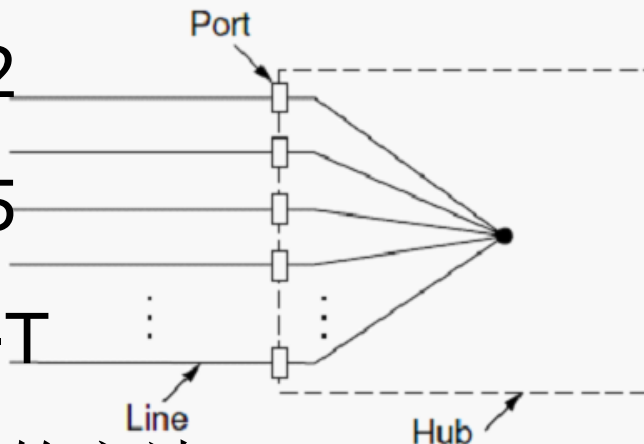
❑ 10base-T

❑ 提高负载的方法P223

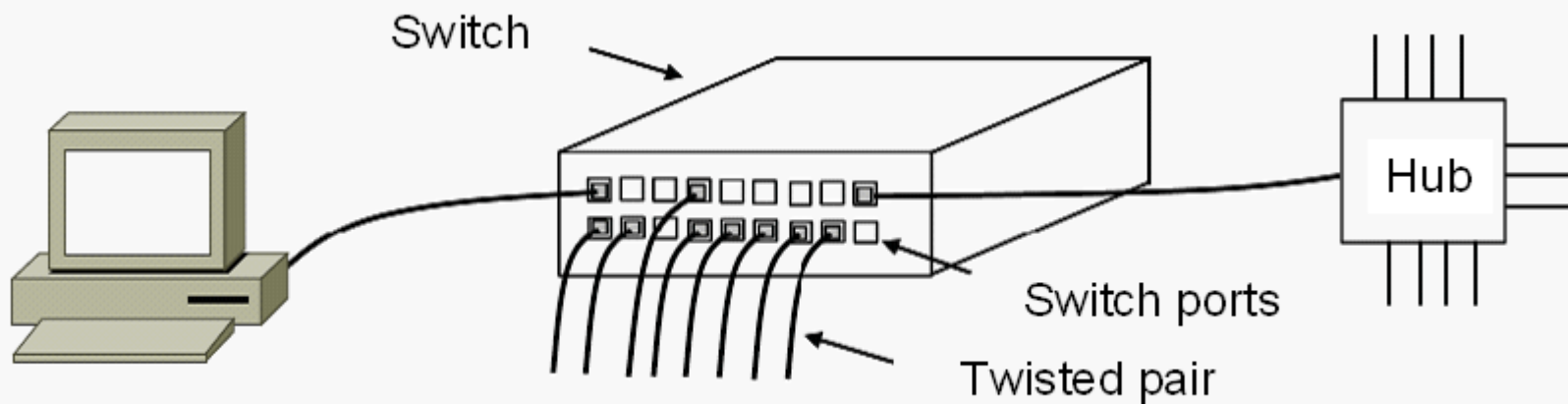
■ 提速到100M

■ 全双工

■ 交换式网络，hub➡switch



交换式以太网 P222



100Mbps以太网——802.3u P224

□ 改进10Mbps以太网 P224

- 要求：兼容性、成本、标准化
- 基本思想：保留原有的帧格式、接口和过程规则，将位时间降为10ns（原100ns），电缆最大长度降到10分之一（原2500米）。

□ 改变编码方式、提高传输速率

■ 100Base-T4

□ 25MHz

■ 100Base-TX

□ 125MHz

名称	传输介质	最大距离
100Base-T4	3 类双绞线	100 米
100Base-TX	5 类双绞线	100 米
100Base-FX	光纤	2000 米

100Base-T4



8B/6T（8个二进制位映射到6个三进制数上）编码方案

- 3对线携带信息呈27种组合形式，至少传送4 bit信息
- 信道的传输速率： $4\text{bit} \times 25\text{MHZ} = 100\text{Mbps}$
- 半双工数据传输方式

