



北京邮电大学

Beijing University of Posts and Telecommunications

计算机网络

第七章 物理层 Physical Layer

网络空间安全学院

2025年6月



主要内容

- ◆ 7.1 物理层概述
- ◆ 7.2 数据通信的基础知识
- ◆ 7.3 传输介质
- ◆ 7.4 调制技术和编码技术
- ◆ 7.5 复用技术
- ◆ 7.6 物理层互连设备
- ◆ 7.7 物理层的安全隐患



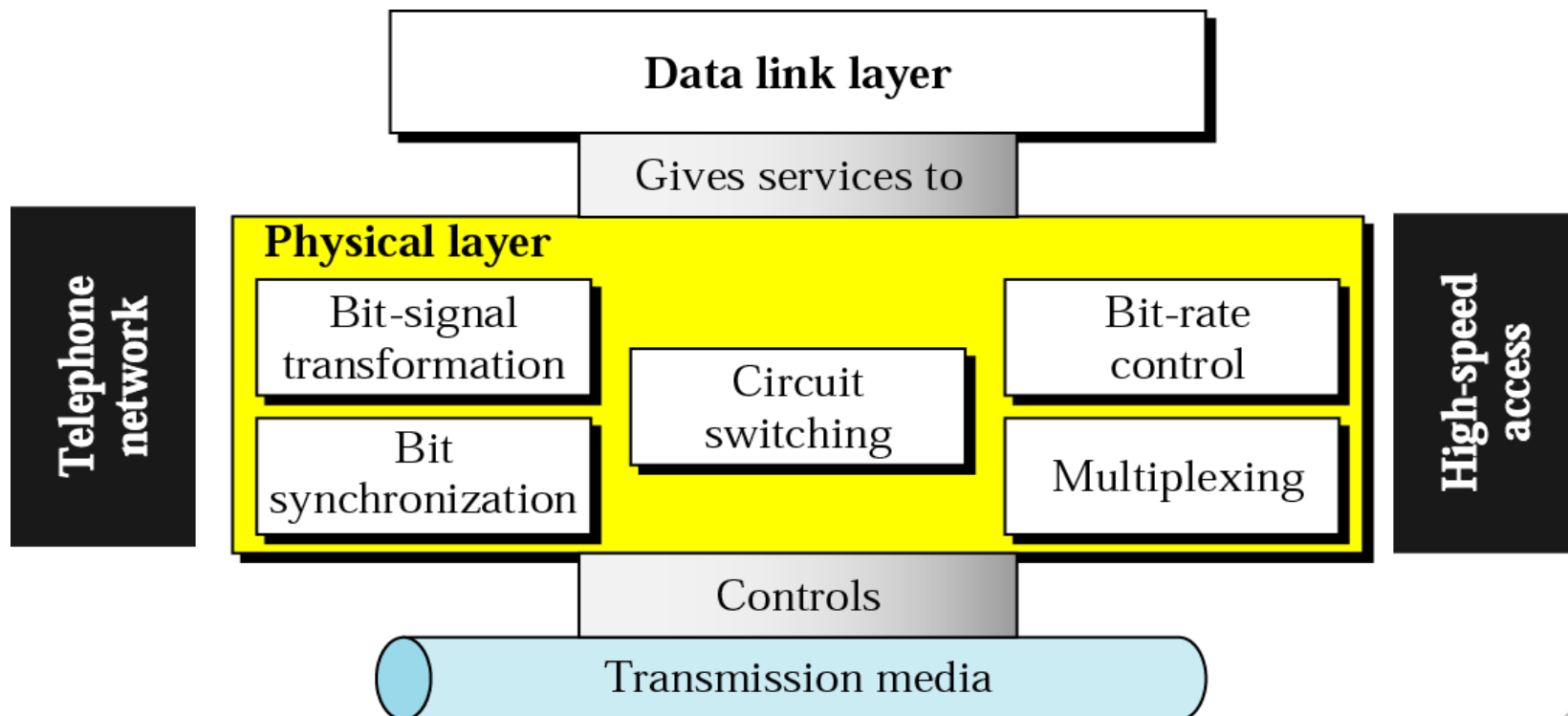
教学内容及要求

- ◆ 掌握物理层的功能和主要概念
- ◆ 掌握数据通信的基本概念和理论基础：
 - Nyquest公式和Shannon公式
- ◆ 掌握常用的调制、编码和复用的方法要点
- ◆ 了解HUB的功能
- ◆ 了解物理层的安全隐患



物理层的位置和基本功能

- ◆ 网络体系结构的最底层，实现真正的数据传输
- ◆ 将二进制数据编码或调制成信号，发送到传输介质(传输媒体)；
- ◆ 从传输介质接收信号，转换成二进制数据



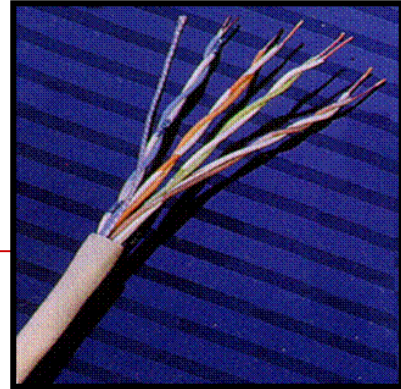
物理层的主要功能

◆ 规定了与传输介质的接口的特性

- **机械特性**：规定接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列等
- **电气特性**：规定在接口电缆的各条线上的电压范围
- **功能特性**：规定接口电缆的某条线出现某一电平的含义
- **规程特性**：规定各种可能事件的出现顺序



物理层协议示例



◆ IEEE802.3, 10BaseT

- 数据率10Mbps, 传输介质为双绞线, 拓扑结构为星形

◆ 物理接口的特性

- 机械特性: RJ45接口

- 电气特性:

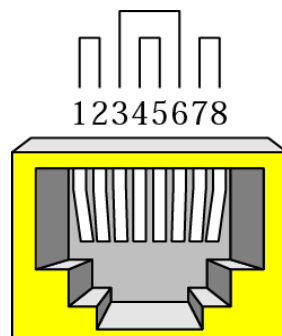
- ☐ Manchester编码

- ☐ 电平: 2.5v, -2.5v

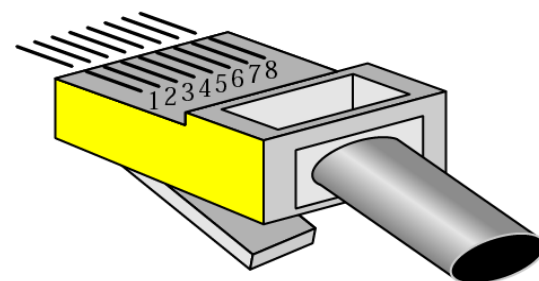
- 功能特性:

- ☐ 一对线发送 (1,2针)、一对线接收 (3,6针)

- ☐ 全双工通信



RJ-45 Female



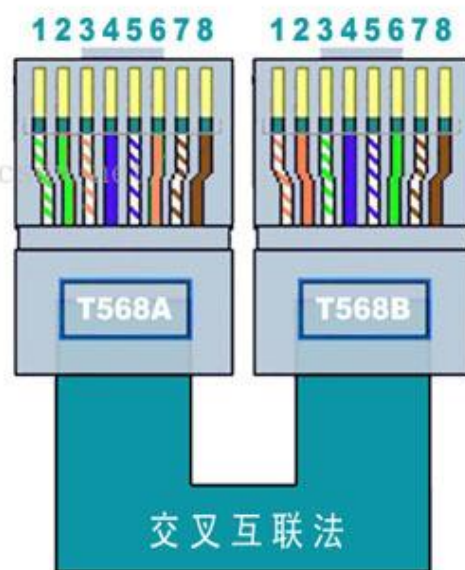
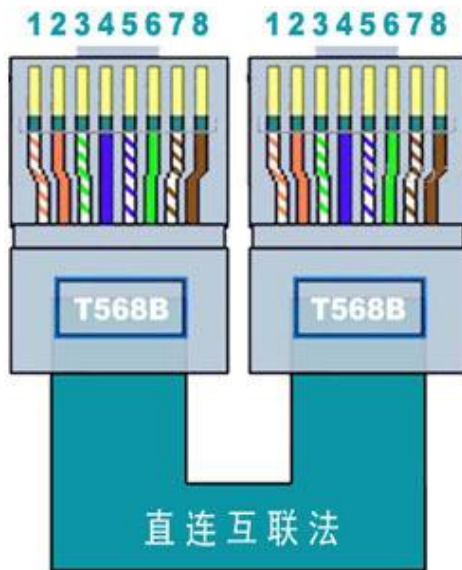
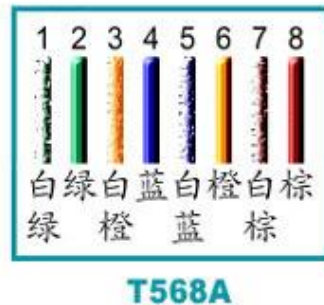
RJ-45 Male



物理层协议示

RJ-45网线连接方法

- 直连互联法（不同设备之间连接的方式）
- 交叉互联法（相同设备之间的连接方式）



一、直连线互连

网线的两端均按 T568B 接

1. 电 脑 ↔ ADSL 猫
2. ADSL 猫 ↔ ADSL 路由器的 WAN 口
3. 电 脑 ↔ ADSL 路由器的 LAN 口
4. 电 脑 ↔ 集线器或交换机

二、交叉互连

网线的一端按 T568B 接，另一端按 T568A 接

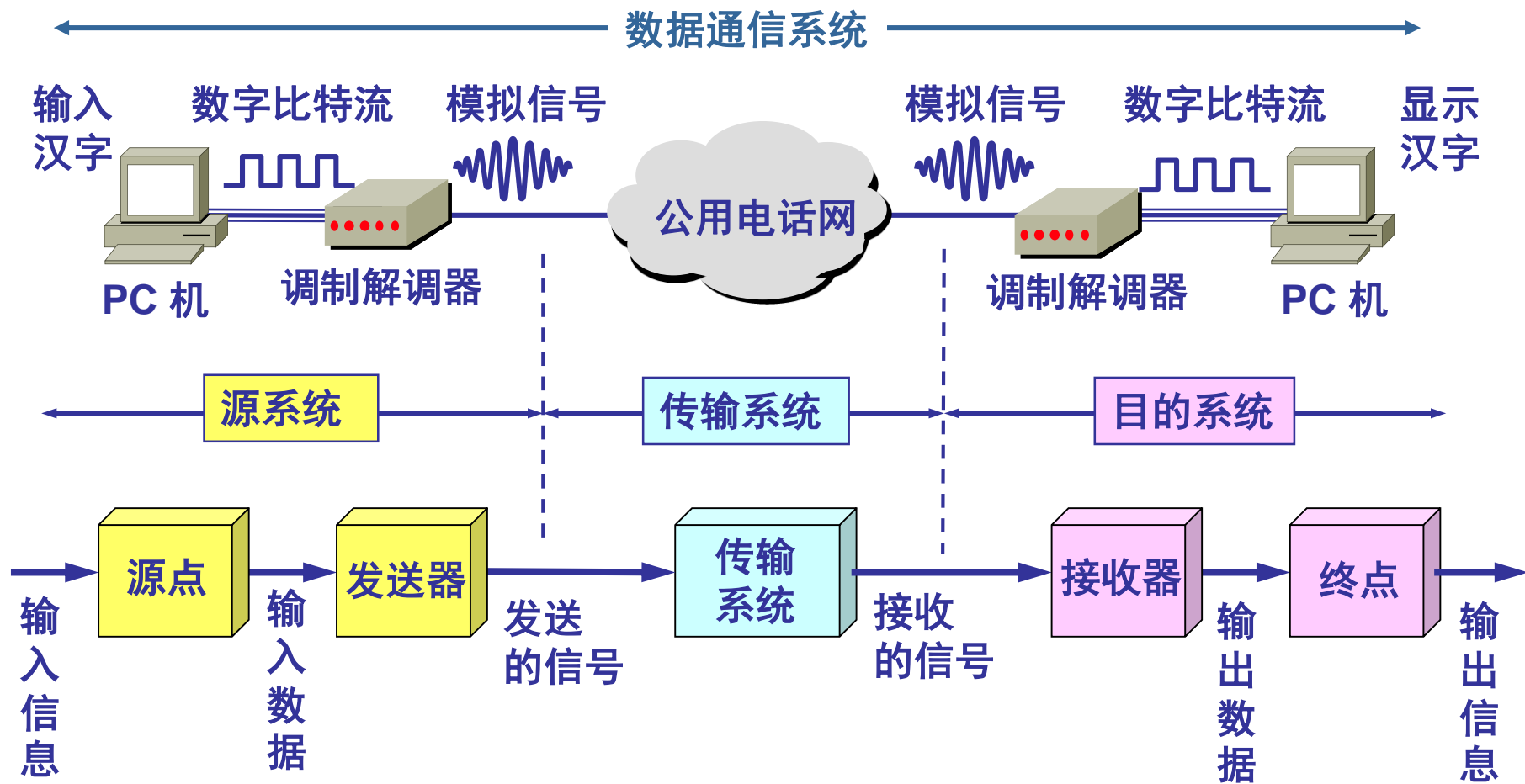
1. 电 脑 ↔ 电 脑，即对等网连接
2. 集线器 ↔ 集线器
3. 交换机 ↔ 交换机
4. 路由器 ↔ 路由器

主要内容

- ◆ 7.1 物理层概述
- ◆ 7.2 数据通信的基础知识
- ◆ 7.3 传输介质
- ◆ 7.4 调制技术和编码技术
- ◆ 7.5 复用技术
- ◆ 7.6 物理层互连设备
- ◆ 7.7 物理层的安全隐患



数据通信系统的模型



数据通信的基本概念

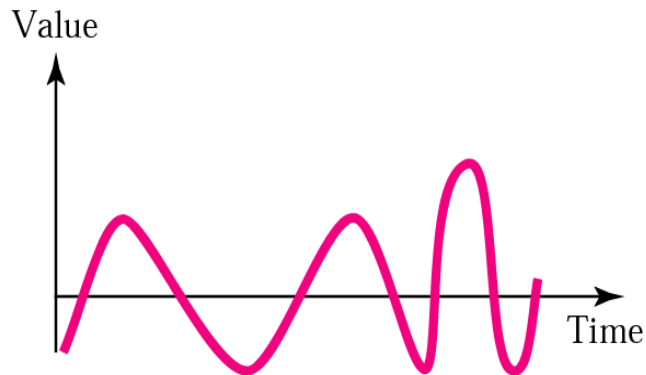
◆ 信息、数据与信号

- 信息：人类知识的表征，通信的目的就是传输信息。信息的载体包括数字、文字、语音、图形或图像。
- 数据：承载信息的实体，以二进制的形式在计算机系统中处理。
- 信号：数据的电平或电磁波形式表示，在传输介质上传播。
- 码元：基本信号单位
 - 码元的速率称为波特率(Baud)

