

计算机网络复习讲座2

网络层、链路层、物理层

Network layer, link layer, and physical layer

2023.11.29 张智雄



PART ONE

网络层

网络层功能、IPv4、NAT、CIDR和子网划分、分组转发、路由选择、内部网关与外部网关、DHCP和ICMP





网络层概述

网络层概述

网络层功能： 提供主机到主机的服务，主要使用IP协议，主要任务是把网络层的协议数据单元从源端发送到目的端，为分组交换网上的不同主机提供通信服务。

核心功能：

- 转发：** **数据平面**中的唯一功能，将达到路由器输入链路接口的分组转发到路由器的输出链路接口的路由器本地动作，由硬件来实现。（到来的分组->查路由表->传给下一跳）
- 路由：** 由**控制平面**实现，决定分组所采用的路由或路径。计算路径的算法被称为路由选择算法。时间较长，由软件来实现。（计算路由表，从而能够进行转发）

网络层的两种服务类型：

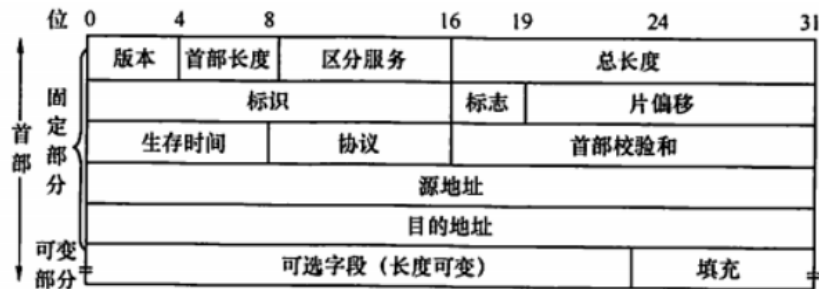
- 无连接服务（数据报网络，如Internet，本章主要讨论基于IP协议的网络）
- 连接服务（虚电路网络，如ATM）

IPv4数据报

- IP首部长度一般为**20B**，总长度的单位为**1B**，首部长度的单位为**4B**，片偏移的单位为**8B(除最后一片)**。
- DF表示“是否禁止分片” (Don't Fragment) ， MF表示“是否还有更多分片” (More Fragment) ， 存在于标志字段中。(标志位：保留-DF-MF)
- 片仅在目的地网络层被重新组装
- IP分组首部校验和字段只检验分组的首部，而不检验数据部分。**(对比TCP和UDP校验和包括数据部分)**
- 分组每经过一个路由器，必须要改变的字段有**TTL、首部校验和**；可能发生变化的有标志、片偏移、数据报总长度（转发前对TTL减1，若为0则丢弃）。
- 协议字段（6-TCP；17-UDP）

07. 在 IP 首部的字段中，与分片和重组无关的字段是（ ）。

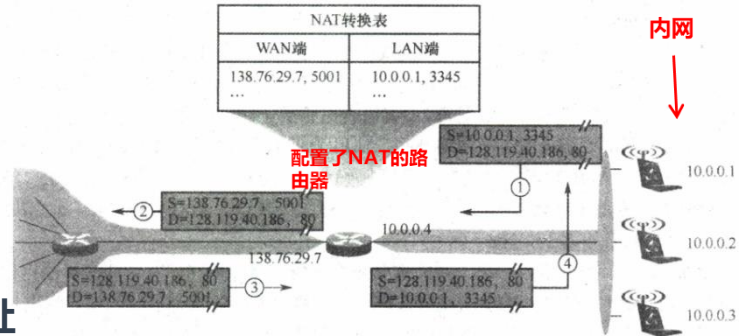
- A. 总长度 B. 标识 C. 标志 D. 片偏移



03. 某网络的一台主机产生了一个 IP 数据报，头部长度的为 20B，数据部分长度为 2000B。该数据报需要经过两个网络到达目的主机，这两个网络所允许的最大传输单位 (MTU) 分别为 1500B 和 576B。问原 IP 数据报到达目的主机时分成了几个 IP 小报文？每个报文的数据部分长度分别是多少？

IPv4地址和NAT

- IP地址共32位，分为**网络号和主机号**。
- IP地址分为5类、同时划出部分私有IP地址（可重用）和特殊IP地址
- NAT路由器使用NAT转换表进行内网IP地址到公网IP的端口级映射，由此可以多个私有IP地址映射到一个公网IP地址



	0	1	2	3	8	16	24	32
A类(1~126)	0				网络号			主机号
B类(128~191)	1	0			网络号			主机号
C类(192~223)	1	1	0		网络号			主机号
D类(224~239)	1	1	1	0				多播地址
E类(240~255)	1	1	1	1				保留为今后使用

Class	NetIDs	Blocks
A	10	1
B	172.16 to 172.31	16
C	192.168.0 to 192.168.255	256

NetID	HostID	作为IP分组源地址	作为IP分组目的地址	用途
全0	全0	可以	不可以	在本网范围内表示本机；在路由表中用于表示默认路由（相当于表示整个Internet网络）
全0	特定值	不可以	可以	表示本网内某个特定主机
全1	全1	不可以	可以	本网广播地址(路由器不转发)
特定值	全0	不可以	不可以	网络地址，表示一个网络
特定值	全1	不可以	可以	直接广播地址，对特定网络上的所有主机进行广播
127	非全0或非全1的任何数	可以	可以	用于本地软件环回测试，称为环回地址

CIDR和子网划分

- IP地址共32位，分为网络号、**子网号**、主机号，网络号的位数可以通过子网掩码来获知。判断两个IP地址是否在同一子网的方法为，根据其子网掩码获取两个IP地址对应的子网号，比较子网号是否相同。
- 无分类域间路由选择CIDR是在变长子网掩码的基础上提出的一种消除传统A、B、C类网络划分，并且可以在软件的支持下实现超网构造的一种IP地址的划分方法，能更有效地分配IP地址（网络前缀、主机号）
- 将多个子网聚合为一个较大的子网---构造超网，减少路由器间的信息交换

27. 主机 A 和主机 B 的 IP 地址分别为 216.12.31.20 和 216.13.32.21，要想让 A 和 B 工作在同一个 IP 子网内，应该给它们分配的子网掩码是（ ）。

- A. 255.255.255.0
- B. 255.255.0.0
- C. 255.255.255.255
- D. 255.0.0.0

【2012 统考真题】某主机的 IP 地址为 180.80.77.55，子网掩码为 255.255.252.0。若该主机向其所在子网发送广播分组，则目的地址可以是（ ）。

- A. 180.80.76.0
- B. 180.80.76.255
- C. 180.80.77.255
- D. 180.80.79.255

【2019 统考真题】若将 101.200.16.0/20 划分为 5 个子网，则可能的最小子网的可分配 IP 地址数是（ ）。

- A. 126
- B. 254
- C. 510
- D. 1022

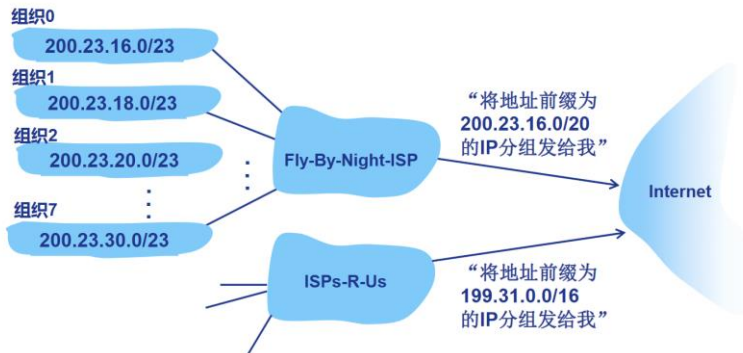
【2017 统考真题】若将网络 21.3.0.0/16 划分为 128 个规模相同的子网，则每个子网可分配的最大 IP 地址个数是（ ）。

A. 254

B. 256

C. 510

D. 512



分组转发

每个路由器都有一个路由表，对于到来的IP数据报，路由器通过查询路由表来决定向哪个方向进行转发。对于采用了CIDR中路由聚集技术的路由表，可能有多个CIDR地址块相重叠，路由器采取**最长前缀匹配原则**，根据能够匹配的IP的网络前缀最长的表项决定下一跳。

【2015 统考真题】某路由器的路由表如下所示：

目的网络	下一跳	接口
169.96.40.0/23	176.1.1.1	S1
169.96.40.0/25	176.2.2.2	S2
169.96.40.0/27	176.3.3.3	S3
0.0.0.0/0	176.4.4.4	S4

若路由器收到一个目的地址为 169.96.40.5 的 IP 分组，则转发该 IP 分组的接口是（ ）。

- A. S1 B. S2 C. S3 D. S4

某路由器具有右表所示的路由表项。

- 假设路由器收到两个分组：分组 A 的目的地址为 131.128.55.33，分组 B 的目的地址为 131.128.55.38。确定路由器为这两个分组选择的下一跳，并加以说明。
- 在路由表中增加一个路由表项，它使以 131.128.55.33 为目的地址的 IP 分组选择“A”作为下一跳，而不影响其他目的地址的 IP 分组的转发。
- 在路由表中增加一个路由表项，使所有目的地址与该路由表中任何路由表项都不匹配的 IP 分组被转发到下一跳“E”。
- 将 131.128.56.0/24 划分为 4 个规模尽可能大的等长子网，给出子网掩码及每个子网的可分配地址范围。