100Base-TX

信号的变化频率
125MHZ



4B/5B编码方案（源自 FDDI技术）

- 每5个时钟周期为一组，发送4 bit信息
- 信道的传输速率： $(4\text{bit}/5) \times 125\text{MHZ} = 100\text{Mbps}$
- 全双工数据传输方式

4B/5B encoding P310

- 既没有使用 NRZ，也没有使用 Manchester
- 4 bits数据被编码成 5 bits信号

4B/5B编码表

十进制数	4 位二进制数	4B/5B 码	十进制数	4 位二进制数	4B/5B 码
0	0000	11110	8	1000	10010
1	0001	01001	9	1001	10011
2	0010	10100	10	1010	10110
3	0011	10101	11	1011	10111
4	0100	01010	12	1100	11010
5	0101	01011	13	1101	11011
6	0110	01110	14	1110	11100
7	0111	01111	15	1111	11101

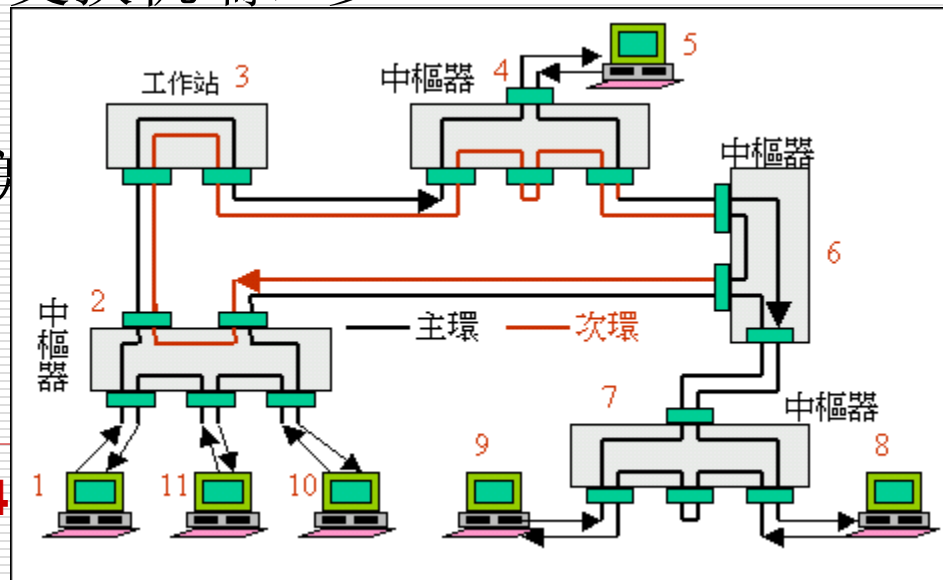
4B/5B Encoding

E	1110	11100	hex data E
F	1111	11101	hex data F
Q	-NONE-	00000	Quiet (signal lost)
I	-NONE-	11111	Idle
J	-NONE-	11000	Start #1
K	-NONE-	10001	Start #2
T	-NONE-	01101	End
R	-NONE-	00111	Reset
S	-NONE-	11001	Set
H	-NONE-	00100	Halt

效率高、
易于实现
、电压平
衡

FDDI—无可奈何花落去

- 1986年，高速LAN技术，100M
- 优点：可靠、抗干扰
- 缺点：
 - 太复杂，很难到桌面
 - 部署复杂，成本高昂，交换机端口少
 - 受快速以太网的冲击
 - 80年代后，90年代初美见踪影
- 未普遍使用



千兆位以太网（吉比特以太网，GE） ——802.3z

□ 园区网的技术发展

- FDDI 100M
- ATM 155M/622M/2.4G
- GE 1000M(1G)