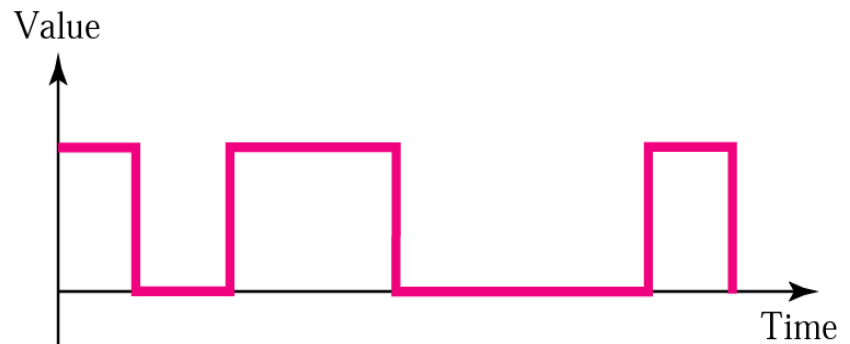


模拟信号与数字信号

- ◆ 模拟信号(Analog Signal): 信号的幅度随时间连续变化。
- ◆ 数字信号(Digital Signal): 离散的电平值



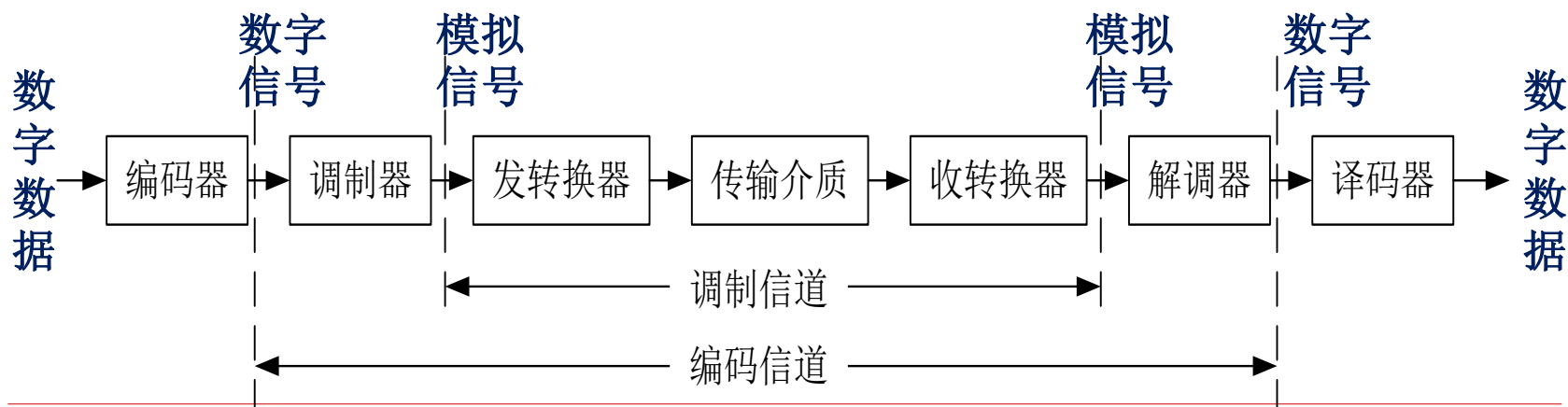
a. Analog signal



b. Digital signal

信道：信号的通道

- ◆ 狭义的**信道**指的是连接两个设备之间的传输介质，即物理链路（计算机网络课程范畴使用）
- ◆ 广义的信道指的是信号传输的整个路径，中间可能经过多个设备，如因特网上位于不同城市的两台计算机之间的通路
- ◆ **模拟信道**以连续的电磁波形式来传输数据；**数字信道**以离散的数字脉冲形式传输数据

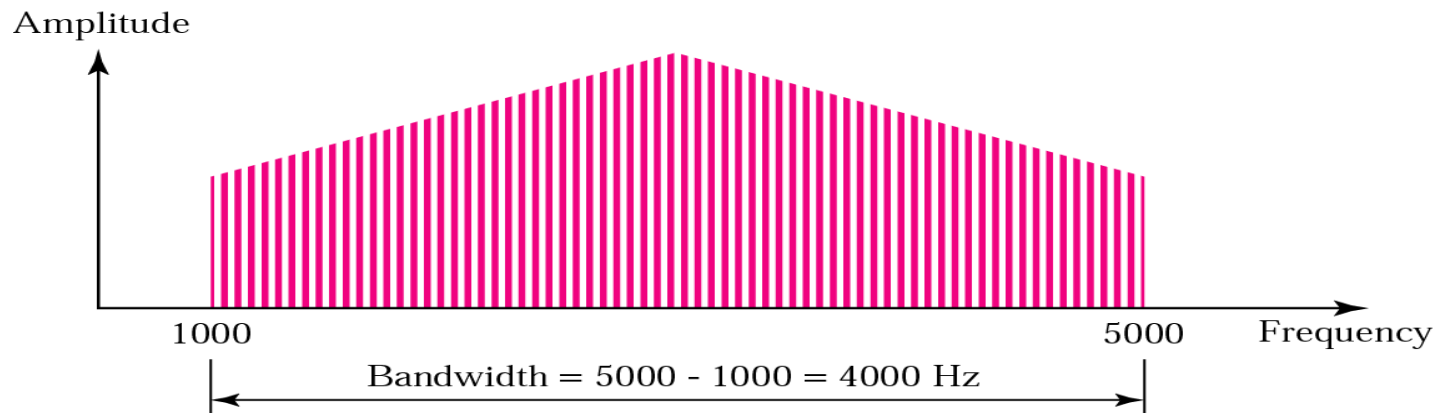


模拟通信与数字通信

- ◆ 模拟通信：信道中传输的是模拟信号，如有线电视系统中的通信
 - 信道利用率高，但传输质量差
- ◆ 数字通信：信道中传输的是数字信号，如因特网上的通信
 - 衰减低，抗干扰性强
 - 信道利用率较低
- ◆ 模拟信道上传输的不一定是模拟数据，反之亦然

数据率与带宽

- ◆ 带宽：信道传输电磁波信号的频率范围（可通过的最高频率 - 最低频率），单位：Hz
- ◆ 数据率：信道的最大传输速率，单位：bps



数据率与带宽有关！

最大数据率（信道容量）公式

- ◆ 奈奎斯特（Nyquist）公式：用于无噪声信道

$$C = 2 \times B \times \log_2 L$$

- C：最大数据率，B：带宽，L：信号级数

- ◆ 香农（Shannon）公式：用于噪声信道

$$C = B \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- S/N：信噪比

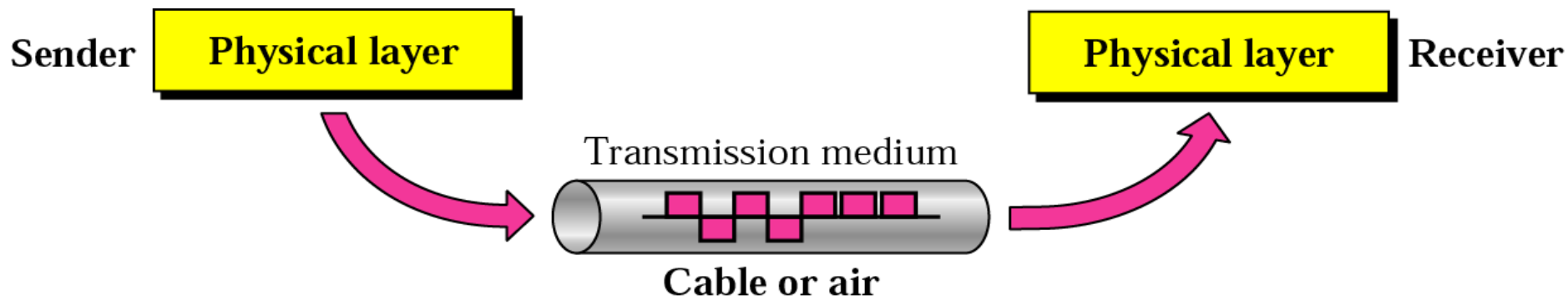
- 单位为分贝，dB值=10×lg(S/N)

主要内容

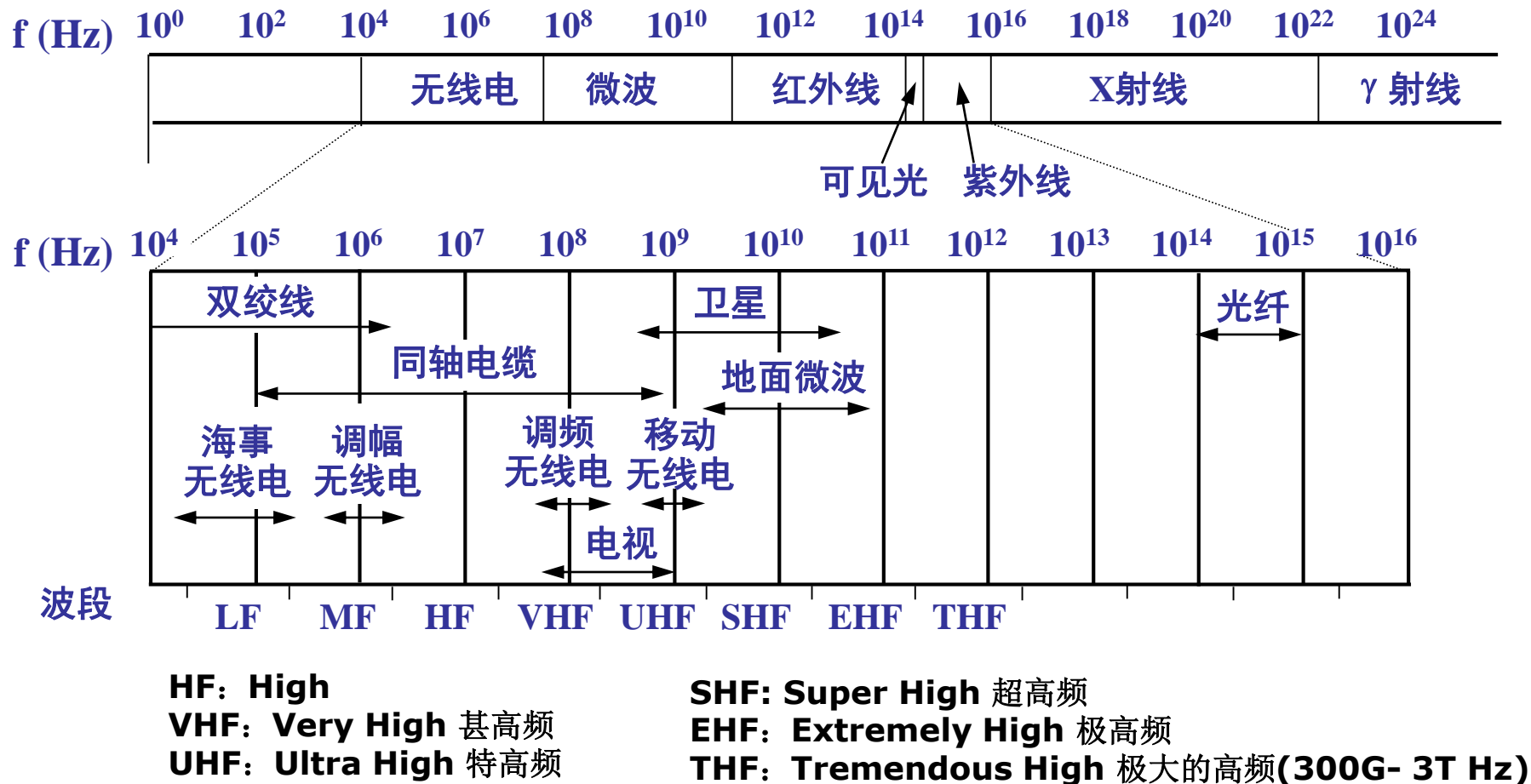
- ◆ 7.1 物理层概述
- ◆ 7.2 数据通信的基础知识
- ◆ 7.3 传输介质
- ◆ 7.4 调制技术和编码技术
- ◆ 7.5 复用技术
- ◆ 7.6 物理层互连设备
- ◆ 7.7 物理层的安全隐患

传输介质及分类

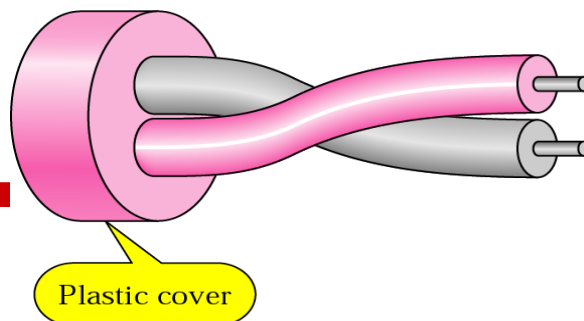
- ◆ 也称为传输媒体
- ◆ 有线介质
 - 双绞线、同轴电缆、光纤
- ◆ 无线介质
 - 无线电（RF）、微波、卫星