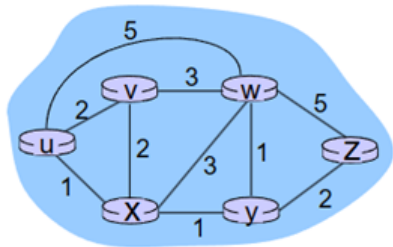
网络前缀	下一跳
131.128.56.0/24	A
131.128.55.32/28	B
131.128.55.32/30	C
131.128.0.0/16	D

- 从收到的 IP 分组的首部提取目的主机的 IP 地址 D （即目的地址）。
- 若查找到特定主机路由（目的地址为 D ），就按照这条路由的下一跳转发分组；否则从转发表中的下一条（即按前缀长度的顺序）开始检查，执行步骤 3）。
- 将这一行的子网掩码与目的地址 D 进行按位与运算。若运算结果与本行的前缀匹配，则查找结束，按照“下一跳”指出的进行处理（或者直接交付本网络上的目的主机，或通过指定接口发送到下一跳路由器）。否则，若转发表还有下一行，则对下一行进行检查，重新执行步骤 3）。否则，执行步骤 4）。
- 若转发表中有一个默认路由，则把分组传送给默认路由；否则，报告转发分组出错。

- 主机路由：对特定目的主机的 IP 地址专门指明一个路由，以方便网络管理员控制和测试网络。若特定主机的 IP 地址是 a.b.c.d，则转发表中对应项的目的网络是 a.b.c.d/32。/32 表示的子网掩码没有意义，但这个特殊的前缀可以用在转发表中。
- 默认路由：用特殊前缀 0.0.0.0/0 表示默认路由，全 0 掩码和任何目的地址进行按位与运算，结果必然为全 0，即必然和转发表中的 0.0.0.0/0 相匹配。只要目的网络是其他网络（不在转发表中），就一律选择默认路由。

路由选择算法

链路状态算法 (基于**Dijkstra**算法) —— 需要检验所有不在集合中的点, 时间复杂度 $O(n^2)$

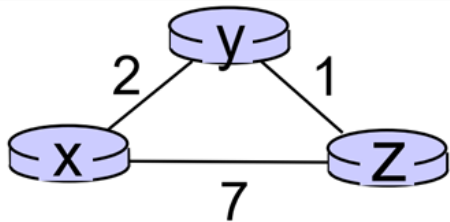


$D(v)$: 从源到目的 v 的当前路径费用

$p(v)$: 从源到 v 的当前路径的 v 的前序结点

N' : 已经找到最小费用路径的结点集合

距离向量算法 (基于**动态规划**算法) —— $D_x(y) = \min_v (c(x, v) + D_v(y))$



路由选择算法与路由协议

- 距离向量 — 邻接节点定期交换自身路由表
- 链路状态 — 向AS内所有路由器发送信息（仅链路状态变化时）

基础算法：**距离向量算法**（基于**动态规划算法**）、**链路状态算法**（基于**Dijkstra算法**）

- RIP是**应用层协议**，基于**UDP**，使用**距离向量算法**，通过**跳数**来寻找最佳的下一跳路由器，距离（跳数）等于**16表示网络不可达**。RIP协议只适用于**小型互联网**，会出现**慢收敛现象**（即“坏消息传得慢”），缓解该问题的方法是使用**毒性逆转**、**设置度量值**等。（网络层协议，基于传输层实现，应用层实体存在）
- OSPF是**网络层协议**，内容直接封装到**IP数据报**中，使用**链路状态算法**，可灵活设置链路的权值，当链路状态发生变化时，使用**洪泛法**来向自治系统内所有路由器发送信息，可以用于**规模较大的互联网**。
- BGP是**应用层协议**，基于半永久的**TCP**，使用**路径向量算法**，求出的是具体路径，且**路径不一定最优**。BGP的路由表包括目的网络前缀、下一跳路由器，以及到达该目的网络所要经过的各个自治系统序列。

表 4.3 三种路由协议的比较

协 议	RIP	OSPF	BGP	
类型	内部	内部	外部	
路由算法	距离-向量	链路状态	路径-向量	
传递协议	UDP	IP	TCP	
路径选择	跳数最少	代价最低	较好，非最佳	
交换结点	和本结点相邻的路由器	网络中的所有路由器	和本结点相邻的路由器	
交换内容	当前本路由器知道的全部信息，即自己的路由表	与本路由器相邻的所有路由器的链路状态	首次	整个路由表
			非首次	有变化的部分

DHCP和ICMP

【2010 统考真题】若路由器 R 因为拥塞丢弃 IP 分组，则此时 R 可向发出该 IP 分组的源主机发送的 ICMP 报文类型是 ()。

- A. 路由重定向 B. 目的不可达 C. 源点抑制 D. 超时

DHCP协议为应用层协议，下层基于UDP，功能是为子网内的主机配置动态的IP地址。工作过程分为**DHCP发现、DHCP提供、DHCP请求、DHCP确认**四步。

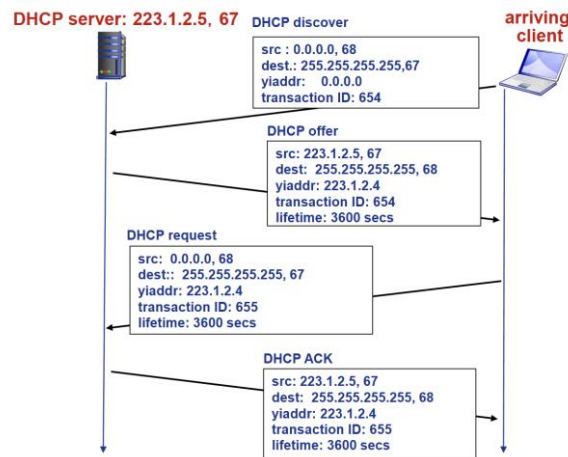
例：主机向DHCP服务器动态获取IP地址的过程中，主机首先发送了DHCP报文M，M是哪一种DHCP报文？源IP地址和目标IP地址分别是什么？

ICMP为**网络层**协议，报文内容直接作为**IP**数据报中的数据，具有让主机或路由器报告差错和异常情况的作用。

ICMP有两类报文：ICMP**差错报告**报文、ICMP询问报文。

□ ICMP差错报告报文有5种：目的主机不可达、源点抑制、时间超过 (Traceroute)、参数问题、改变路由(**不发送ICMP差错报告的情况：ICMP报告本身、非第一个分片、具有组播地址/特殊地址的IP数据报**)。

□ ICMP询问报文有4种，最常用的两种为：回送请求和回答报文 (ping)、时间戳请求和回答报文。

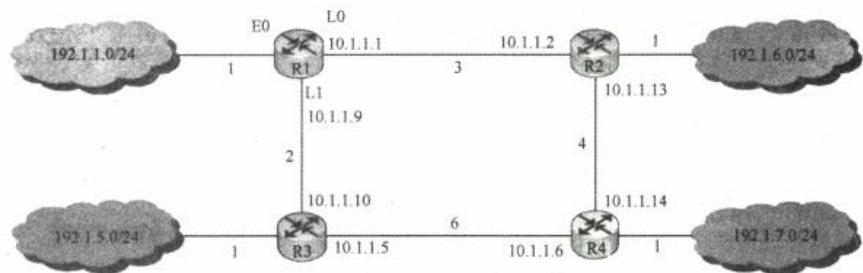


以下关于 ICMP 差错报文的描述中，错误的是 ()。

- A. 对于已经携带 ICMP 差错报文的分组，不再产生 ICMP 差错报文
B. 对于已经分片的分组，只对第一个分片产生 ICMP 差错报文
C. PING 使用了 ICMP 差错报文
D. 对于组播的分组，不产生 ICMP 差错报文

05. 【2014 统考真题】某网络拓扑如下图所示，路由器运行 OSPF 路由协议，下表是路由器 R1 维护的主要链路状态信息（LSI），下图是根据该表及 R1 的接口名构造的网络拓扑。

		R1 的 LSI	R2 的 LSI	R3 的 LSI	R4 的 LSI	备 注
Router ID		10.1.1.1	10.1.1.2	10.1.1.5	10.1.1.6	标识路由器的 IP 地址
Link1	ID	10.1.1.2	10.1.1.1	10.1.1.6	10.1.1.5	所连路由器的 Router ID
	IP	10.1.1.1	10.1.1.2	10.1.1.5	10.1.1.6	Link1 的本地 IP 地址
	Metric	3	3	6	6	Link1 的费用
Link2	ID	10.1.1.5	10.1.1.6	10.1.1.1	10.1.1.2	所连路由器的 Router ID
	IP	10.1.1.9	10.1.1.13	10.1.1.10	10.1.1.14	Link2 的本地 IP 地址
	Metric	2	4	2	4	Link2 的费用
Net1	Prefix	192.1.1.0/24	192.1.6.0/24	192.1.5.0/24	192.1.7.0/24	直连网络 Net1 的网络前缀
	Metric	1	1	1	1	到达直连网络 Net1 的费用