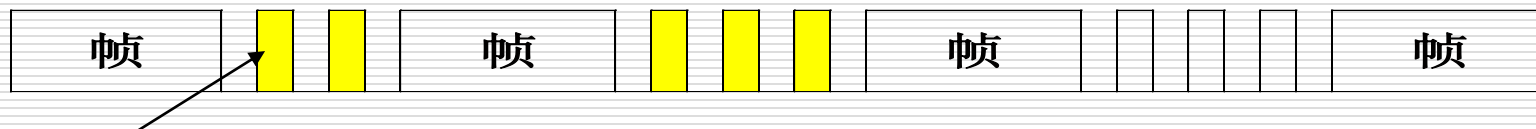
□ 与现有10M/100M以太网技术的兼容性P241

- FDDI和ATM不兼容，需要改变帧格式
- 千兆位以太网兼容

□ 速率提高带来的冲突检测问题以及解决办法

- 只在半双工的模式下才会遇到

速率提高带来的冲突检测问题



□ 10M以太网的要求

- 时隙宽度: $2\tau = \text{最短帧长度} / \text{信道传输速率} (10\text{M})$
- 最短帧长度: 64Byte (512bit)
- 最大传输距离: 2500米 (802.3规范)

□ 1000M以太网面临的问题 (半双工才有P227)

- 若保持最短帧长64字节, 则意味最大传输距离缩短

解决办法 P227

□ 载荷扩充 (carrier extension)

■ 方法

- 在发送方硬件加入/接收方硬件删除，将帧长扩展到512Byte(8倍)

■ 目的

- 保证网络半径为合理长度 (200米=25*8)
- 保证兼容10M/100M的最短帧64字节特性

■ 缺点：线路利用率低下

□ 帧串 (frame bursting)