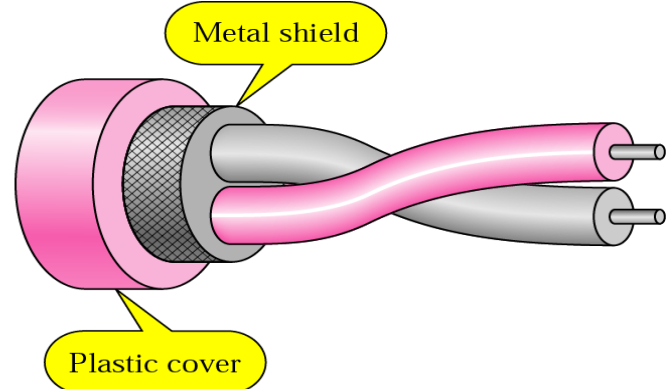
电磁波的频谱



双绞线

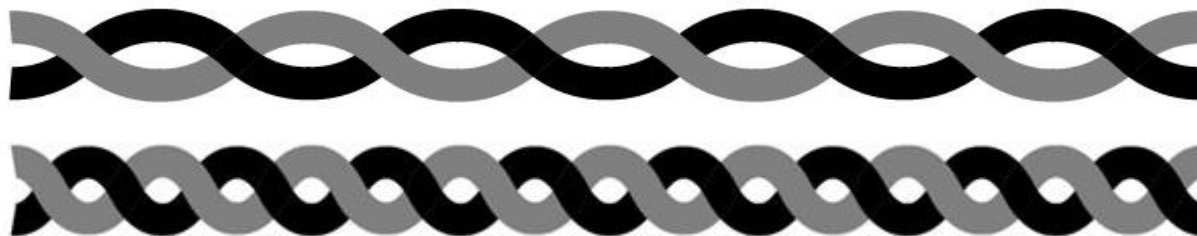


a. UTP



b. STP

- ◆ 两根互相绝缘的铜线互相缠绕构成
- ◆ 可传输模拟信号和数字信号
- ◆ 主要应用
 - 固定电话的用户线
 - 计算机的网线



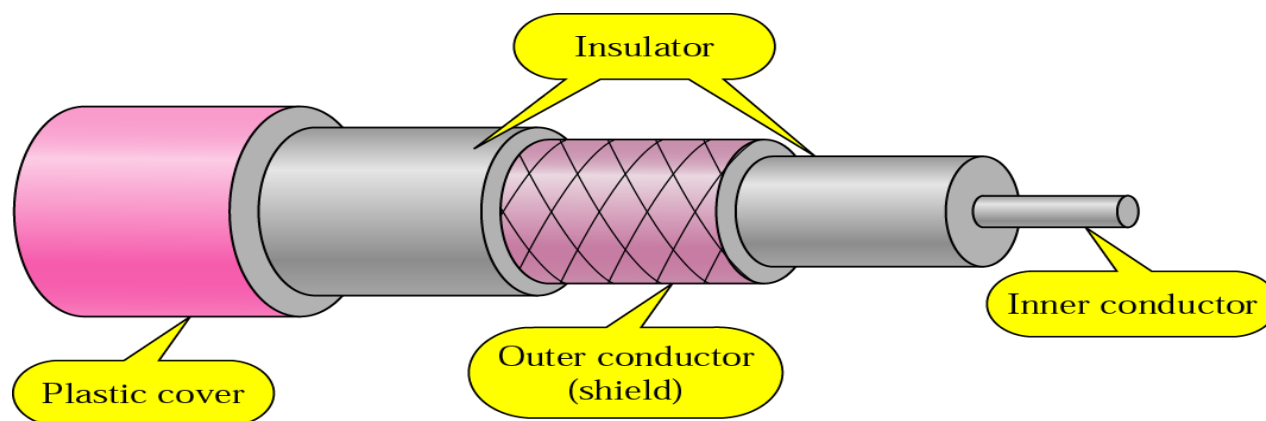
UTP3

UTP5

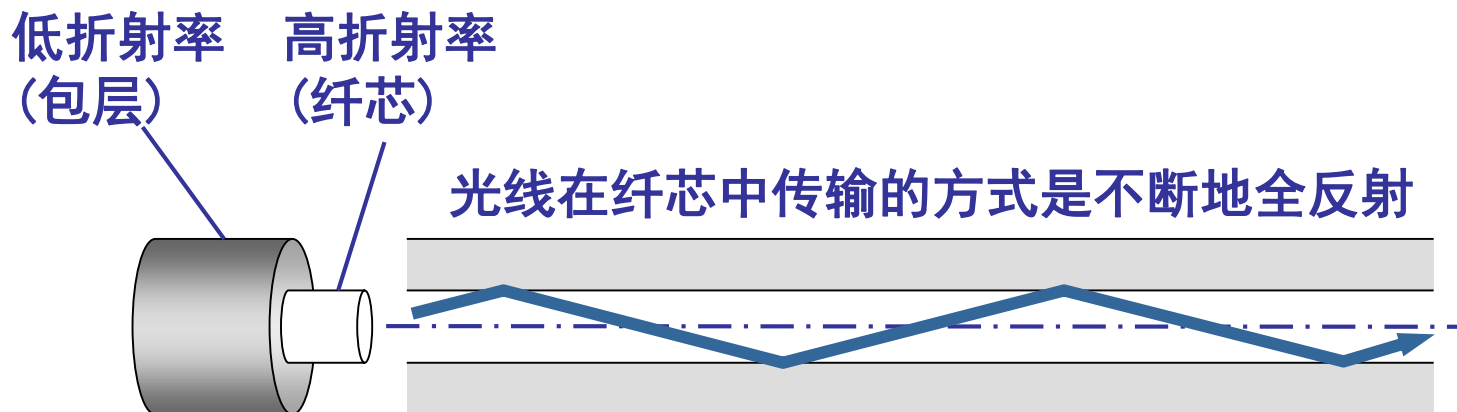
同轴电缆

◆ 两类同轴电缆

- 阻抗 50Ω ，传输数字信号，用于计算机联网
- 阻抗 75Ω ，传输模拟信号，有线电视电缆

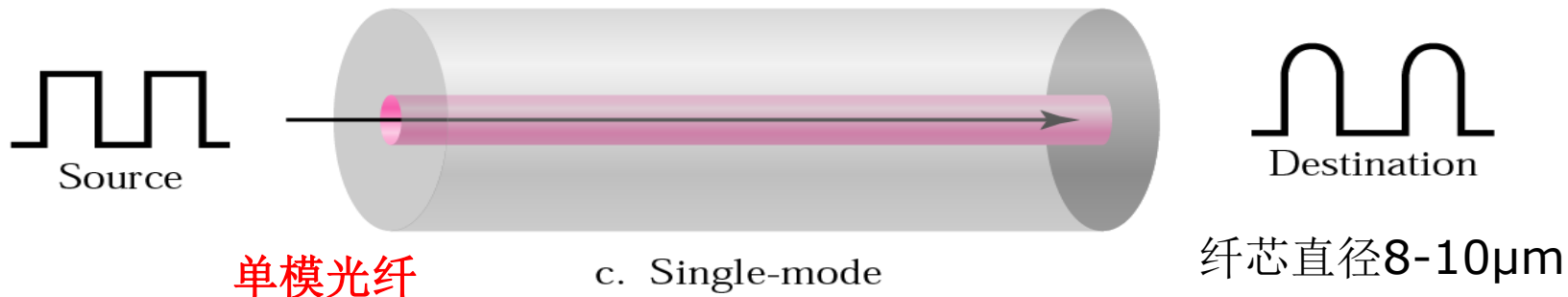
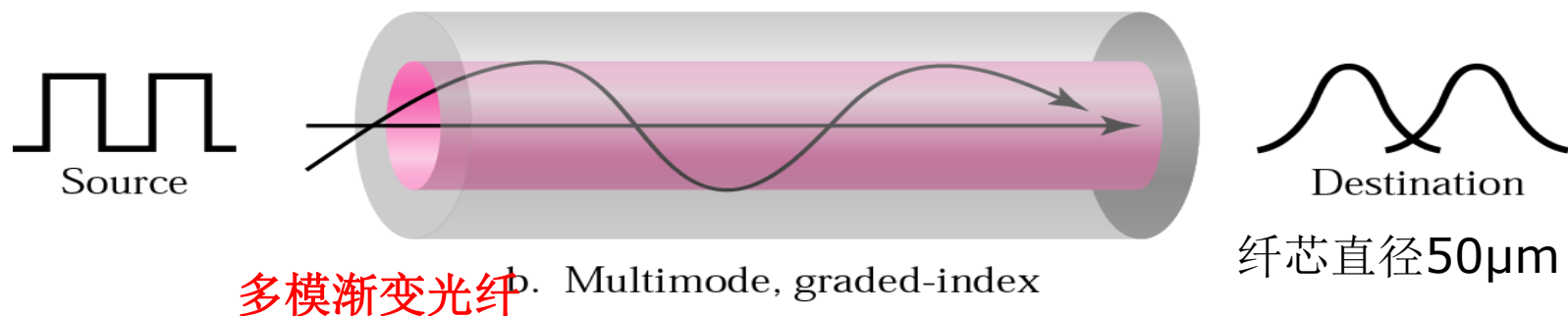
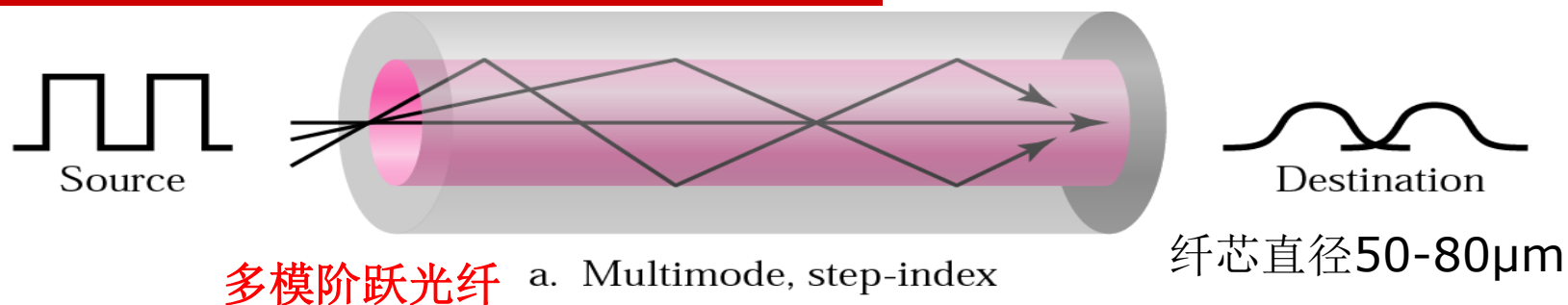


光纤



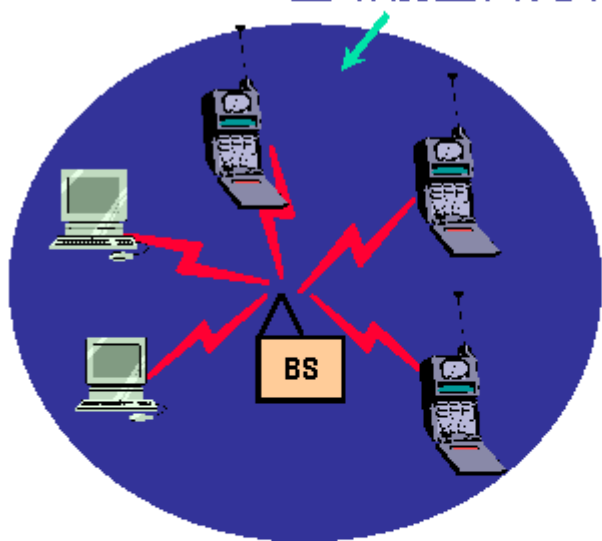
- ◆ 用于传输数字信号
- ◆ 高带宽
- ◆ 抗干扰
- ◆ 低衰减、传输距离长
- ◆ 重量轻

光纤的模式



无线电 (RF)