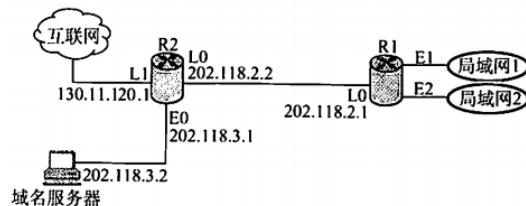
请回答下列问题：

- 1) 假设路由表结构如下表所示，给出图中 R1 的路由表，要求包括到达图中子网 192.1.x.x 的路由，且路由表中的路由项尽可能少。

目的网络	下一跳	接口
------	-----	----

- 2) 当主机 192.1.1.130 向主机 192.1.7.211 发送一个 TTL=64 的 IP 分组时，R1 通过哪个接口转发该 IP 分组？主机 192.1.7.211 收到的 IP 分组的 TTL 是多少？
- 3) 若 R1 增加一条 Metric 为 10 的链路连接 Internet，则表中 R1 的 LSI 需要增加哪些信息？

【2009 统考真题】某网络拓扑图如下图所示，路由器 R1 通过接口 E1、E2 分别连接局域网 1、局域网 2，通过接口 L0 连接路由器 R2，并通过路由器 R2 连接域名服务器与互联网。R1 的 L0 接口的 IP 地址是 202.118.2.1；R2 的 L0 接口的 IP 地址是 202.118.2.2，L1 接口的 IP 地址是 130.11.120.1，E0 接口的 IP 地址是 202.118.3.1；域名服务器的 IP 地址是 202.118.3.2。



R1 和 R2 的路由表结构如下：

目的网络 IP 地址	子网掩码	下一跳 IP 地址	接口
------------	------	-----------	----

- 1) 将 IP 地址空间 202.118.1.0/24 划分为两个子网，分别分配给局域网 1 和局域网 2，每个局域网需分配的 IP 地址数不少于 120 个。请给出子网划分结果，说明理由或给出必要的计算过程。
- 2) 请给出 R1 的路由表，使其明确包括到局域网 1 的路由、局域网 2 的路由、域名服务器的主机路由和互联网的路由。
- 3) 请采用路由聚合技术，给出 R2 到局域网 1 和局域网 2 的路由。

PART TWO

数据链路层

数据链路层功能、差错检验与纠正、介质访问控制、链路寻址ARP、以太网
帧、交换机、虚拟局域网VLAN、点对点链路PPP协议





数据链路层概述

数据链路层功能

在物理层提供服务的基础上向网络层提供服务，主要作用是加强物理层传输原始比特流的功能，将物理层可能出错的物理链接改造为逻辑上无差错的数据链路。数据链路层负责通过一条链路从一个结点向另一个物理链路直接相连的相邻结点传送数据报，具有组帧、流量控制、差错控制、访问接入控制的功能。

编码的汉明距离 d ： n 位编码中任意两个码字至少有 d 位不同。

- 对于检错码：若想要检测 r 位的差错，则需要满足的关系式为 $d \geq r + 1$ 。
- 对于纠错码：若想要纠正 r 位的差错，则需要满足的关系式为 $d \geq 2r + 1$ 。

差错检验：

- 奇偶校验——增加冗余位使得码字中1的个数恒为奇数或偶数的编码方法
- 校验和——求和取反
- 循环冗余校验CRC——选取一个 $r + 1$ 位的比特模式 G ，对于一个 n 位的有效数据 D ，希望在其后面添加 r 位的帧检验序列(FCS)，使得这个 $m + r$ 位的比特序列能够被预先确定的 G 模2整除。

计算FCS的方法是，先在 D 后面添加 r 位的0，然后计算该序列被 G 模2除得到的余数 R 作为FCS。

多路访问控制协议

常见的介质访问控制方法有:

- 信道划分MAC协议: 多路复用共享链路, 如TDMA、FDMA、WDMA、CDMA, 不会引起冲突。
- 随机访问MAC协议: 信道不划分, 以最大速率发送帧, 允许冲突, 但通过采取一些措施来缓解该问题。
典型的协议有ALOHA协议、CSMA协议、CSMA/CD协议、CSMA/CA协议等。
- 轮转访问MAC协议: 结点轮流使用信道, 链路占用权转移。典型的有轮询式、令牌环网等。

【2010 统考真题】某局域网采用 CSMA/CD 协议实现介质访问控制, 数据传输速率为 10Mb/s, 主机甲和主机乙之间的距离是 2km, 信号传播速率是 200000km/s。请回答下列问题, 要求说明理由或写出计算过程。

- 1) 若主机甲和主机乙发送数据时发生冲突, 则从开始发送数据的时刻起, 到两台主机均检测到冲突为止, 最短需要经过多长时间? 最长需要经过多长时间 (假设主机甲和主机乙在发送数据的过程中, 其他主机不发送数据)?
- 2) 若网络不存在任何冲突与差错, 主机甲总是以标准的最长以太网数据帧 (1518 字节) 向主机乙发送数据, 主机乙每成功收到一个数据帧后立即向主机甲发送一个 64 字节的确认帧, 主机甲收到确认帧后方可发送下一个数据帧。此时主机甲的有效数据传输速率是多少 (不考虑以太网的前导码)?

随机访问MAC协议

- 纯ALOHA协议：网络中的任何一个站点**不进行任何检测就发送数据**，如果在一段时间内**未收到确认**，则站点认为传输过程中发生了**冲突**，发送站点需要**等待一段随机时间**后再发送数据。信道利用率很低，为 $\frac{1}{2e} = 0.18$
- 时隙ALOHA协议：是ALOHA协议的改进版本，按照发送一帧的时间**划分一个个等长的时隙**，各结点只能在时隙开始时刻发送帧。若发生冲突，则该结点在**下一个时隙以概率p尝试重传该帧，直至成功**。信道利用率为 $\frac{1}{e} = 0.37$
- CSMA协议：发送**帧之前监听信道**，若空闲则尝试发送帧，否则推迟发送。三种协议在信道空闲和信道忙时具体的处理方式如下：

信道状态	1-坚持	非坚持	p-坚持
空闲	立即发送数据	立即发送数据	以概率 p 发送数据，以概率 $1-p$ 推迟到下一个时隙
忙	继续坚持侦听	放弃侦听，等待一个随机的时间后再侦听	持续侦听，直至信道空闲

- CSMA/CD协议：是CSMA协议的改进版本，工作流程可概括为“**先听后发、边听边发、冲突停发、随机重发**”。
- CSMA/CA协议：应用于**802.11**标准的无线局域网，将CSMA/CD协议进行了修改，把碰撞检测改为了**碰撞避免**。

链路寻址ARP协议

ARP协议： 工作在网络层，用来完成**IP地址到MAC地址的映射**。工作过程如下：

主机A欲向本局域网上的某台主机B发送IP数据报时，先在其ARP高速缓存中查看有无主机B的IP地址。

注意ARP查询分组：目的IP地址为B的IP地址，目的MAC地址为广播地址

- 如果有：即可查出对应的MAC地址，将其作为链路层帧的目的MAC地址并发送。
- 如果没有：在子网内**广播**ARP请求分组，广播帧的目的MAC地址为 **FF-FF-FF-FF-FF-FF**。局域网中目的主机B收到请求后，就会向主机A发送ARP响应分组（**单播发送**），分组中包含B的IP地址与MAC地址的映射关系。这样A收到后就可以更新自己的ARP表，之后按照对应的MAC地址发送帧。

ARP表: LAN中的每个IP结点(主机、路由器)维护一个表

- 存储某些LAN结点的IP/MAC地址映射关系:
< IP地址; MAC地址; TTL >
- TTL (Time To Live):
经过这个时间以后该映射关系会被遗弃(典型值为20min)

A广播ARP查询分组，其中包含B的IP地址

- 目的MAC地址 = FF-FF-FF-FF-FF-FF
- LAN中所有结点都会接收ARP查询

使用 ARP 的 4 种典型情况总结如下（见图 4.9）：

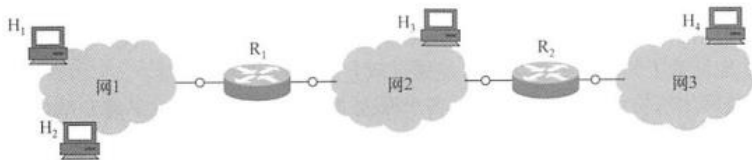


图 4.9 使用 ARP 的 4 种典型情况

- 1) 发送方是主机（如 H_1 ），要把 IP 数据报发送到本网络上的另一台主机（如 H_2 ）。这时 H_1 在网 1 用 ARP 找到目的主机 H_2 的硬件地址。
- 2) 发送方是主机（如 H_1 ），要把 IP 数据报发送到另一个网络上的一台主机（如 H_3 ）。这时 H_1 用 ARP 找到与网 1 连接的路由器 R_1 的硬件地址，剩下的工作由 R_1 来完成。
- 3) 发送方是路由器（如 R_1 ），要把 IP 数据报转发到与 R_1 连接的网络（网 2）上的一台主机（如 H_3 ）。这时 R_1 在网 2 用 ARP 找到目的主机 H_3 的硬件地址。
- 4) 发送方是路由器（如 R_1 ），要把 IP 数据报转发到网 3 上的一台主机（如 H_4 ）。这时 R_1 在网 2 用 ARP 找到与网 2 连接的路由器 R_2 的硬件地址，剩下的工作由 R_2 来完成。