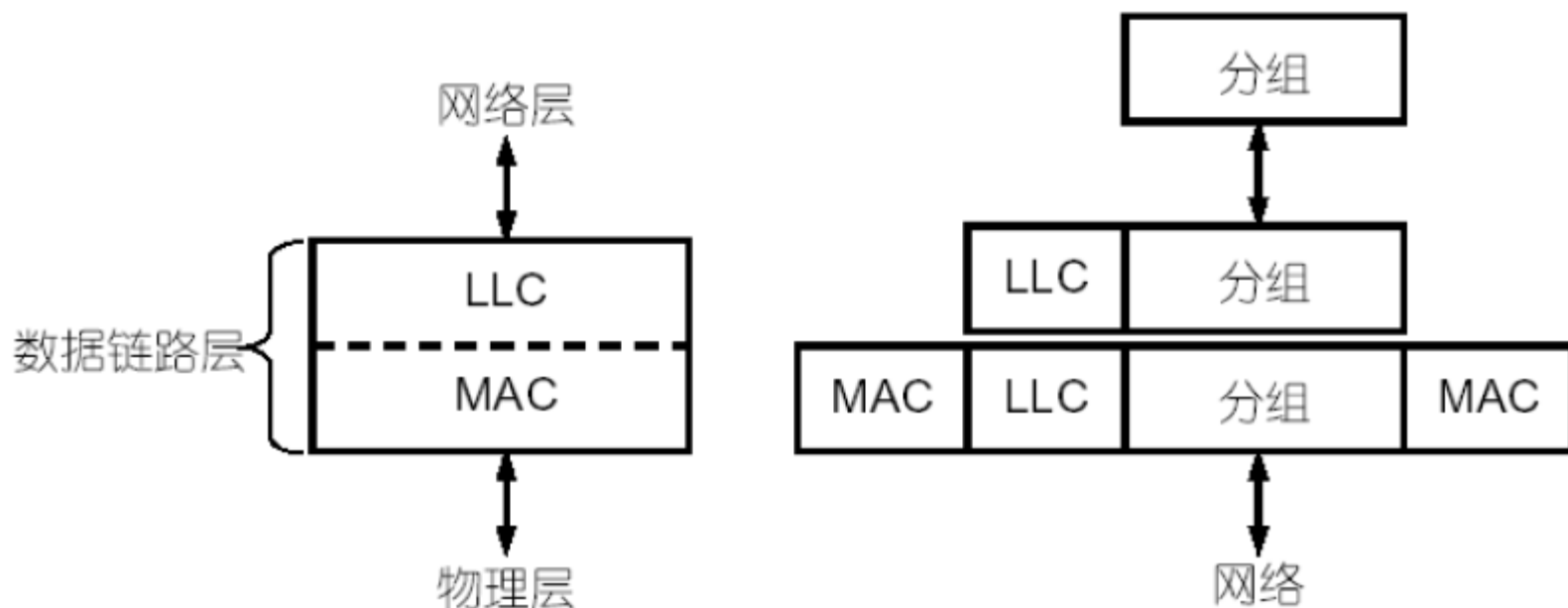
■ 方法

- 连续发送多个帧，只有当帧串小于512Byte时填充

■ 目的：提高信道利用率

IEEE802.2标准：逻辑链路控制

p244~245



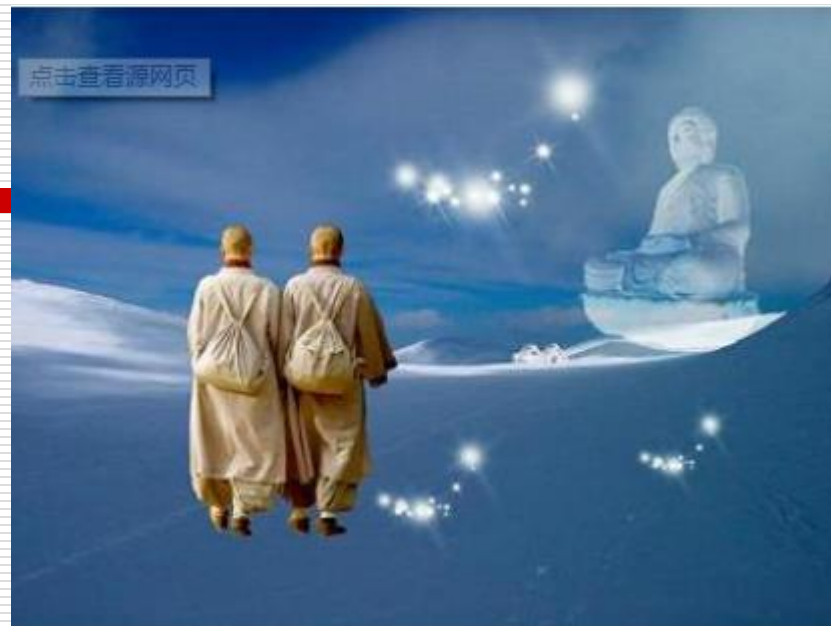
以太网回顾P230

□ 强大的生命力

- 简单性和灵活性
- 易于维护
- 支持TCP/IP，互联容易
- 善于借鉴：4B/5B，8B/10B。。。

□ KISS: Keep It Simple, Stupid（大智若愚）

- 乔布斯：stay hungry, stay foolish



本节小结

- 了解**IEEE802**系列标准
- 掌握以太网/**IEEE802.3**工作原理
- 理解以太网/**IEEE802.3**帧格式
- 了解各种以太网的技术特点

测试题1

□ 在一个有5 ms传输延迟的4Mbps链路上发送500字节的
消息，此消息传输到目的地的延迟（时间）有多少？
（延迟=发送时间+传输延迟）

- A. 5ms
- B. 1ms
- C. 9ms
- D. 6ms

参考答案：

$L = M/R + D$ 。我们

有 $M = 500 \times 8 = 4000$ bits,
 $R = 4$ Mbps 和 $D = 5$ ms。所
以 $L = 1\text{ms} + 5 = 6$ ms

测试题2

□ 在一个有4ms 延迟的 5 Mbps 互联网访问链路上，传输数据最大数量是什么？

- A. 20bytes
- B. 25KB
- C. 200000bits
- D. 2500bytes

解释：

这就是著名的带宽延迟积：

$$BD = R \times D, \quad R = 5 \text{ Mbps 和 } D = 4\text{ms}$$
$$BD = 20 \times 1000000 \times 0.001 = 20000 \text{ 位} = 2500 \text{ 字节}$$

谢谢！