基站覆盖的无线电区域

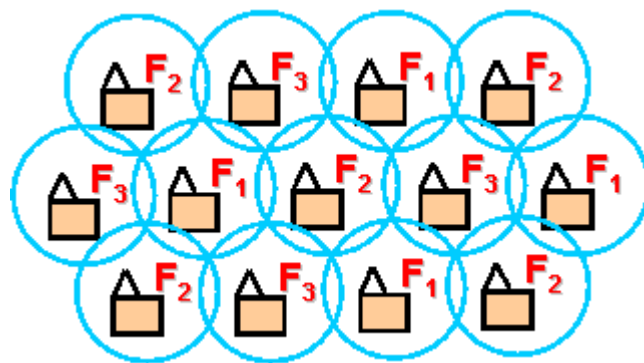


基站



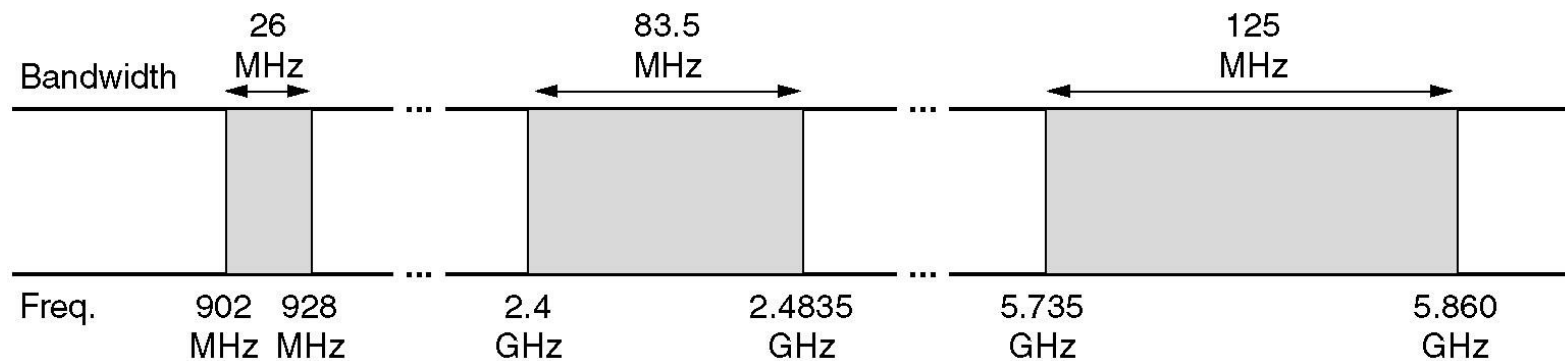
计算机和手机终端

- ❑ 全方位传输
- ❑ 可以穿透建筑物
- ❑ 可以长距离传输
- ❑ 抗干扰能力差



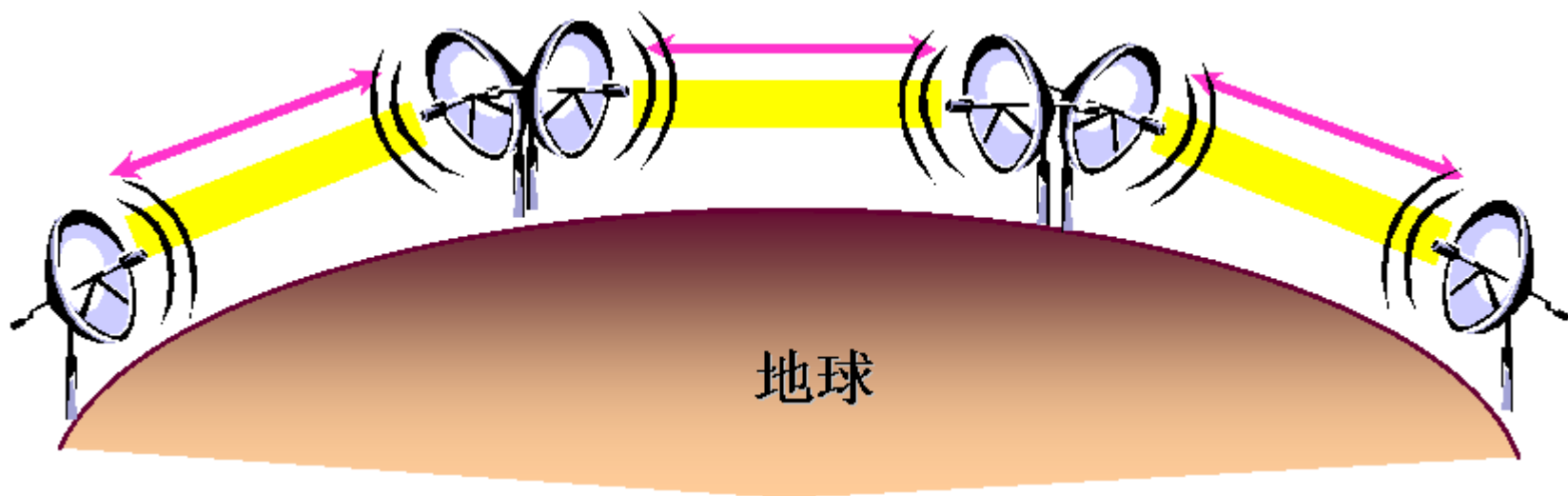
ISM频段

- ◆ Industrial, Scientific, Medical
- ◆ 不必申请
- ◆ 在WLAN、蓝牙中广泛使用



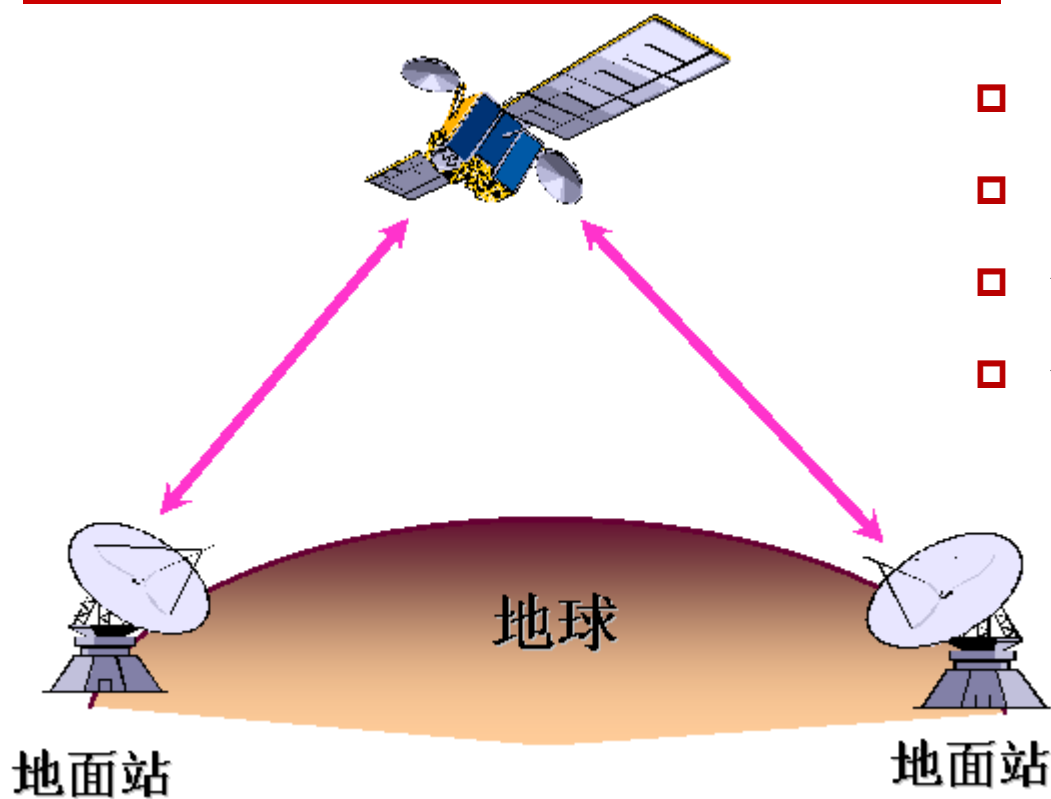
地面微波

- 直线传输
- 长距离传输时需要中继器 (Repeater)
- 不能穿透建筑物
- 易受天气影响



通信卫星

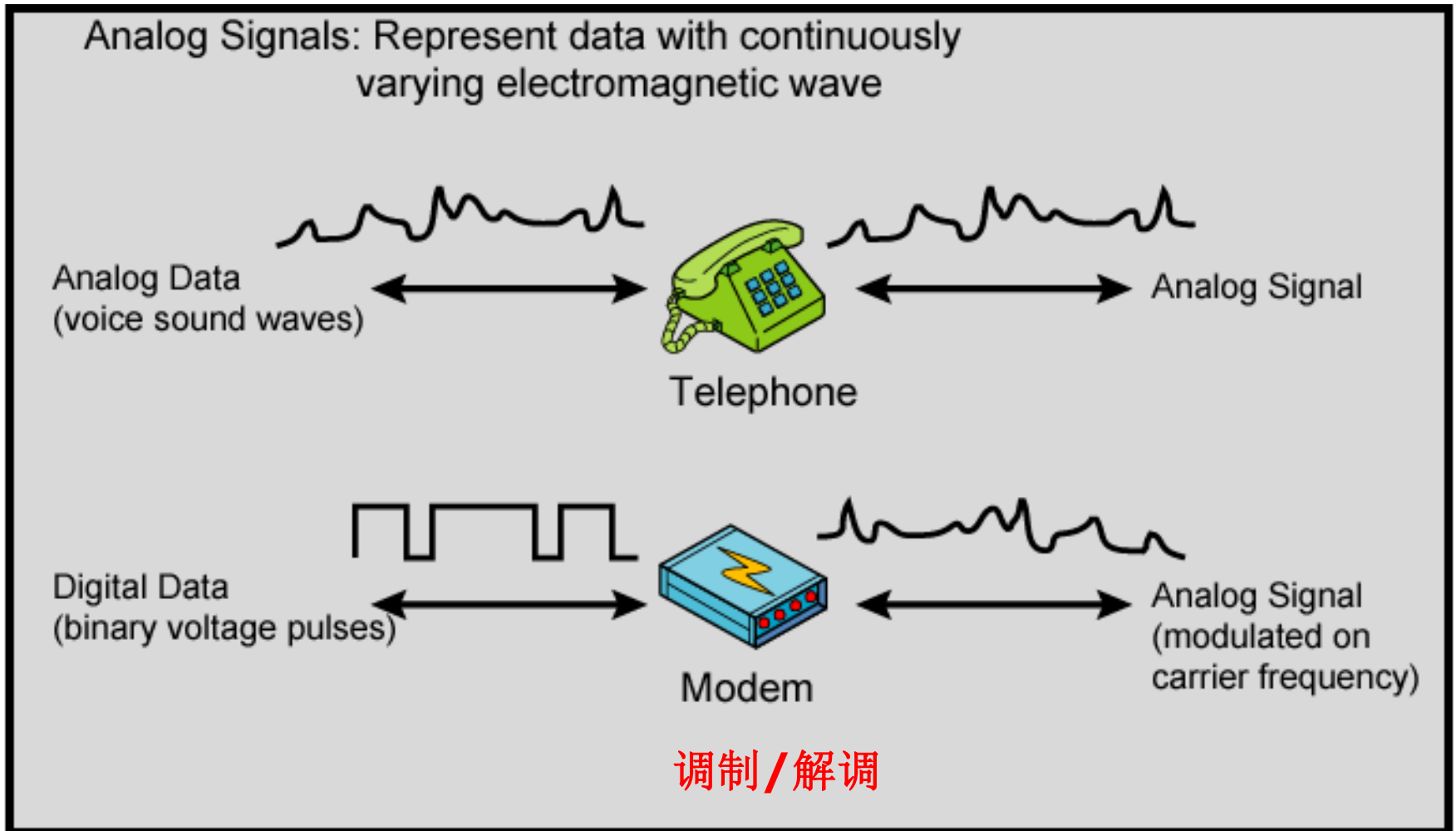
- ❑ 以卫星作中继器
- ❑ 支持广播方式
- ❑ 传输距离与成本无关
- ❑ 传播时延大



主要内容

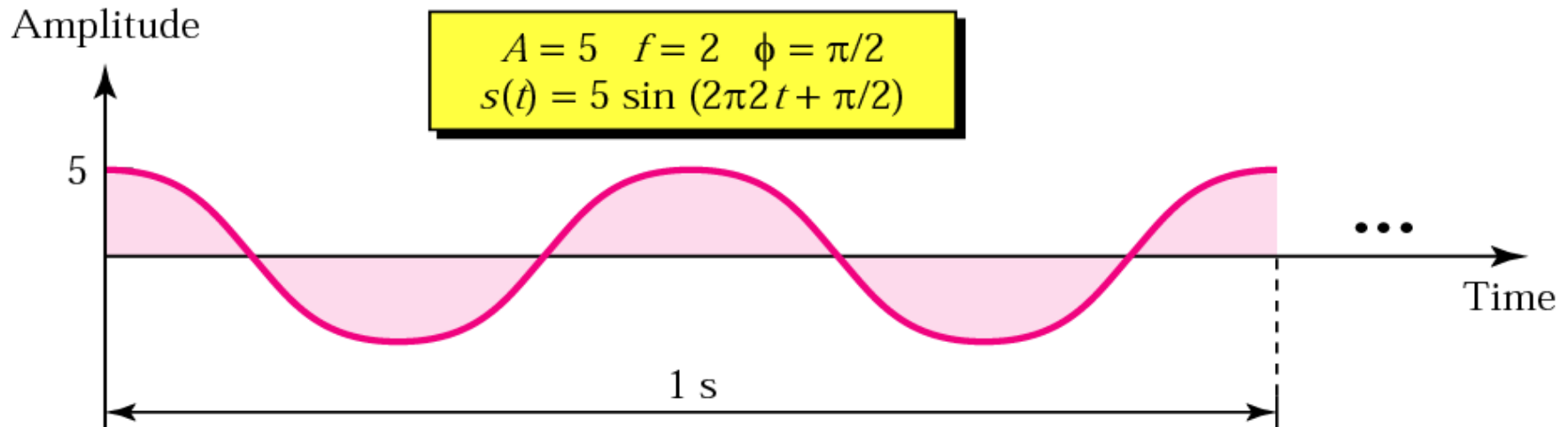
- ◆ 7.1 物理层概述
- ◆ 7.2 数据通信的基础知识
- ◆ 7.3 传输介质
- ◆ 7.4 调制技术和编码技术
- ◆ 7.5 复用技术
- ◆ 7.6 物理层互连设备
- ◆ 7.7 物理层的安全隐患