ARP是” 即插即用 “协议：结点**自主创建ARP表**，无需干预

ARP 的工作过程中，ARP 请求是（ ）发送，ARP 响应是（ ）发送。

- A. 单播 B. 组播 C. 广播

【2012 统考真题】ARP 的功能是（ ）。

- A. 根据 IP 地址查询 MAC 地址 B. 根据 MAC 地址查询 IP 地址
C. 根据域名查询 IP 地址 D. 根据 IP 地址查询域名

以太网帧

- 逻辑拓扑是总线形结构，物理拓扑是**星形或拓展星形**结构。
- 提供**无连接不可靠**的服务，没有握手过程，接收网卡也不向发送网卡进行确认。
- 采用的MAC协议是**二进制退避算法的CSMA/CD**协议。
 - 第 m 次连续冲突后， $n = \min(m, 10)$ ，等待 $K = \text{random}(0, 2^n - 1)$ 倍随机传播延迟时间后继续监听，如果 $n > 16$ 则报错
- 以太网规定的争用期长度为51.2us，在数据传输速率为10Mb/s的以太网中，能够传输512bit数据，这也即以太网的最短帧长64B。
- 以太网帧前需要有8B的前导码，用于发送端与接收端的时钟同步。除去前导码，网络层的数据报封装成以太网帧需要附加18B的数据。以太网数据帧长度范围为64~1518B，有效数据长度为46~1500B，以太网的MTU为1500B。
- 以太网中发送的数据的编码方式使用曼彻斯特编码。

在以太网的二进制回退算法中，在 11 次碰撞之后，站点会在 0 ~ () 之间选择一个随机数。

- A. 255 B. 511 C. 1023 D. 2047

长度为 10km、数据传输速率为 10Mb/s 的 CSMA/CD 以太网，信号传播速率为 200m/μs。那么该网络的最小帧长为 ()。

- A. 20bit B. 200bit C. 100bit D. 1000bit

交换机与虚拟局域网VLAN

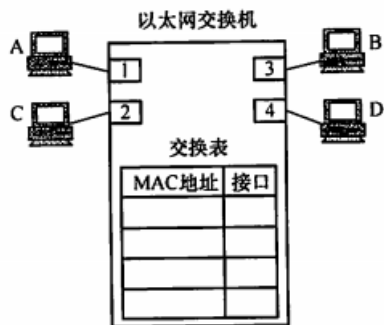
定义：存储转发以太网帧的数据链路层设备。

工作流程：检验到达帧的目的MAC地址，选择性的向一个或者多个输出链路转发帧，利用CSMA/CD访问链路。

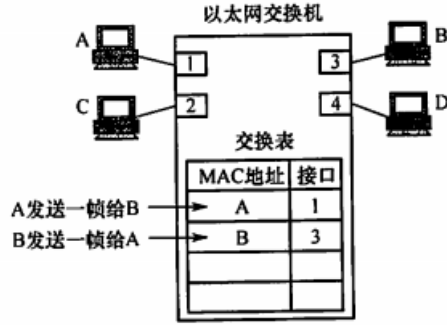
优势：

- 对于局域网的主机透明，主机感知不到交换机的存在；
- 是一种即插即用的设备，交换机自学习，无需配置。

虚拟局域网（VLAN）技术支持多个局域网共享一台交换机，在交换机中可以设置VLAN，并将不同的接口划分到不同的VLAN中。不同的VLAN之间不能够直接进行相互通信，从而实现流量隔离的作用。（划分了广播域）



(a) 交换表一开始是空的



(b) 交换了两帧后的交换表

交换表里没有MAC地址对应的接口怎么办？

——复制帧，然后向所有的接口转发

	集线器 (hub)	交换机 (switch)	网桥 (bridge)	路由器 (router)
层次	1	2	2	3
流量(冲突域) 隔离	no	yes	yes	yes
广播域隔离	no	no	no	yes
即插即用	yes	yes	yes	no
优化路由	no	no	no	yes
直通传输 (Cut through)	yes	yes	yes	no

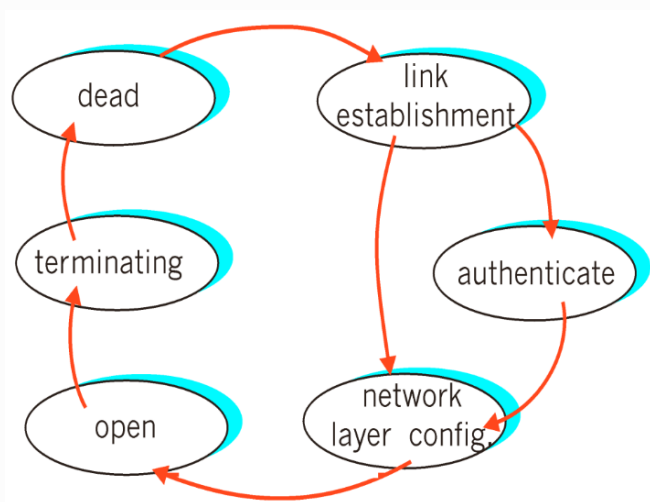
PPP协议

PPP协议即点对点协议，是使用串行线路通信的面向字节的协议，仅一个发送端和一个接收端，不存在冲突，不需要使用复杂的介质控制访问。它具有以下特点：

- 提供差错检测但不提供纠错功能，是不可靠的传输协议，不需要流量控制，也不需要支持多点链路。
- 只支持全双工链路，两端可以运行不同的网络层协议。
- PPP帧以标志字节01111110表示帧的开始和帧的结束。若传输的有效数据中出现了定界符的标志模式01111110，则在该字节前填充转义字节01111101;若传输的有效数据中出现了转义字节的标志模式01111101，则在该字节前再添加一个转义字节01111101。
- 最多可以节省5个字节（省略地址控制字段，协议1 or 2，校验2 or 4）

两个阶段：

- 配置PPP链路
 - 最大帧长，身份认证(authentication), etc.
- 学习/配置网络层信息：
 - 对于IP协议：通过交换IPCP协议(IP Control Protocol)报文，完成IP地址等相关信息的配置



PART THREE

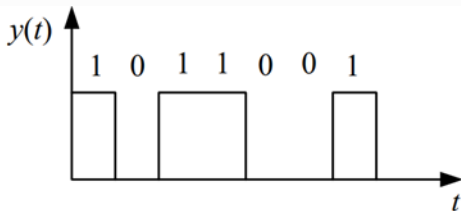
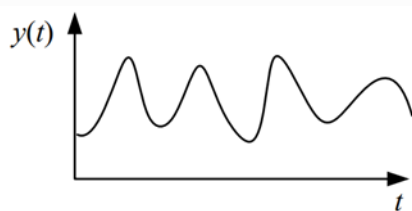
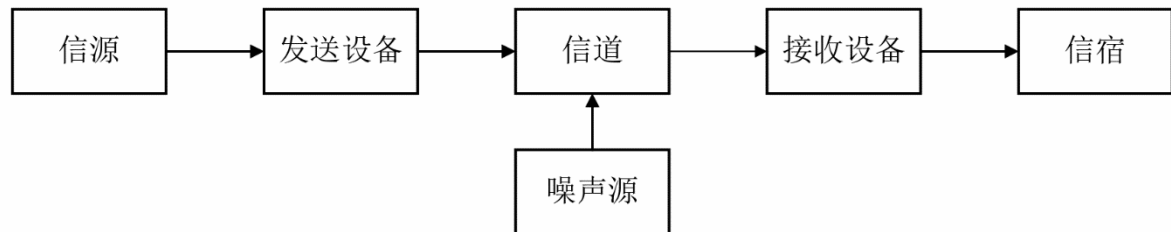
物理层

数据通信系统模型、异步通信与同步通信、PCM、导引型传输介质、非导引型传输介质、信道容量、基带传输、频带传输、接口规程



数据通信系统——模型

Data communication foundation



- **信源**: 将消息转换为信号的设备 (e.g.计算机)。
- **发送设备**: 将信源产生的信号进行适当的变换装置, 使之适合于在信道中传输。主要包括编码和调制。
- **信道**: 信号传输通道 (e.g.物理介质)。
- **噪声**: 自然界和通信设备中所产生的干扰。
- **接收设备**: 完成发送设备反变换, 还原原始发送信号。
- **信宿**: 信号终点, 将信号转换为供人/设备能识别的消息

常见数据通信术语

数据: 传送消息的实体。

信号: 数据的电气的或电磁的表示:

$$\text{eg. } y(t) = A \sin(\omega t + \theta)$$

- ❑ “模拟的” : 连续的
- ❑ “数字的” : 离散的

码元: 信号基本波形

频带: 信号频率范围

带宽: 有效带宽

数据通信方式: 单工、半双工、全双工

并行通信 vs 串行通信

异步通信 vs 同步通信

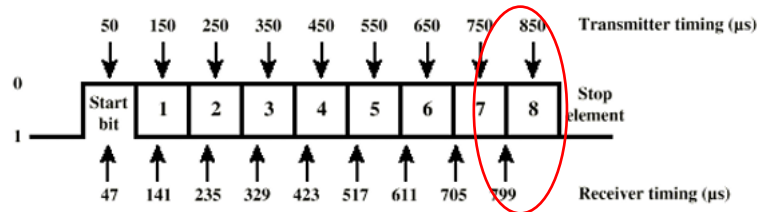
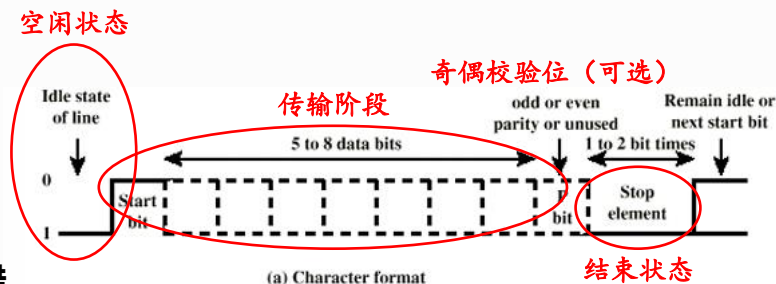
异步通信与同步通信