模拟信号承载模拟数据和数字数据

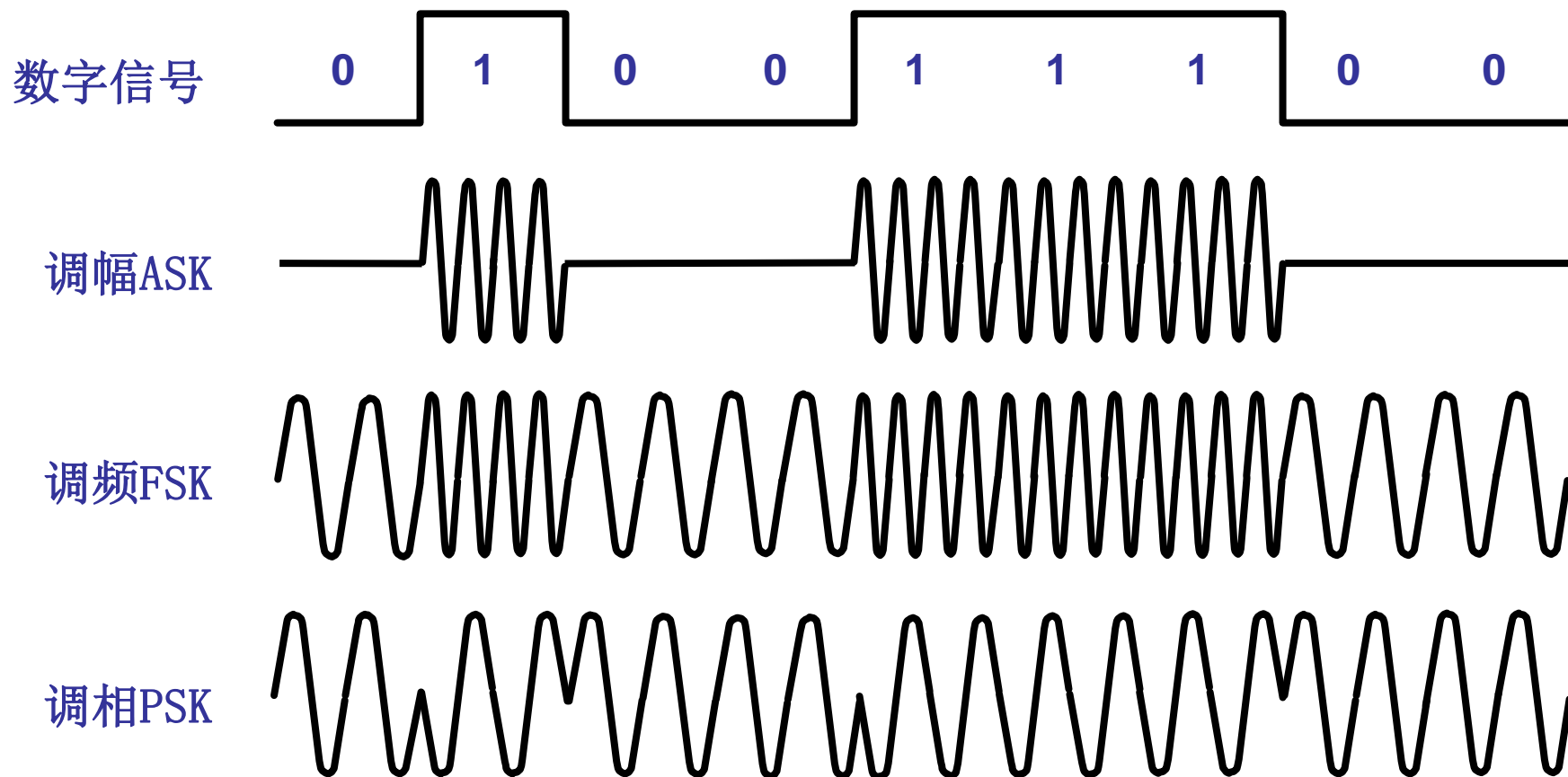


模拟信号的特征

◆ 振幅、频率、相位

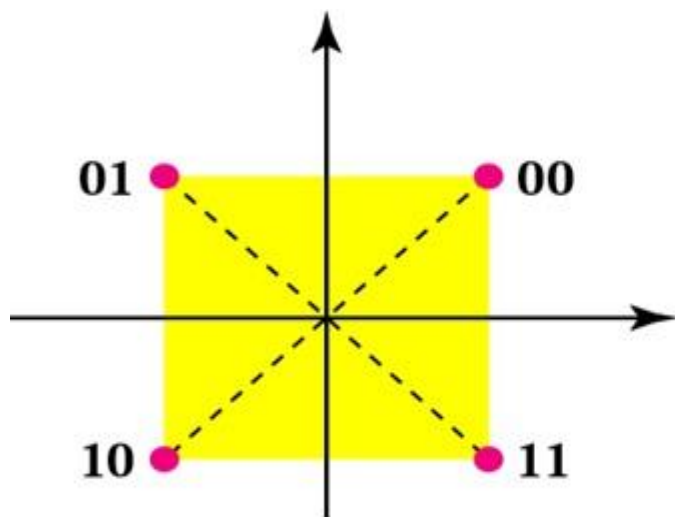


基本调制方法

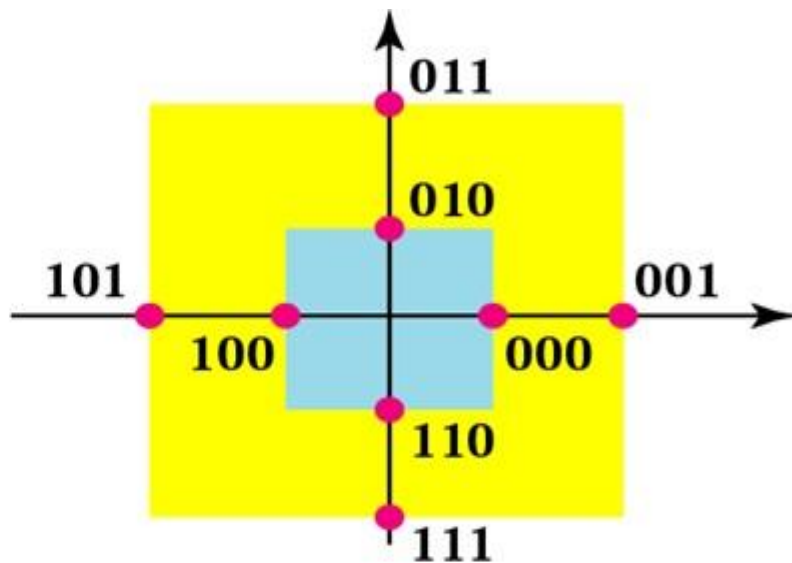


多级调制方法：正交振幅调制QAM

- ◆ 调幅和调相相结合
- ◆ 一个码元表示多位数据



4-QAM
1级幅值, 4级相位

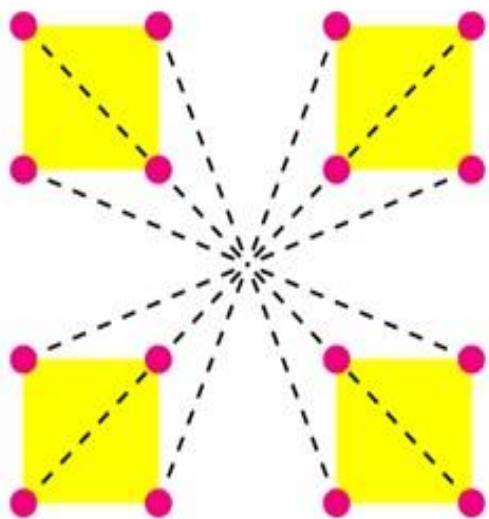


8-QAM
2级幅值, 4级相位

调制阶数

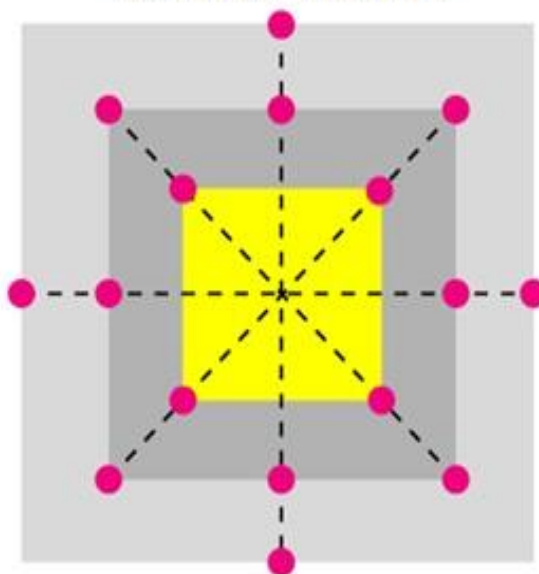
QAM的多种调制形式

3级幅值，12级相位



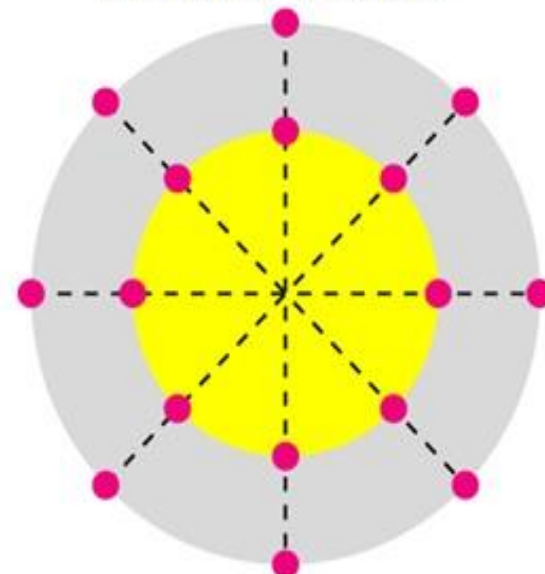
16-QAM

4级幅值，8级相位



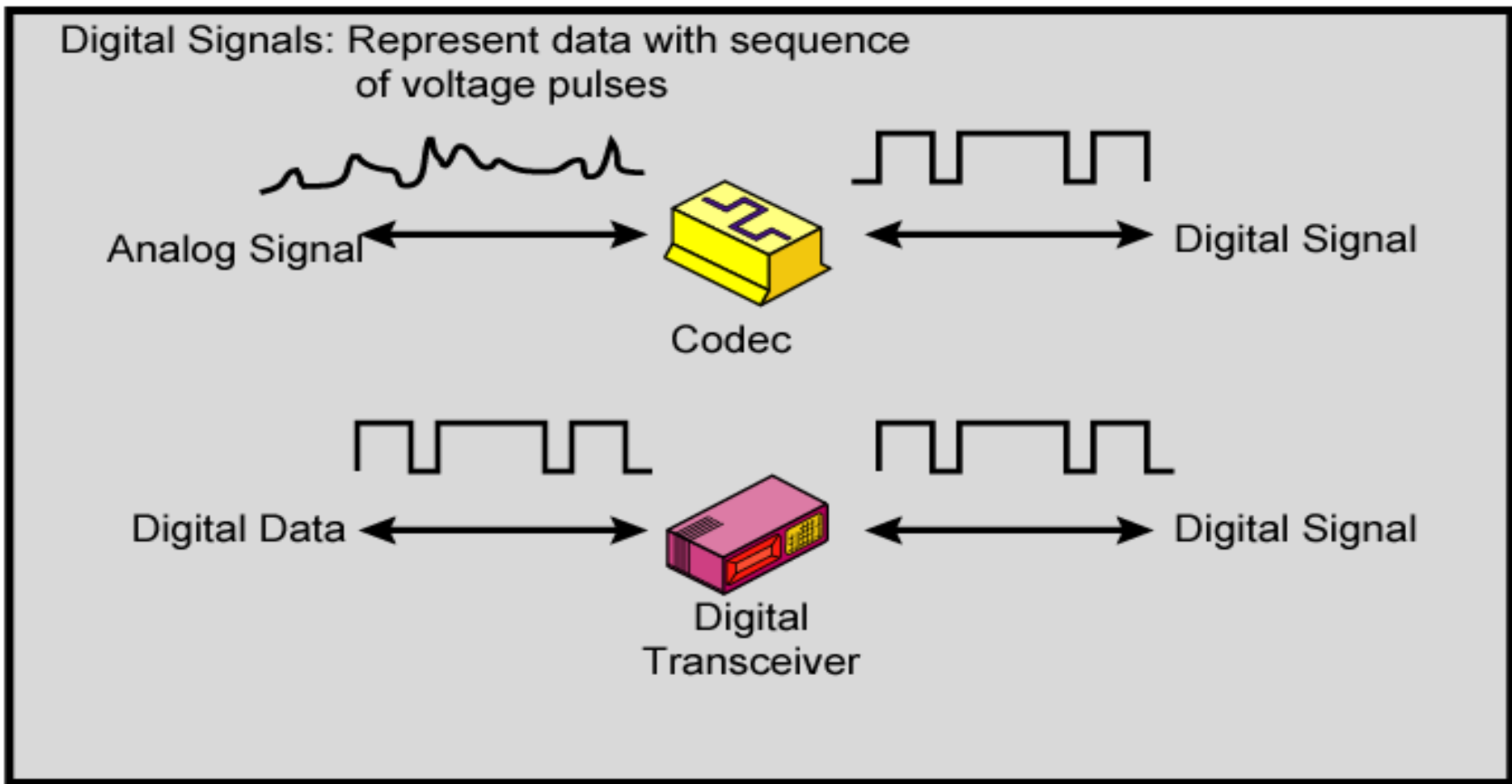
16-QAM

2级幅值，8级相位



16-QAM

数字信号承载模拟数据和数字数据



数字数据编码技术

NRZ-L

不归零编码

NRZI

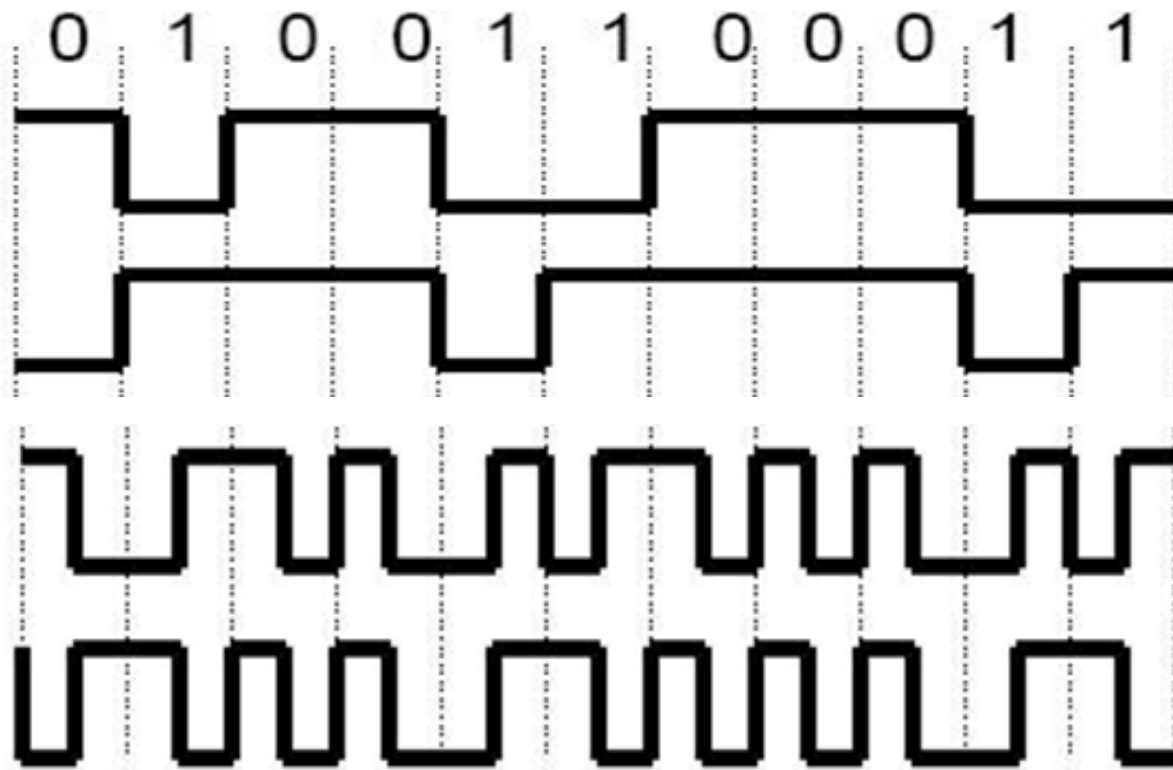
不归零反向编码

Manchester

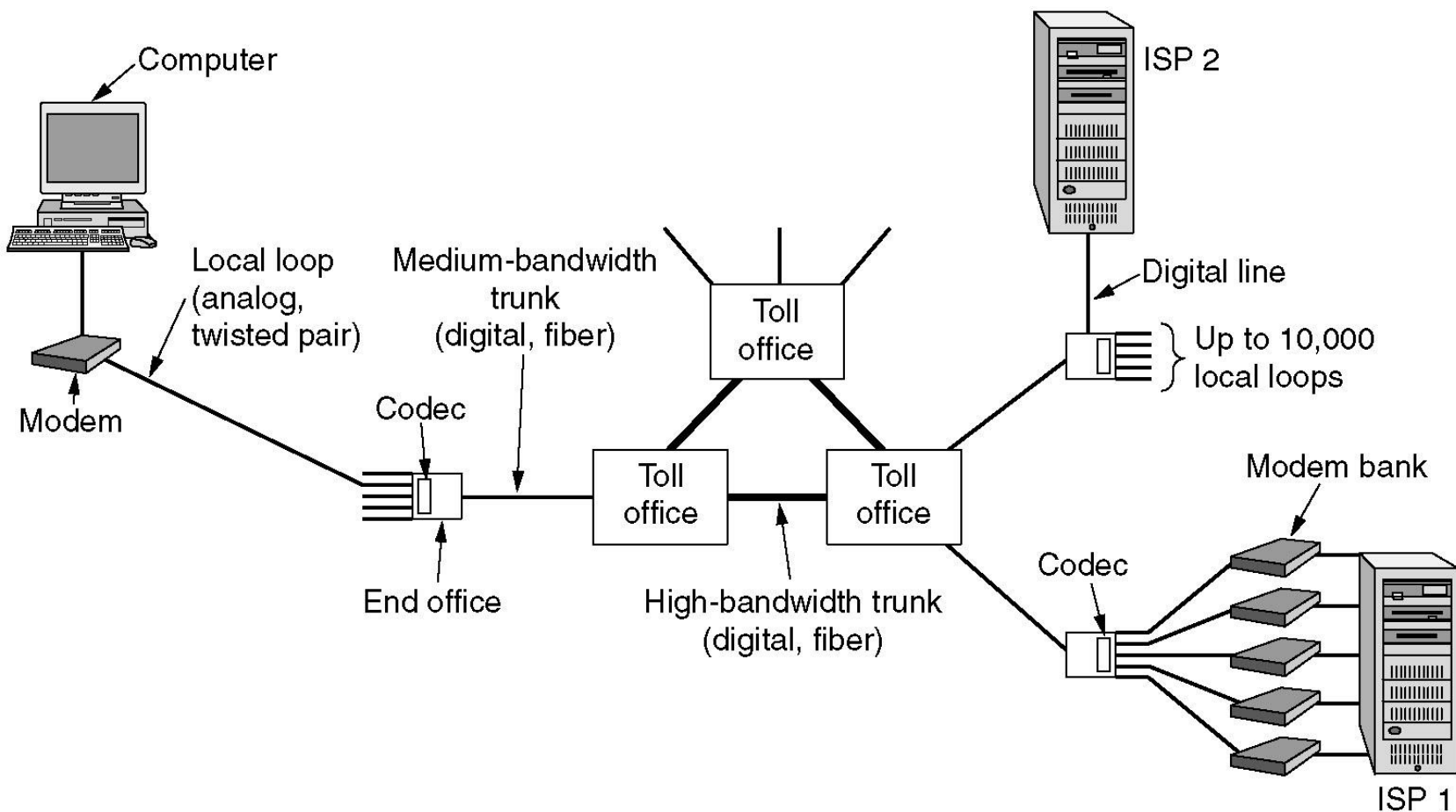
曼彻斯特编码

Differential manchester

差分曼彻斯特

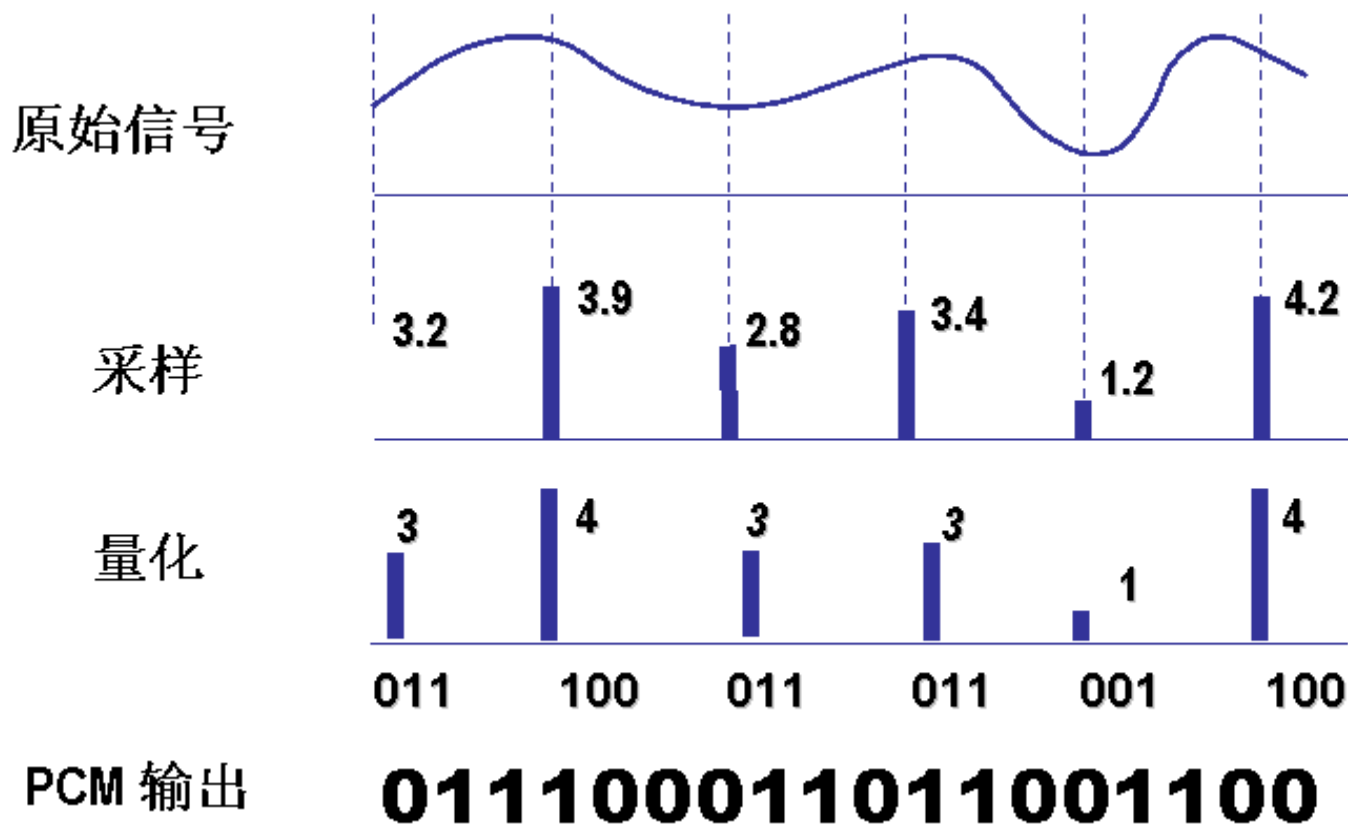


固定电话系统中的信号传输

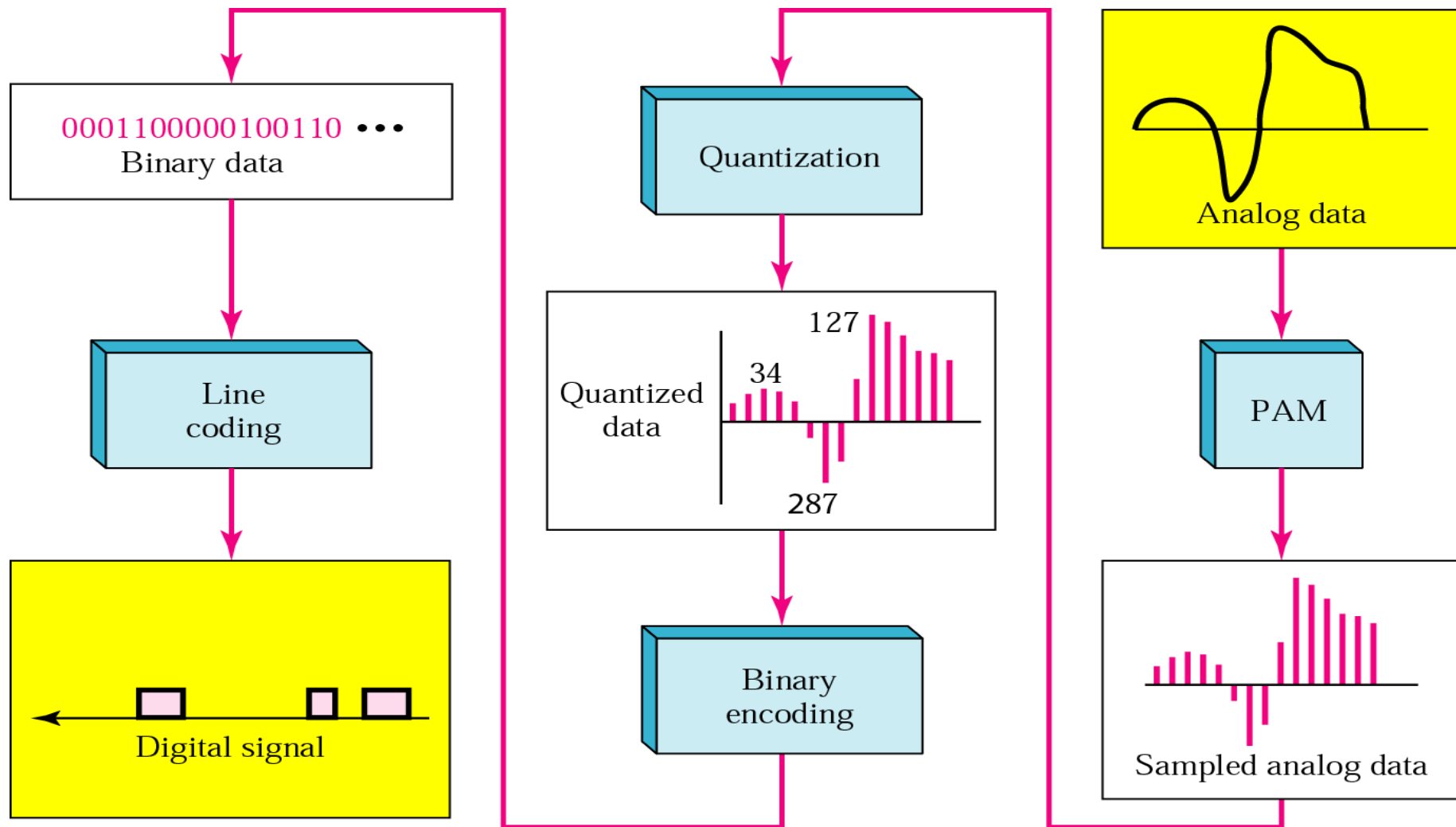


脉冲编码调制PCM

◆ 将模拟信号转换成数字信号

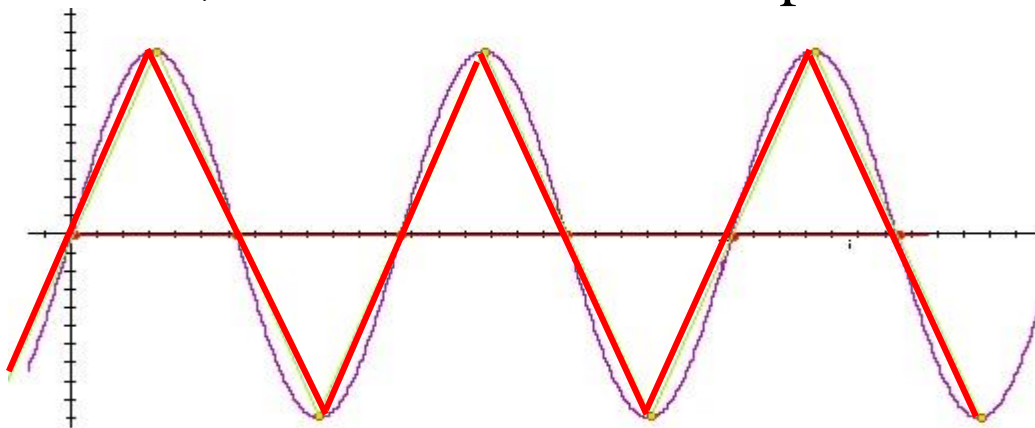


PCM的操作过程



奈奎斯特 (Nyquist) 采样定理

- ◆ 采样频率至少为信号频率的2倍，才能保证信号无损数字化
- ◆ PCM一路数字语音的速率
 - 模拟语音频率300-3400Hz，则采样频率为每秒8000次
 - 采用8位编码，速率=8000*8=64kbps



主要内容

- ◆ 7.1 物理层概述
- ◆ 7.2 数据通信的基础知识
- ◆ 7.3 传输介质
- ◆ 7.4 调制技术和编码技术
- ◆ 7.5 复用技术
- ◆ 7.6 物理层互连设备
- ◆ 7.7 物理层的安全隐患

复用的概念

◆ 多路信号共享一条信道



(a) 不使用复用技术

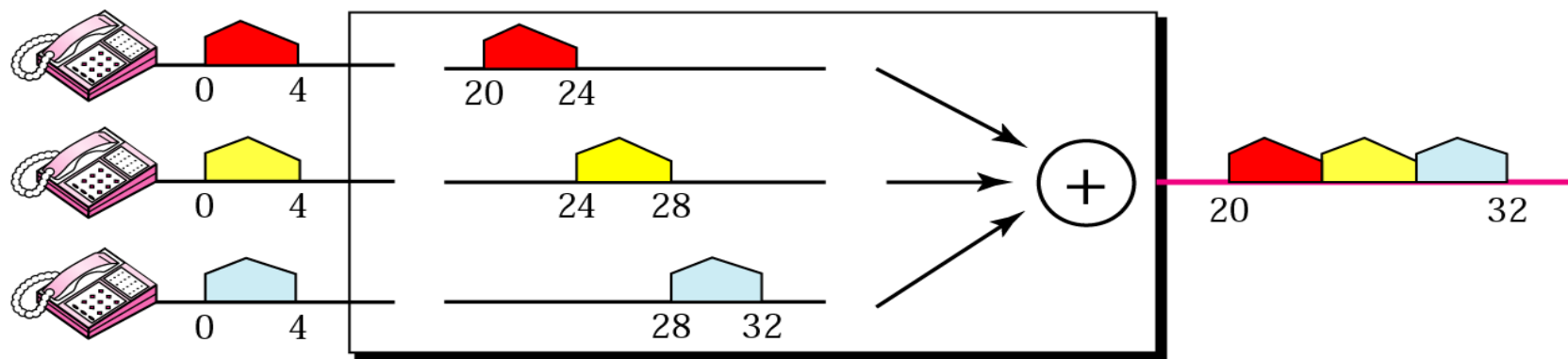


(b) 使用复用技术

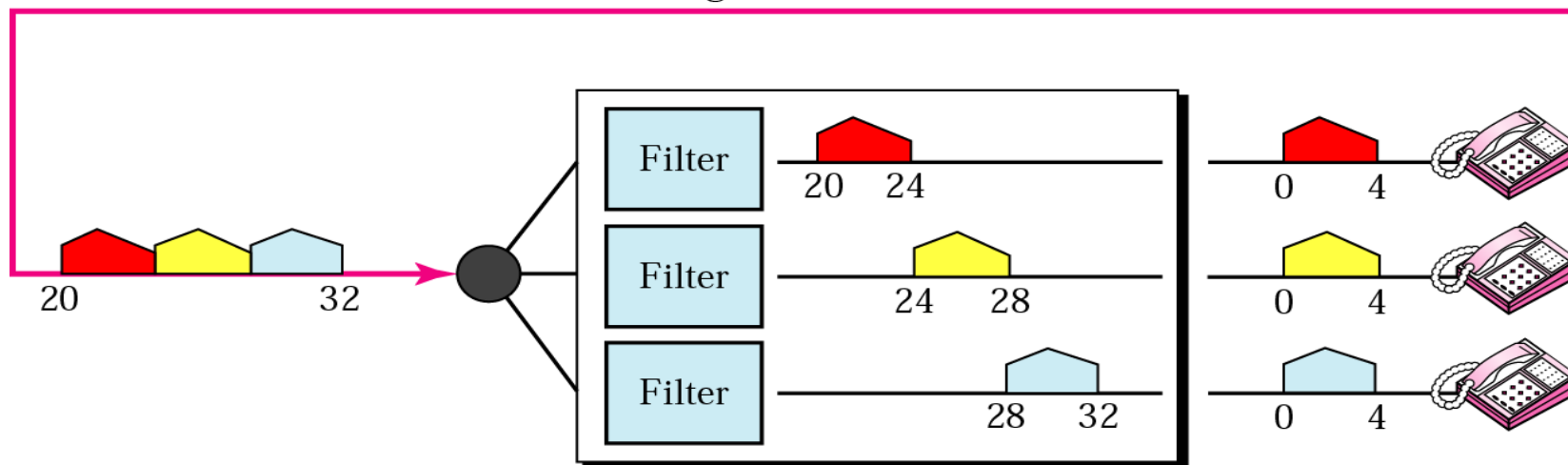
频分复用FDM

◆ 按照不同的频率划分子信道，用于模拟信号复用

Shift and combine



Higher bandwidth link

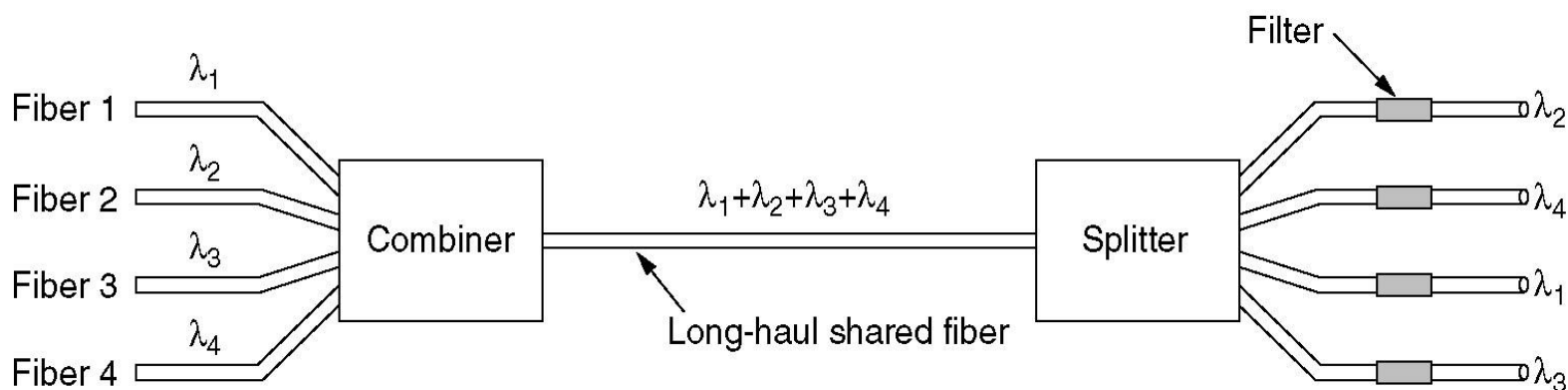
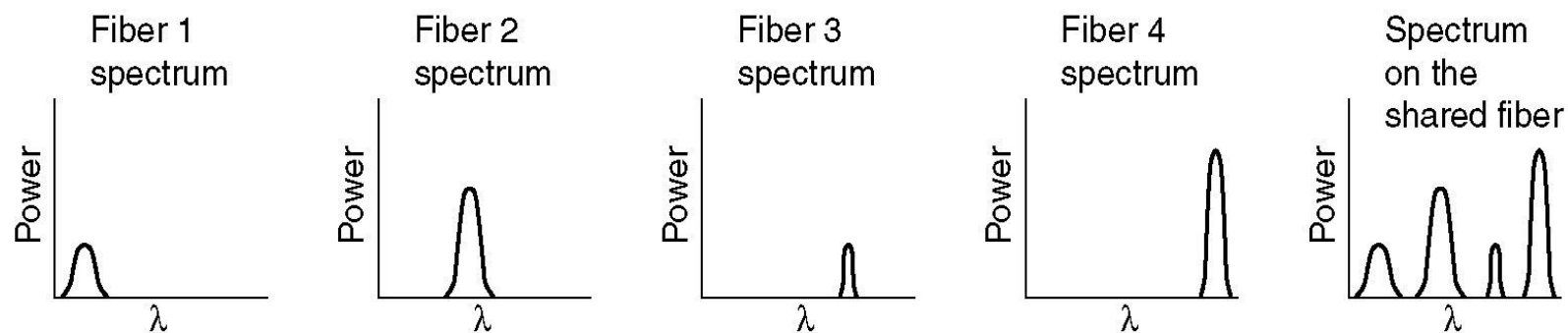


Filter and shift

[Forouzan]