Data communication foundation

解决发送方和接收方之间的时钟同步问题

异步通信：发送方和接收方的时钟是独立的

- 每次只传输一个字符 (5~8 bits) —— 数据较少不会出错
- 传输开始时对齐时钟
- **优点**：实现简单；实现成本低；
- **缺点**：发送效率和速率较低；**时钟误差**
- **适用于**：短距离、低速率传输 (e.g. 键盘)



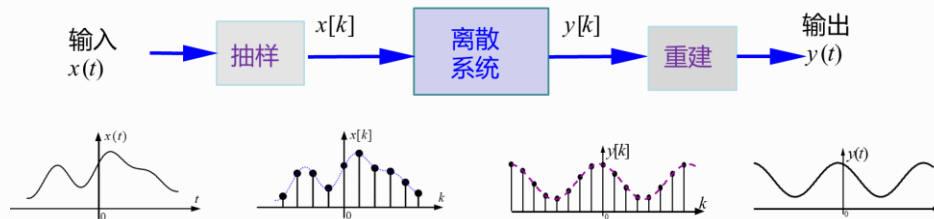
同步通信：发送方和接收方的时钟是同步的

- 一次性传输一大块数据
- 发送方和接收方可以采用独立的相同的时钟信号——难以实现（长距离、信号损失）
- **替代方案**：**时钟信号编码到数据当中** (e.g. 曼切斯特编码技术；载波频率)
- **适用于**：远距离、高速率传输

信源编码——PCM

Data communication foundation

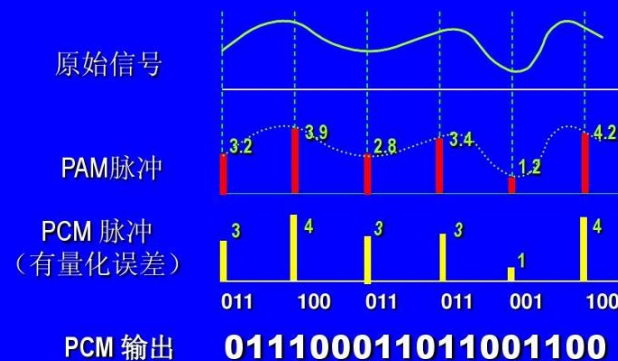
解决模拟数据在数字通信系统中的传输问题



基本步骤：采样→量化→编码

- **采样**：目的就是要用一系列在时间上离散的采样值，代替时间上连续的模拟数据，即实现时间上的离散化。
- **量化**：就是使采样值在取值上离散（存在量化误差）
- **编码**：就是将量化后的采样值用一定位数的二进制数码来表示。如果量化级数为 N ，则每个采样值就编码成 $\log_2 N$ 位二进制码

PCM转换过程举例



奈奎斯特 (Nyquist) 采样定理： 如果以采样率 $f_{sampling} \geq 2f_{signal}$ 来采样信号就可以完美重构原来的模拟信号。如果采样频率足够高，则无法区分其差别

导引型传输介质

Physical media

传输依赖于“实际”导线

架空明线：易受天气和外界电磁干扰，对外界噪声敏感，带宽有限。（较为少见）

双绞线：主要用于基带传输（较为常见）

❑ 屏蔽双绞线 STP 与非屏蔽双绞线 UTP（**有无屏蔽网**）

❑ UTP根据**绞绕程度**可分为**5类**：

UTP类别	带宽	典型应用
3	16 MHz	低速网络，电话网络
4	20 MHz	10Base-T以太网
5	100 MHz	10Base-T以太网，100Base-T快速以太网
5E（超5类）	100 MHz	100Base-T快速以太网，1000-BaseT吉比特以太网
6	250 MHz	1000Base-T吉比特以太网，ATM网络

同轴电缆：主要用于频带传输（分为基带、频带、宽带三类）

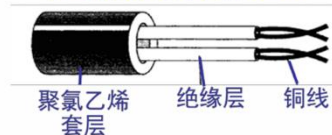
光纤：基本原理是光的全反射。

❑ **多模光纤**——纤芯粗，可支持多束光不同角度进入射，折射次数多，光损耗大，传输距离近，成本低

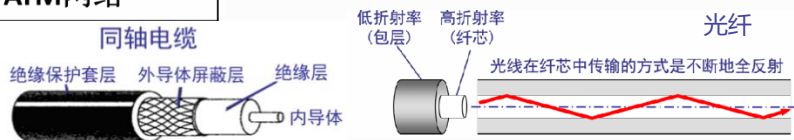
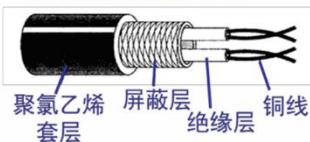
❑ **单模光纤**——光的全反射次数几乎可以忽略（可看作直接进入），光损耗小，传输距离远，成本高



无屏蔽双绞线 UTP



屏蔽双绞线 STP

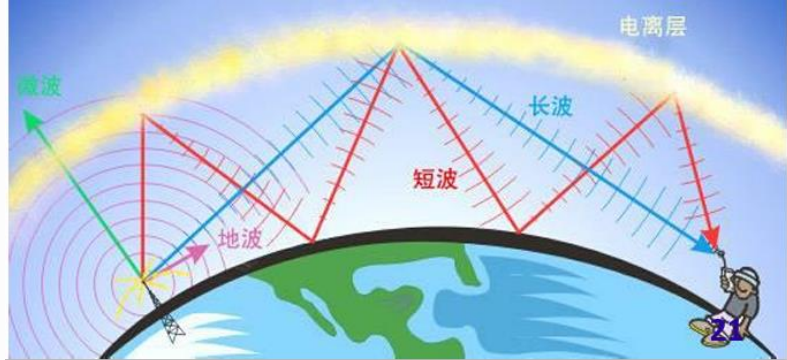


非导引型传输介质

Physical media

传输不依赖于“实际”导线

自由空间：无线电传播途径，**不同频段具有不同传播特性**



E.g.地波传播：频率较低（大约2 MHz以下）的电磁波趋于沿地球表面传播

- 有一定的绕射能力
- 在低频和甚低频段，地波传输距离可以超过数百甚至数千公里

E.g.天波传播：频率较高（大约在2~30 MHz之间）的电磁波会被电离层（距地表约60~400 km）反射

- 电离层的密度和厚度随时间随机变化，随机性强，**随参信道**
- 电磁波可以传播10000 km以上

E.g.视线传播：频率高于30 MHz的电磁波将穿透电离层，不会被反射回来

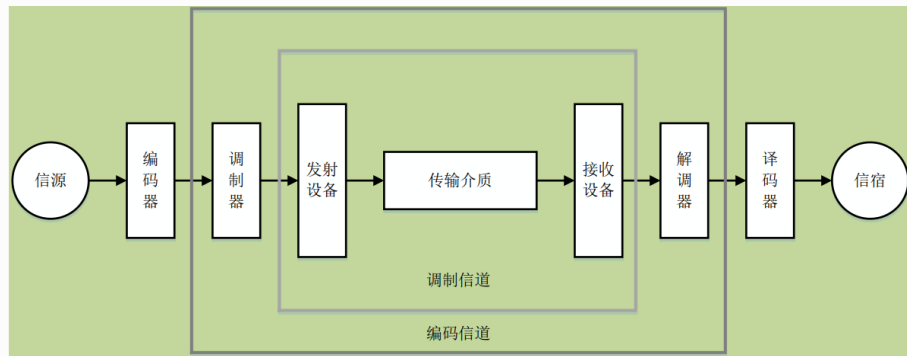
- 沿地面绕射能力也很弱
- 通常采用视线无障碍的点对点直线传播
- 可以设立地面中继站或卫星中继站进行接力传输

频段	名称	典型应用
3~30 Hz	极低频 (ELF)	远程导航，水下通信
30~300 Hz	超低频 (SLF)	水下通信
300~3000 Hz	特低频 (ULF)	远程导航
3~30 kHz	甚低频 (VLF)	远程导航，水下通信，声纳
30~300 kHz	低频 (LF)	导航，水下通信，无线电信标
300~3000kHz	中频 (MF)	广播，海事通信，测向，救援，海岸警卫
3~30 MHz	高频 (HF)	远程广播，电报，传真，搜救，飞机与船舶通信
30~300 MHz	甚高频 (VHF)	电视，调频广播，陆地交通，空中交通管制，导航，飞机通信
0.3~3 GHz	特高频 (UHF)	电视，蜂窝网，微波链路，导航，卫星通信，GPS，监视雷达
3~30 GHz	超高频 (SHF)	卫星通信，微波链路，机载雷达，气象雷达，公用陆地移动通信
30~300 GHz	极高频 (EHF)	雷达着陆系统，卫星通信，移动通信，铁路业务
300 GHz~3 THz	亚毫米波 (0.1~1mm)	尚为划分，实验应用
43~430 THz	红外线 (7~0.7μm)	光通信系统
430~750 THz	可见光 (0.7~0.4μm)	光通信系统
750~3000 THz	紫外线 (0.4~0.1μm)	光通信系统