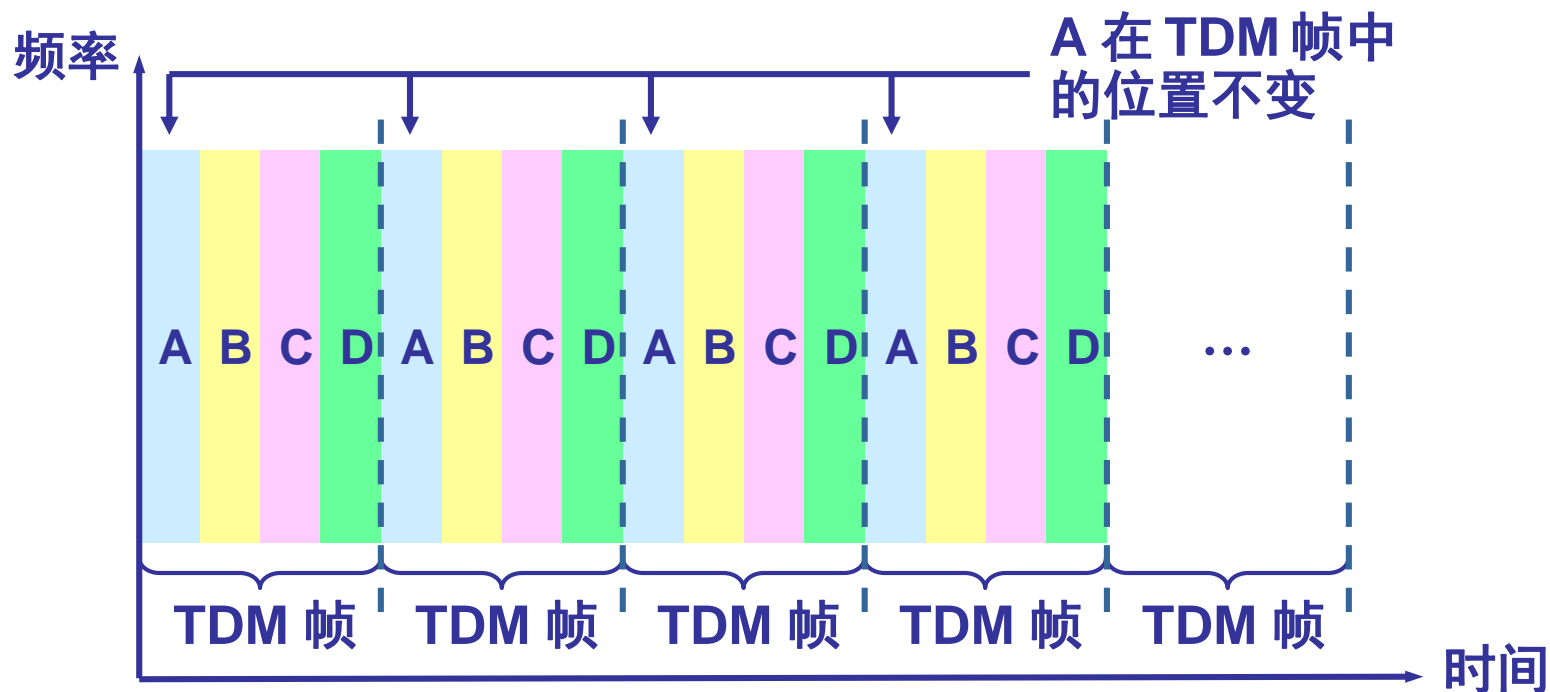
波分复用WDM

◆ 按照波长划分子信道



时分复用TDM

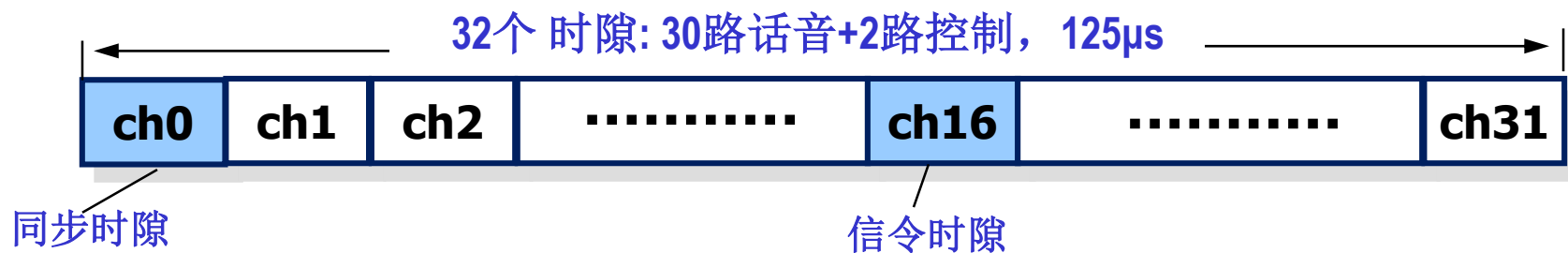
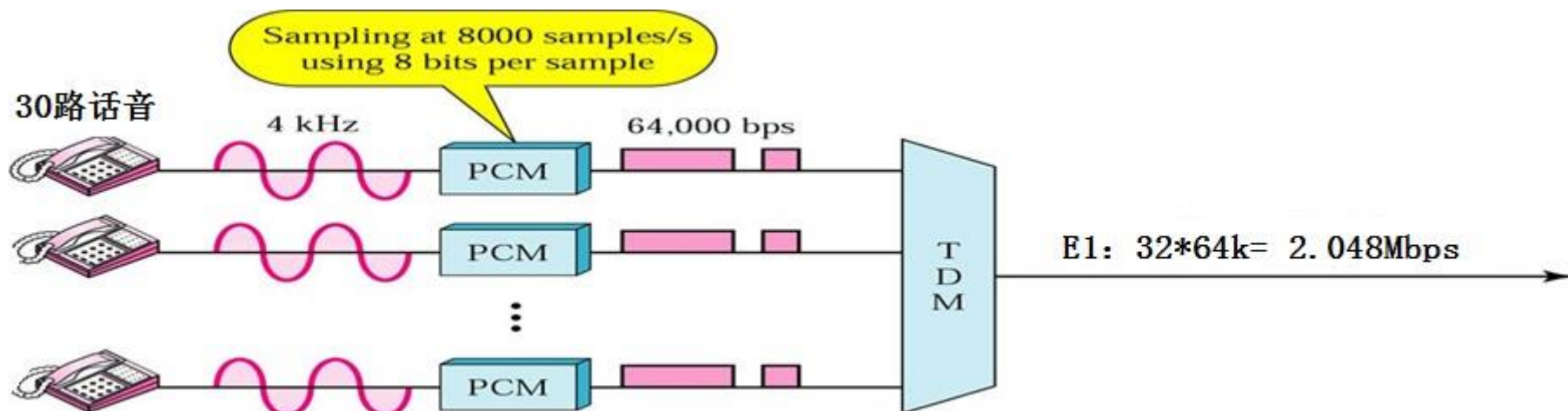
- ◆ 按照时间片来划分子信道，用于数字信号复用
- ◆ 所有用户在不同的时间占用**同样的**频带宽度



同步时分复用

同步时分复用示例：E1帧

◆ 应用于电话骨干网，数字话音传输



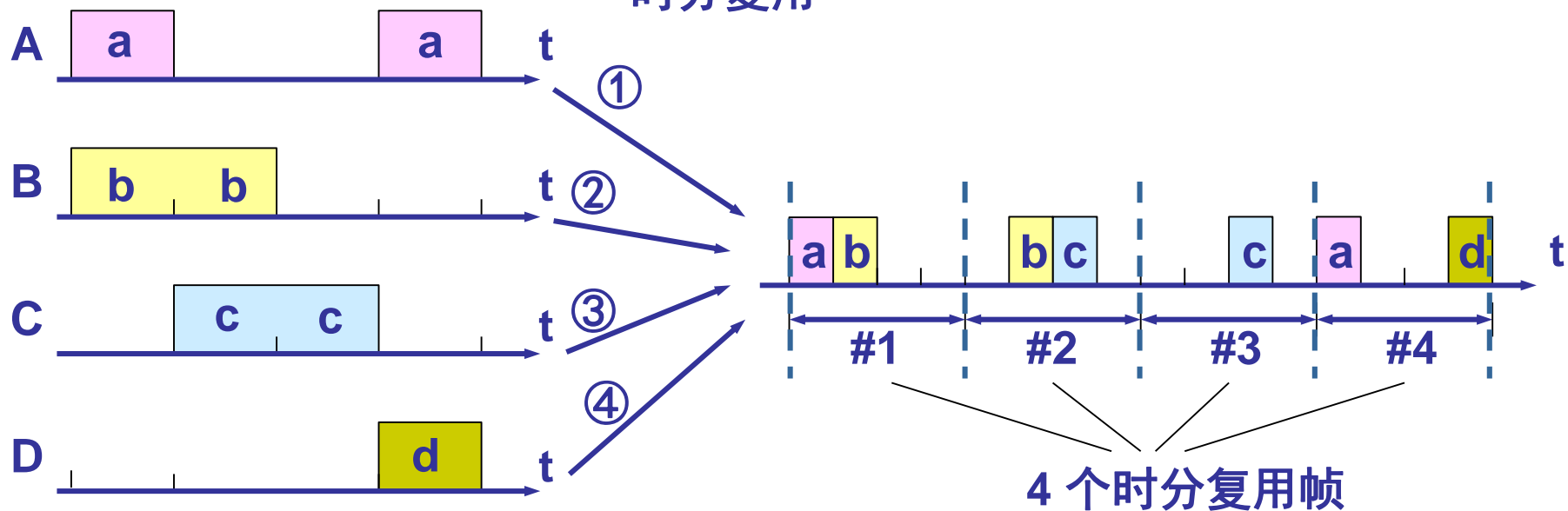
E1时分复用帧

同步时分复用的不足

◆ 计算机数据的突发性易导致信道资源浪费

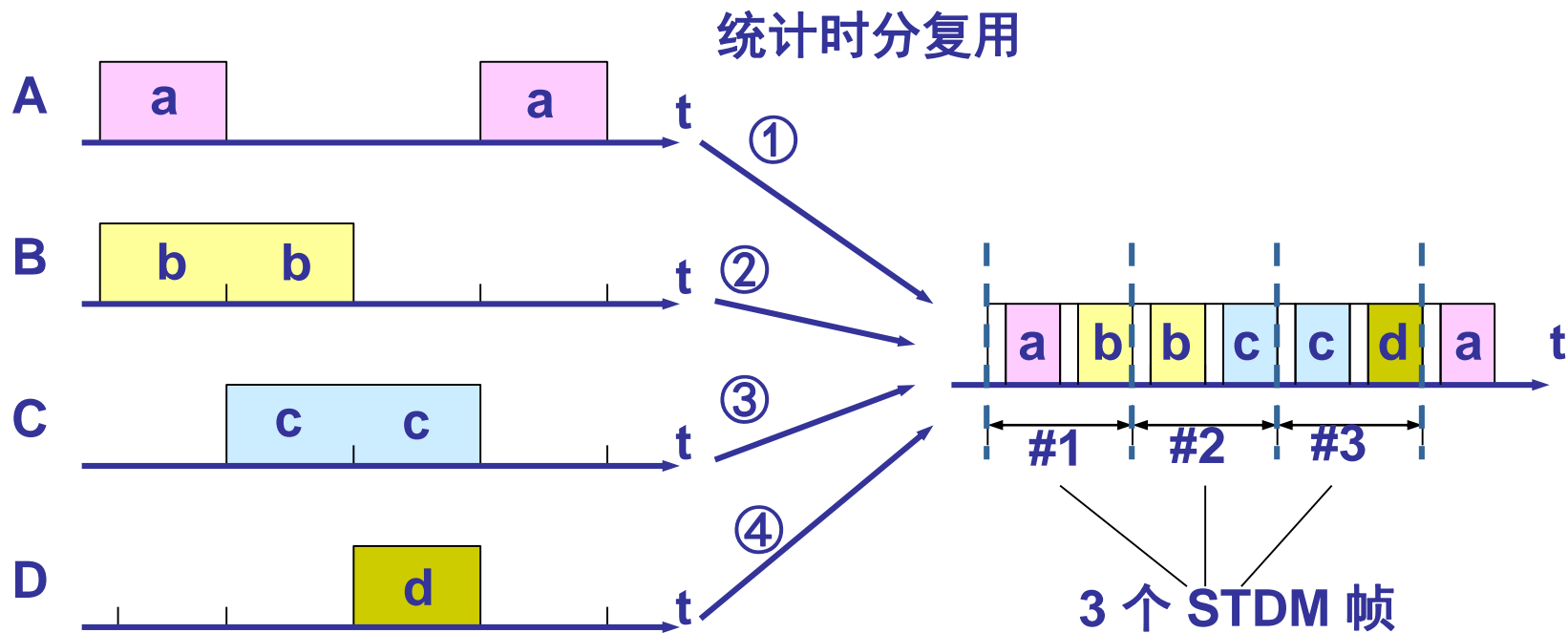
用户

时分复用



统计时分复用STDM

用户



主要内容

- ◆ 7.1 物理层概述
- ◆ 7.2 数据通信的基础知识
- ◆ 7.3 传输介质
- ◆ 7.4 调制技术和编码技术
- ◆ 7.5 复用技术
- ◆ 7.6 物理层互连设备
- ◆ 7.7 物理层的安全隐患