信道分类与传输特性

Definition of Channel

- **狭义信道：** 信号传输介质
- **广义信道：** 包括信号传输介质和通信系统的一些变换装置，如发送设备、接收设备、天线、调制器等



恒参信道： 信号通过信道发生畸变是**恒定**的，包括各种有线信道和部分无线信道（e.g.微波视线传播链路和卫星链路）

- 理想的恒参信道是一个理想的无失真传输信道
- 对信号幅值产生**固定的衰减**
- 对信号输出产生**固定的时延**

随参信道： 信号通过信道发生畸变是**时变**的，包括许多无线信道

- 信号的传输**衰减随时间随机变化**
- 信号的传输**时延随时间随机变化**
- 存在**多径传播**现象

信道容量和公式

Channel Capacity and Formula

信道容量是指信道无差错传输信息的**最大**平均信息速率

奈奎斯特(Nyquist)信道容量公式

- 理想无噪声信道的信道容量: $C = 2B\log_2 M$
- 理想信道的极限容量

- C 为信道容量, 单位为 b/s (或 bps)
- B 为信道带宽, 单位为 Hz
- M 为进制数, 即信号状态数

例题: 在无噪声情况下, 若某通信链路的带宽为 3 kHz , 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多少?

$$2 \times 3k \times \log_2 16 = 24\text{ kbps}$$

香农(Shannon)信道容量公式

- 有噪声信道的信道容量: $C = B\log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)$
- S/N 通常以分贝(dB)为单位描述:

$$\left(\frac{S}{N}\right) dB = 10\log_{10} \left(\frac{\text{Signal power}}{\text{Noise power}}\right)$$

- C 为信道容量, 单位为 b/s (或 bps)
- B 为信道带宽, 单位为 Hz
- S/N 为信噪比, 即信号能量与噪声能量之比

例题: 若某通信链路的带宽为 2 MHz , 信噪比为 30 dB , 则该通信链路的最大数据传输速率约是多少?

$$2\text{ M} \times \log_2(1 + 1000) = 20\text{ Mbps}$$

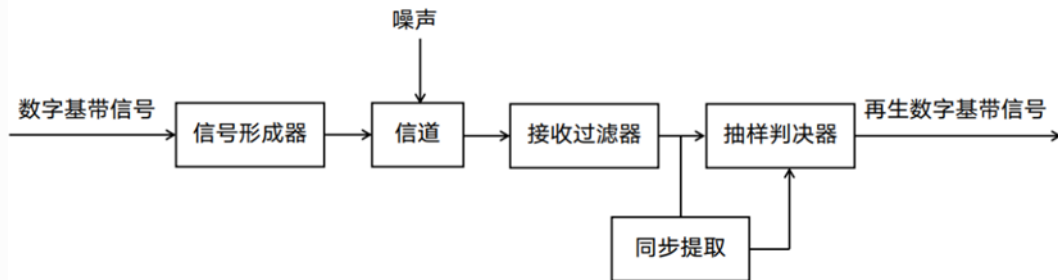
基带传输

baseband transmission foundation

- 信源发出的原始电信号是**基带信号**，基带信号往往包含有较多的**低频成分**，甚至有直流成分
 - 模拟信源→模拟基带信号
 - 数字信源→数字基带信号
- 直接在信道中传送基带信号称为**基带传输**，实现基带传输的系统称为**基带传输系统**
- 直接在信道中传输数字基带信号，称为**数字基带传输**，相应的系统称为**数字基带传输系统**

数字基带传输系统

- 基带信号比较适合在具有低通特性的有线信道中传输，通常不适合在无线信道中直接传输
- 信道的传输特性会引起波形失真，并会受噪声的影响
- 信道中的信号传播一定距离后，信号质量就会有所下降，甚至出现传输误码现象



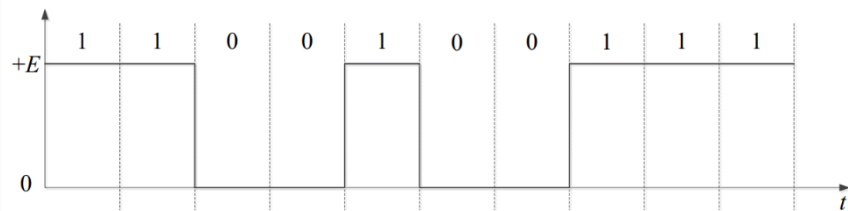
数字基带传输系统结构

典型数字基带传输码型

baseband transmission foundation

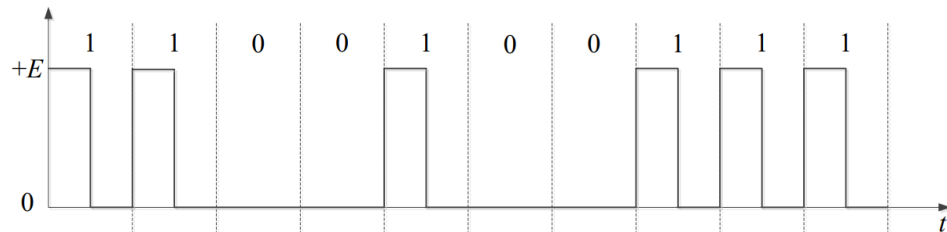
单极不归零码 (Not Return to Zero-NRZ)

- 这种码型易于产生，但不适合长距离传输

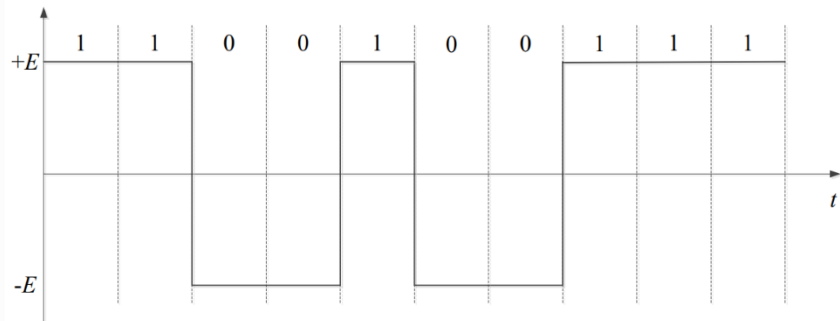


单极归零码 (Return to Zero-RZ)

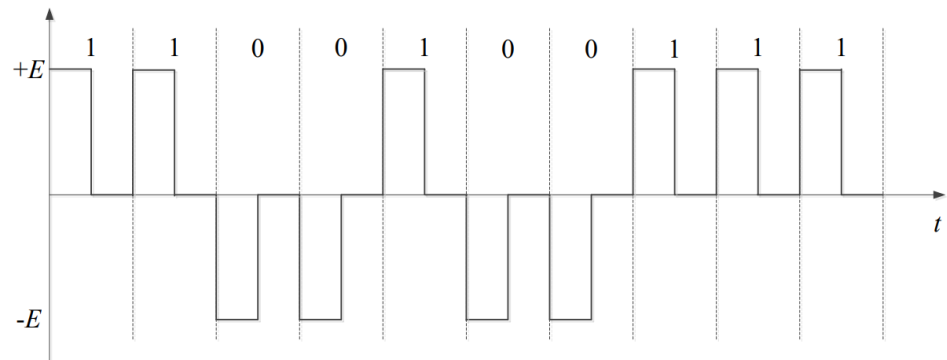
- 码元不为零的时间占一个码元周期的百分比称为**占空比**，该单极归零码的占空比为50%



双极不归零码



双极归零码

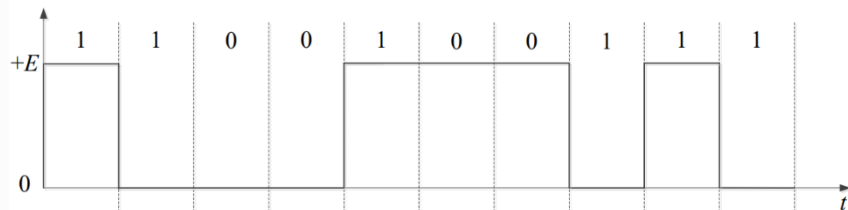


典型数字基带传输码型

baseband transmission foundation

差分码（相对码）

- 相邻脉冲有电平跳变表示1，无跳变表示0

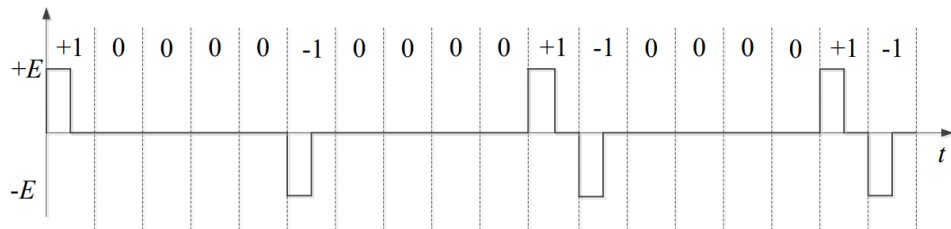


双相码——曼彻斯特（Manchester）码

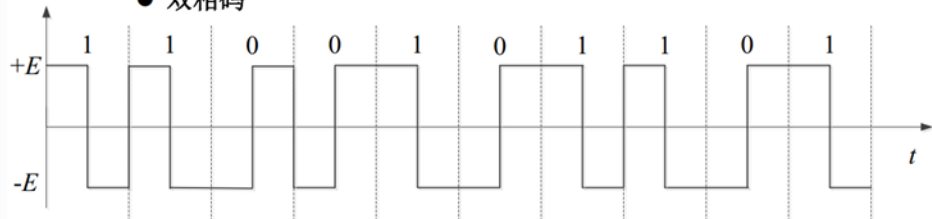
- 双相码只有正、负两种电平
- 双相码在每个比特周期**中间时刻**都会有电平跳变，因此便于**提取定时信息**
 - 正电平跳到负电平表示**1**
 - 负电平跳到正电平表示**0**
- 双相码利用了两个脉冲编码信息码中的一个比特，相当 双极码中的两个比特
- **10 Mbps**的以太网采用曼彻斯特码

AMI（Alternative Mark Inversion）**信号交替反转码**

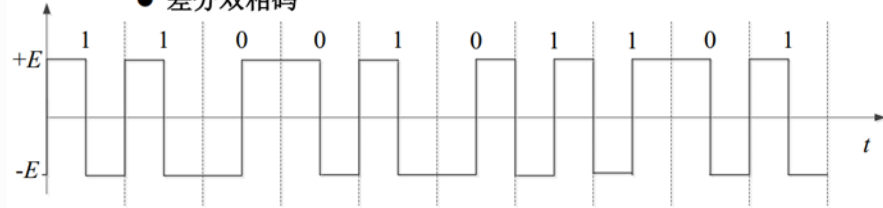
- 信息码中的0编码为AMI传输码中的0（零电平）
- 信号码中的1交替编码为AMI传输码中的+1（正脉冲）和 -1（负脉冲）



● 双相码



● 差分双相码

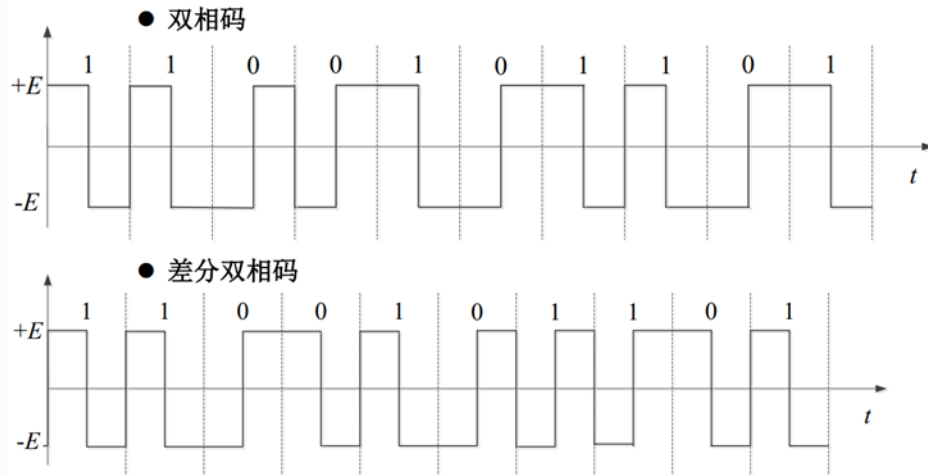


典型数字基带传输码型

baseband transmission foundation

差分双相码——差分曼彻斯特 (Manchester) 码

- 差分双相码的每个比特周期的中间时刻也要进行电平跳变, 但该跳变仅用于同步
- 利用每个比特开始处是否存在电平跳变编码信息:
 - a. 开始处有跳变表示1
 - b. 无跳变表示0
- IEEE802.5令牌环网采用差分曼彻斯特码



nBmB

- nBmB码将 n 位二进制信息码作为一组, 映射成 m 位二进制新码组, 其中 $m > n$
- 由于 $m > n$, 因此 2^m 个码的新码组中只会用到 2^n 个, 多出 $(2^m - 2^n)$ 个码
- 可以从 2^m 个码中优选出 2^n 个码作为**有效码**, 以获得良好的编码性能, 其余码则作为**禁用码**, 可以用于检错
- 快速以太网 (100BASE-TX和100BASE-FX) 传输码采用的是 4B5B编码
 - ✓ 这样只需从 $2^5 = 32$ 个码中优化选择 $2^4 = 16$ 个码, 以便保证足够的同步信息, 并且可以利用剩余的16个禁用码进行差错检测

频带传输

Band transmission basics

基带信号→低通特性→具有低通特性的有线信道
而带通信道（如无线信道）不具有低通特性

频带传输：利用基带信号去调制与对应信道传输特性相匹配的载波信号，通过在信道中传送经过调制的载波信号实现将基带信号所携带信息传送出去

□ **模拟调制：**利用**模拟**基带信号调制载波

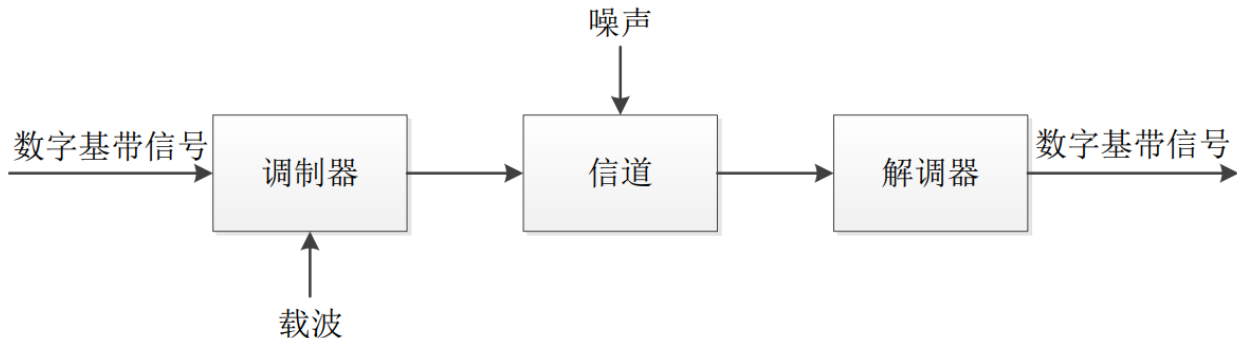
□ **数字调制：**利用**数字**基带信号调制载波，利用数字基带信号控制（或影响）载波信号的某些特征参量

数字调制系统：

频带传输系统通常选择正弦波信号作为载波 $y(t) = a\cos(2\pi ft + \varphi)$

二进制数字调制：

- 二进制**幅**移键控 (2ASK)
- 二进制**频**移键控 (2FSK)
- 二进制**相**移键控 (2PSK)



二进制数字调制

Band transmission basics

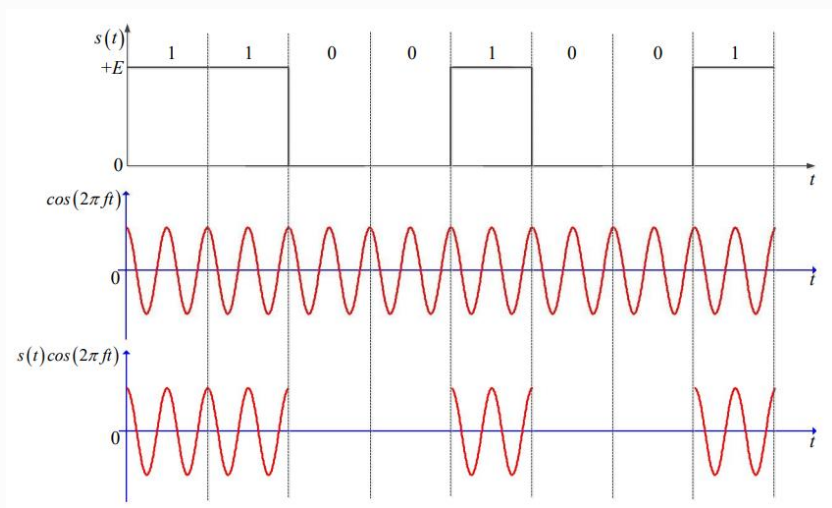
利用二进制基带信号：

1. 二进制幅移键控 (2ASK)

- 利用二进制基带信号控制载波信号的幅值变化

$$y'(t) = s(t)\cos(2\pi ft)$$

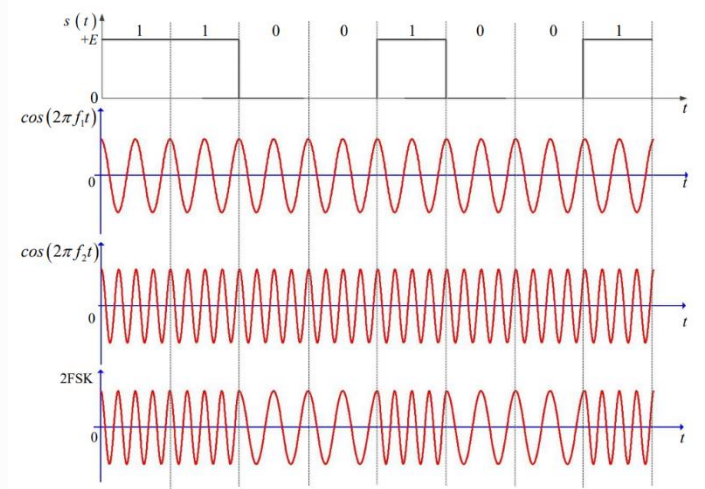
E.g. $s(t)$ 为单极不归零码信号波形



2. 二进制频移键控 (2FSK)

- 选择两个不同频率 f_1 和 f_2 的载波

$$y'(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_1 t), & b_n = 0 \\ \cos(2\pi f_2 t), & b_n = 1 \end{cases} \quad 0 < t < T_b$$



二进制数字调制

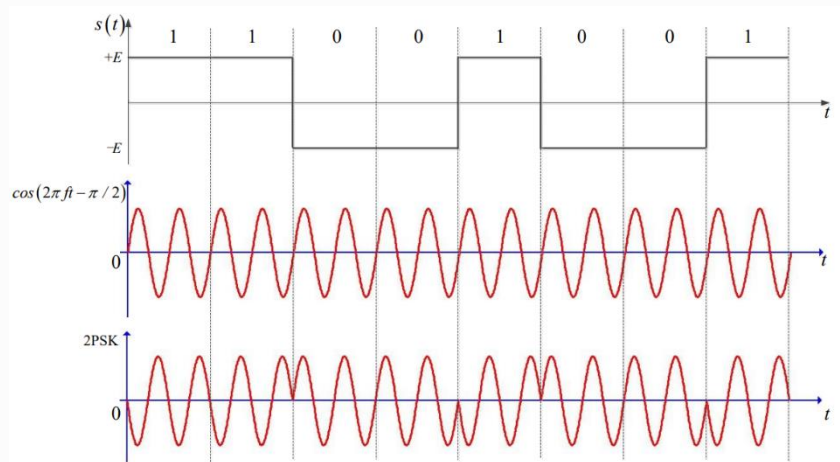
Band transmission basics

利用二进制基带信号:

3. 二进制相移键控 (2PSK)

➤ 利用二进制基带信号控制载波信号的相位变化

$$y'(t) = \cos(2\pi f t + \varphi(b_n)), \text{ 其中 } \varphi(b_n) = \begin{cases} \varphi_0, & b_n = 0 \\ \varphi_0 + \pi, & b_n = 1 \end{cases}$$

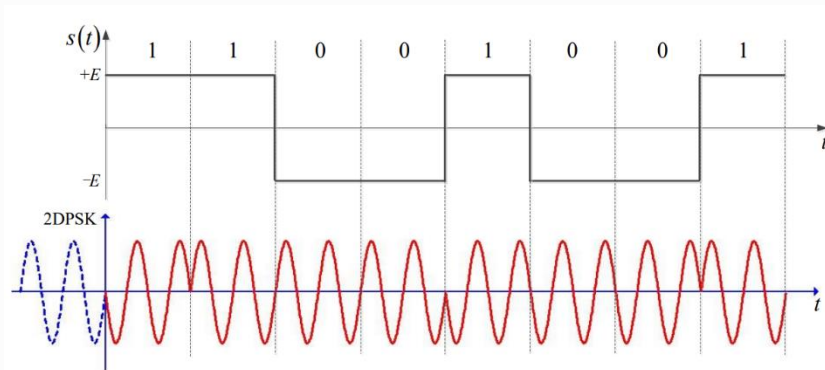


4. 二进制差分相移键控 (2DPSK)

➤ 利用相邻两个码元载波间的相对相位变化表示数字基带信号的数字信息

$$y'_n(t) = \cos(2\pi f t + \varphi_{n-1} + \Delta\varphi(b_n))$$

$$\text{其中 } \Delta\varphi(b_n) = \begin{cases} 0, & b_n = 0 \\ \pi, & b_n = 1 \end{cases}$$



二进制数字调制性能

Band transmission basics

频带利用率:

- 2ASK、2PSK以及2DPSK的频带利用率相同
- 2FSK的频带利用率最低

误码率:

- 在相同信噪比下, 2PSK的误码率最低, 而2ASK的误码率最高
- 抗噪声性能: $2PSK > 2FSK > 2ASK$

对信道特性的敏感性:

- 2ASK对信道特性变化比较敏感, 性能最差
- 2FSK与2PSK对信道特性变化不敏感

多进制数字调制

Band transmission basics

多进制数字调制：在确定带宽与频带利用率的情况下，提高数据传输速率的有效方法

□ 提高每个码元传输信息量，**每个码元调制多个比特信息**，即多进制数字调制

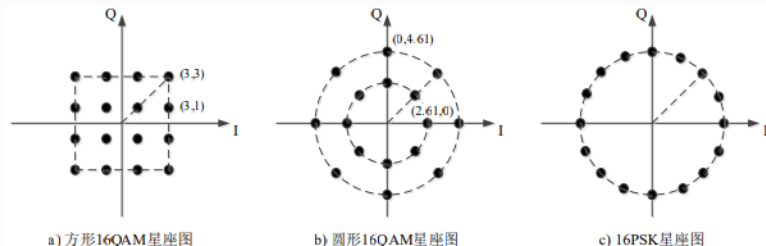
数据传输速率 $R_b(bps)$ 与码元传输速率 $R_B(Baud)$ 以及进制数 M 之间的关系为： $R_b = R_B \log_2 M$

□ R_b 也称为**比特率**，单位为 bps ；码元传输速率 R_B 也称为调制速率，或称为**波特率**，单位为 $Baud$

注：多进制数字调制需要更大的信噪比，发送端需要增大发送信号的功率

正交幅值调制QAM——幅值相位联合键控(APK)

- 具有**高频带利用率**，且可以自适应调整调制**速率**
- 系统设备比较**简单**，抗噪能力强，应用广泛
- 调制信号的幅值和相位均受基带信号调制



$$y'(t) = A_n \cos(2\pi ft) + B_n \sin(2\pi ft), \text{ 其中 } \begin{cases} A_n = s_n \cos(\varphi_n) \\ B_n = -s_n \sin(\varphi_n) \end{cases} \Leftrightarrow y'(t) = s_n \cos(2\pi ft + \varphi_n)$$

➤ QAM信号是由两路相互正交载波经调制后叠加而成

- $A_n \rightarrow$ 同相信号 (I信号), $B_n \rightarrow$ 正交信号 (Q信号)

物理层接口规程

interface procedures

数据处理终端设备DTE：如计算机，通常**不包括**数据传输设施

数据通信设备DCE：连接DTE和物理介质的**接口**，将DTE的数据处理好以信号编码发送给物理介质

- DCE把DTE的数据经过编码以信号的方式传给在介质
- DCE和DTE之间通信数据和控制信息（在二者之间的**交换电路**上完成、需要明确的**接口标准**）

机械特性

指明接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等等。

电气特性

指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。

功能特性

指明某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义。

过程特性：

指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。

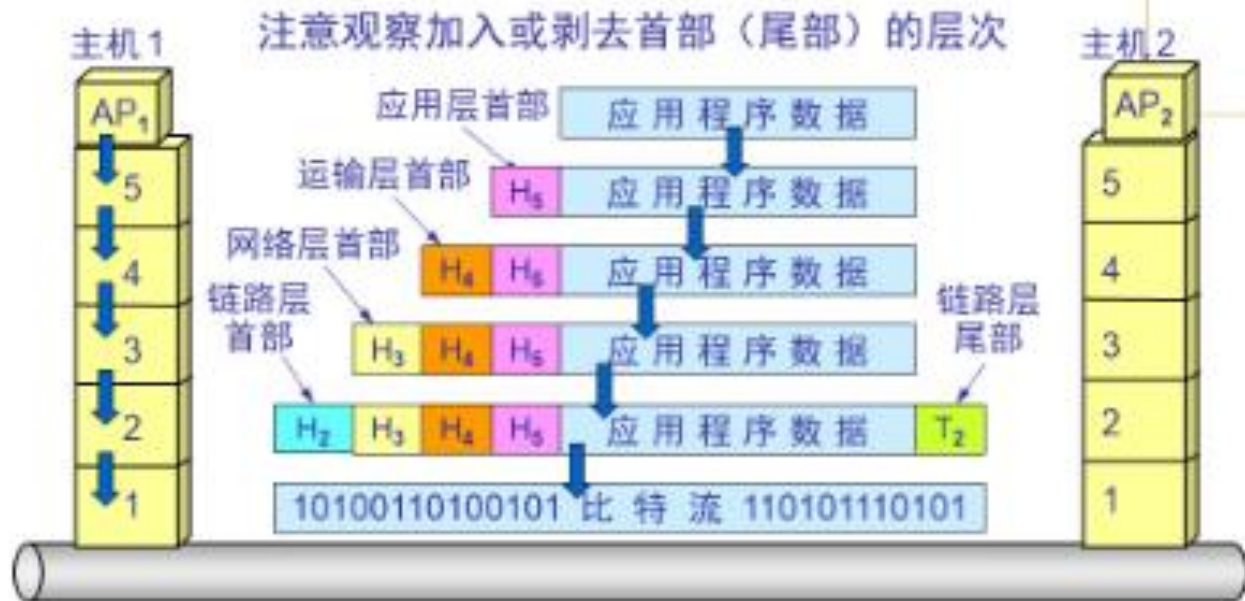
五层协议的体系结构



- 应用层
 - 面向用户，针对不同需求，提供多种应用。
- 运输层
 - 面向用户，负责解决进程间的通信问题
 - TCP/IP的可靠性传输是在这层实现的
- 网际层
 - 面向网络，实现了跨越不同网络间通信时的路径选择及数据传输。
 - 硬件上依靠路由器解决路径选择及异构网络间的协议转换
 - 软件上IP协议实现了统一的IP编址
- 链路层
 - 单一网络中，相邻结点间的数据传输
- 物理层
 - 面向通信，如线缆，接口形状尺寸，电气特性，功能特性，过程特性
 - 无线传输
 - 数字调制及多路复用



主机1向主机2发送数据



预祝大家考试成功！