网络互连设备



互联设备

地址

网
关

端口号等

路由器

IPv4/IPv6地址

网桥/交换机

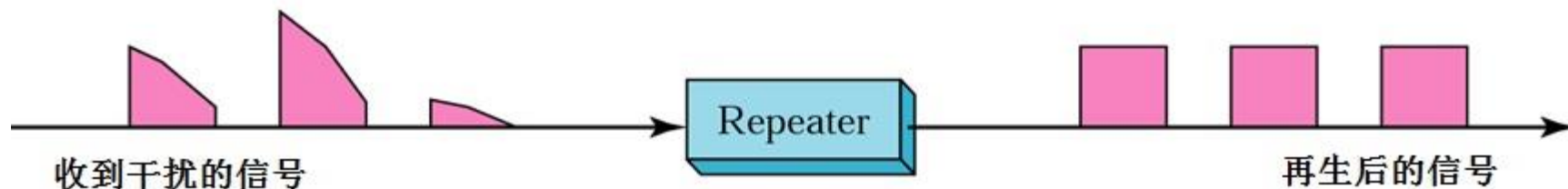
MAC 地址

Hub/中继器

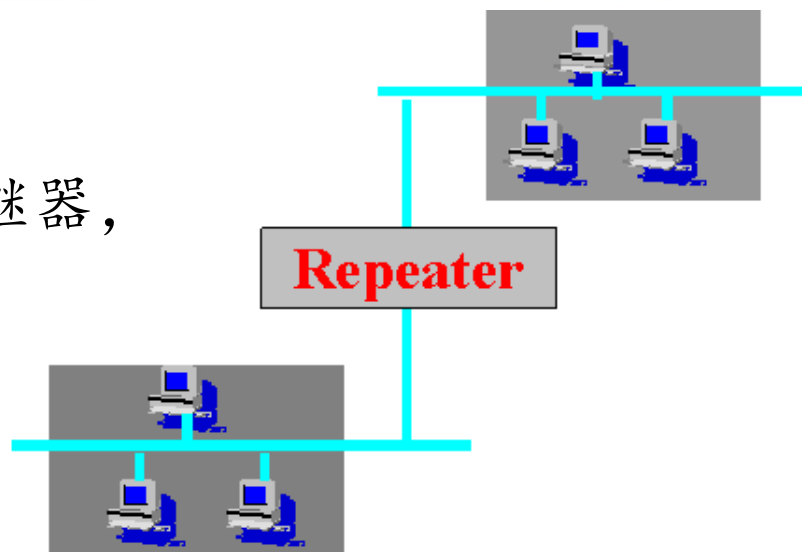
连接器、接插板

物理层互连设备：中继器（Repeater）

- ◆ 连接两个LAN网段(Segment)
- ◆ 将信号再生，以便传输得更远

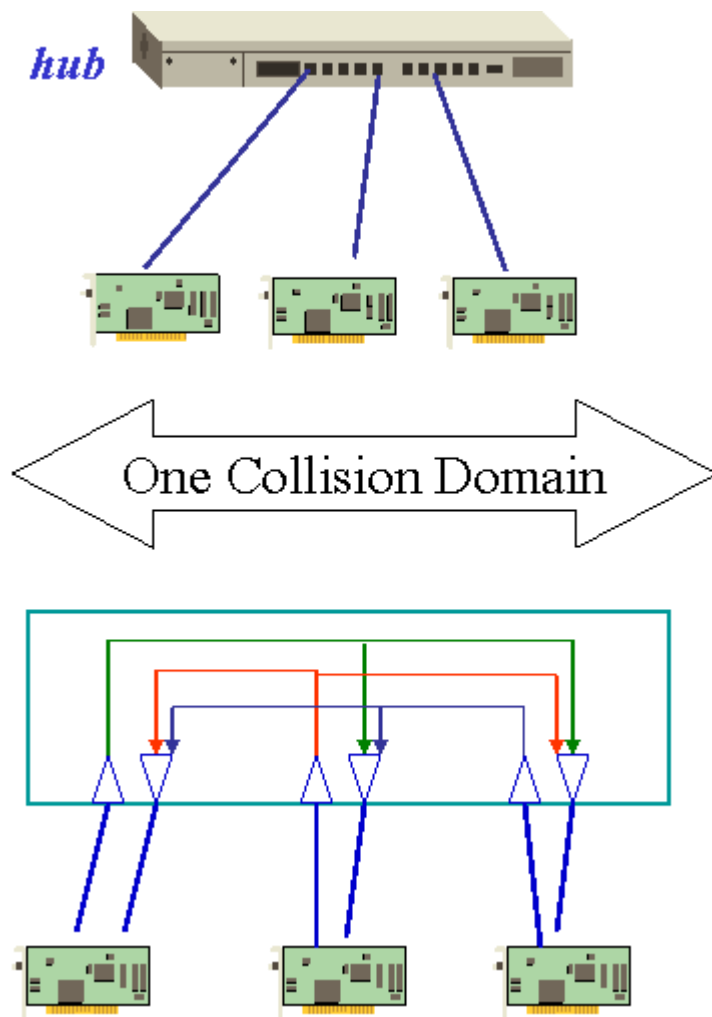


- ◆ 以太网的5-4-3原则
 - 最多有5个网段、4个中继器，其中最多3个网段有主机
- ◆ 一个冲突域



物理层互连设备：HUB（集线器）

- ◆ 多端口中继器
- ◆ 将主机连接起来组成LAN
 - 物理拓扑结构为星形
 - 逻辑拓扑结构为总线形
- ◆ 将信号放大再生
- ◆ 广播信道：从一个端口收到的数据将转发到所有其他端口
- ◆ 共享式LAN



主要内容

- ◆ 7.1 物理层概述
- ◆ 7.2 数据通信的基础知识
- ◆ 7.3 传输介质
- ◆ 7.4 调制技术和编码技术
- ◆ 7.5 复用技术
- ◆ 7.6 物理层互连设备
- ◆ 7.7 物理层的安全隐患

数据截获

- ◆ 从中继器上截获
- ◆ 从网卡截获
- ◆ 从交换机截获
- ◆ 从电力系统捕获按键产生的电磁脉冲
- ◆ 利用光线反射捕获键盘输入

物理层小结

- ◆ 物理层的功能
- ◆ 数据通信的基本概念和理论
 - 香农公式和奈奎斯特公式
- ◆ 常用的传输介质的特点和应用场合
- ◆ 调制、编码、复用的概念
- ◆ 中继器和HUB的功能

版权说明

- ◆ 本讲义中有部分图片来源于下列教材所附讲义：
 - Andrew S. Tanenbaum, Computer Networks, Fourth Edition, 清华大学出版社（影印版），2004，引用时标记为[Tanenbaum];
 - 谢希仁，计算机网络，第五版，电子工业出版社，2008年1月,引用时标记为[谢];
 - James F. Kurose, Keith W. Ross, Computer Networking: A Top Down Approach, 7th Edition, Pearson/Addison Wesley, April 2016, 引用时标记为[Kurose];
 - Behrouz A. Forouzan, Data Communications and Networking, Fourth Edition, McGraw-Hill Higher Education, 2007年1月， 引用时标记为[Forouzan]

本章勘误表

页码	位置	原文	更正
230	7.5.2上最后一段	交换机是物理层设备，不具有判断目的站是否同一个子网的能力	中继器 是物理层设备，不具有判断目的站是否同一个子网的能力
231	第4段（2）	传统HUB通过上层设备再广播	传统HUB 直接向其它端口广播

系统化综合理解：

一次Web请求的过程

◆ 贯穿完整的五层体系结构

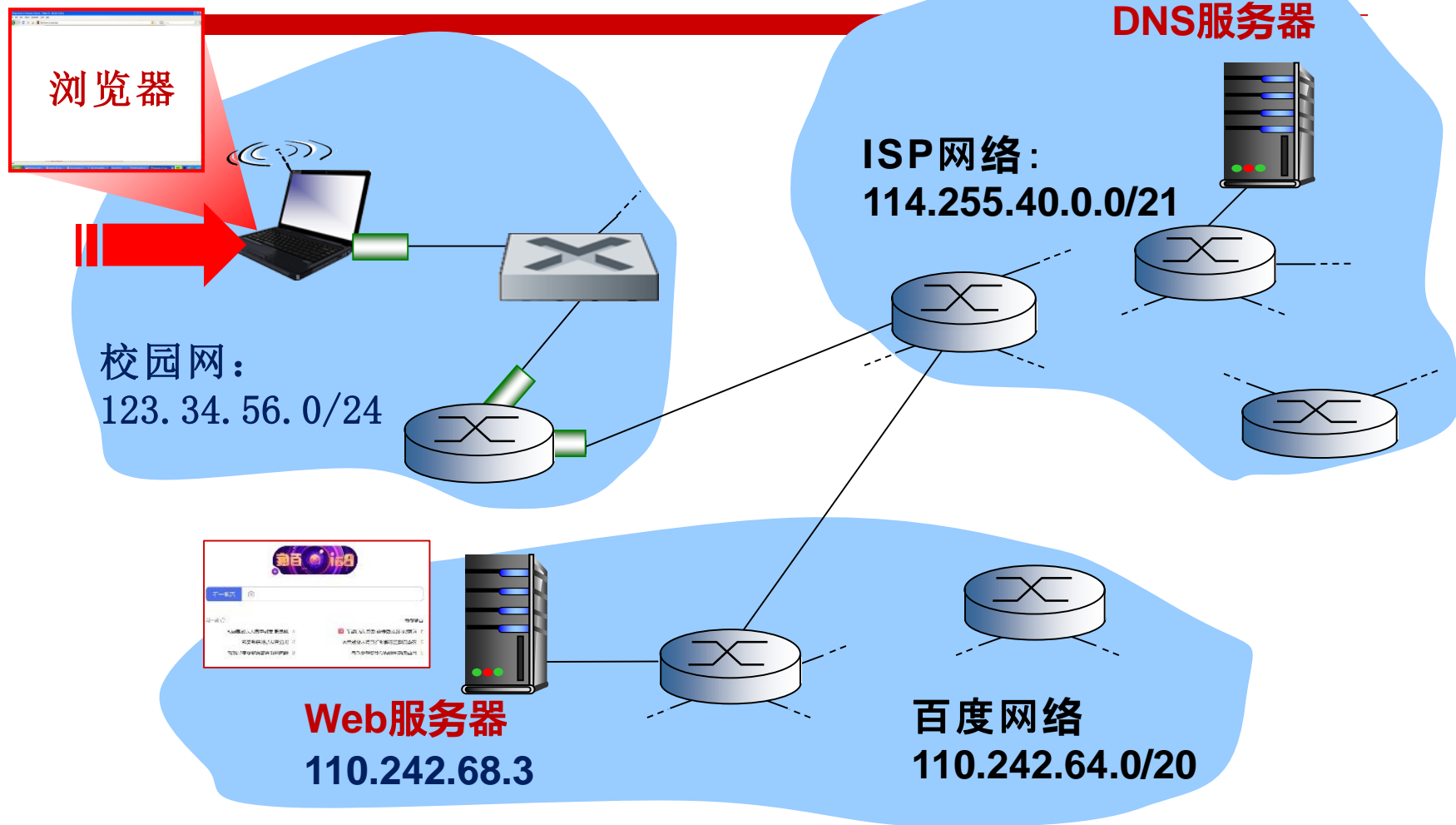
➤ 应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层

◆ 目标：综合理解网络的整体工作过程、相关协议的功能及要点

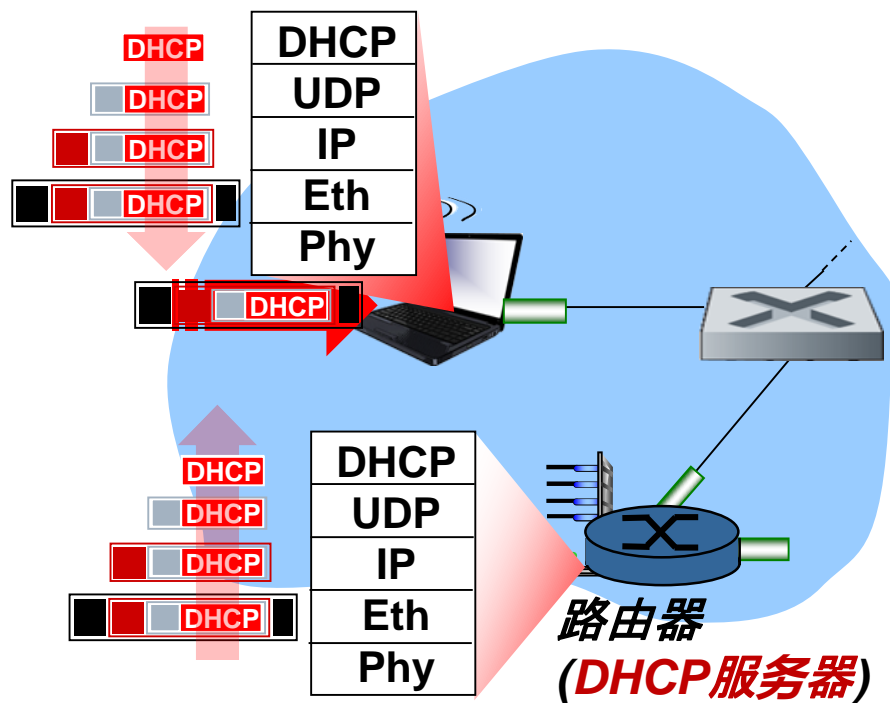
◆ 示例场景：学生在学校机房访问 `www.baidu.com`

注：不考虑私有地址（NAT）情况

示例场景



第一步：连接到因特网（1）



◆ 笔记本电脑首先要获得上网参数：IP地址、路由器地址、DNS服务器的IP地址

→ 使用**DHCP**

➤ DHCP请求：

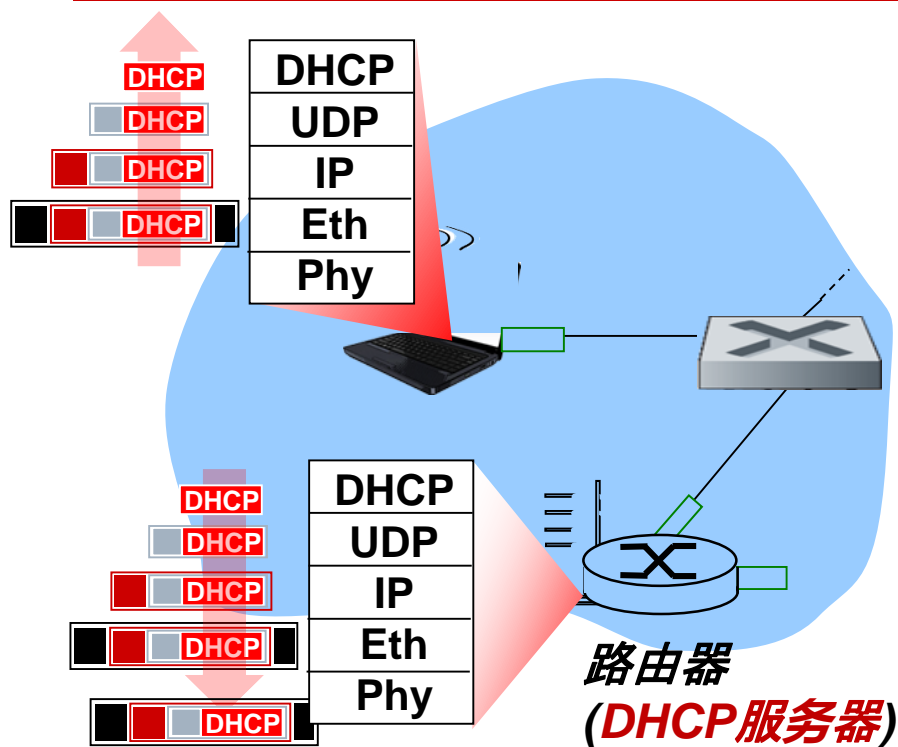
封装在**UDP数据报**

→ **IP包** → **以太网帧**

➤ 以太网帧在LAN上广播（目的MAC地址为FF-FF-FF-FF-FF-FF）

➤ 路由器（DHCP服务器）收到以太网帧，解封：**IP包** → **UDP数据报** → **DHCP请求**

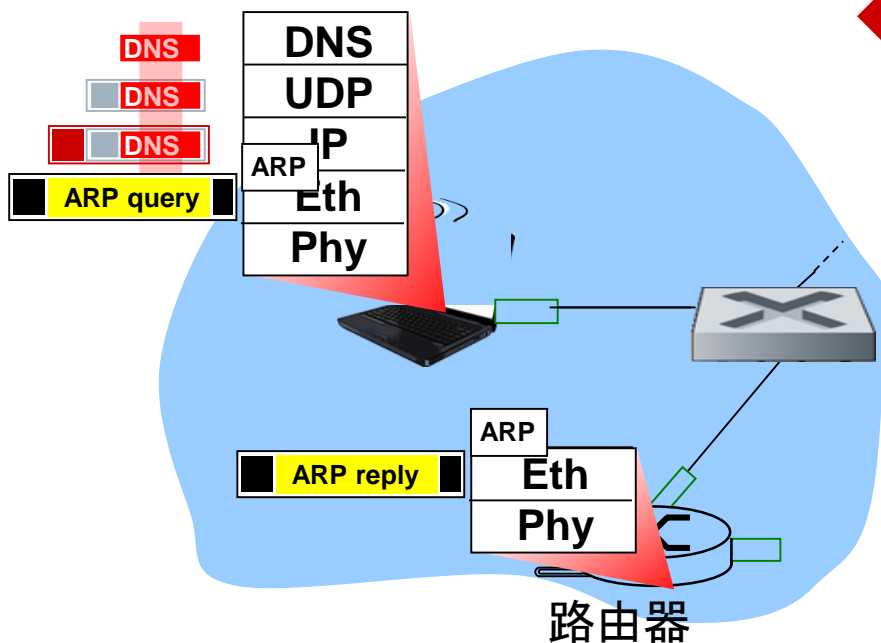
第一步：连接到因特网（2）



- ◆ DHCP服务器返回 DHCP ACK，包含所请求的上网相关参数
- DHCP服务器将DHCP ACK封装成帧，通过LAN交换机转发给笔记本电脑
- 解封，DHCP客户收到 DHCP ACK

客户端获得IP地址，获知子网掩码、路由器的IP地址、DNS服务器的IP地址

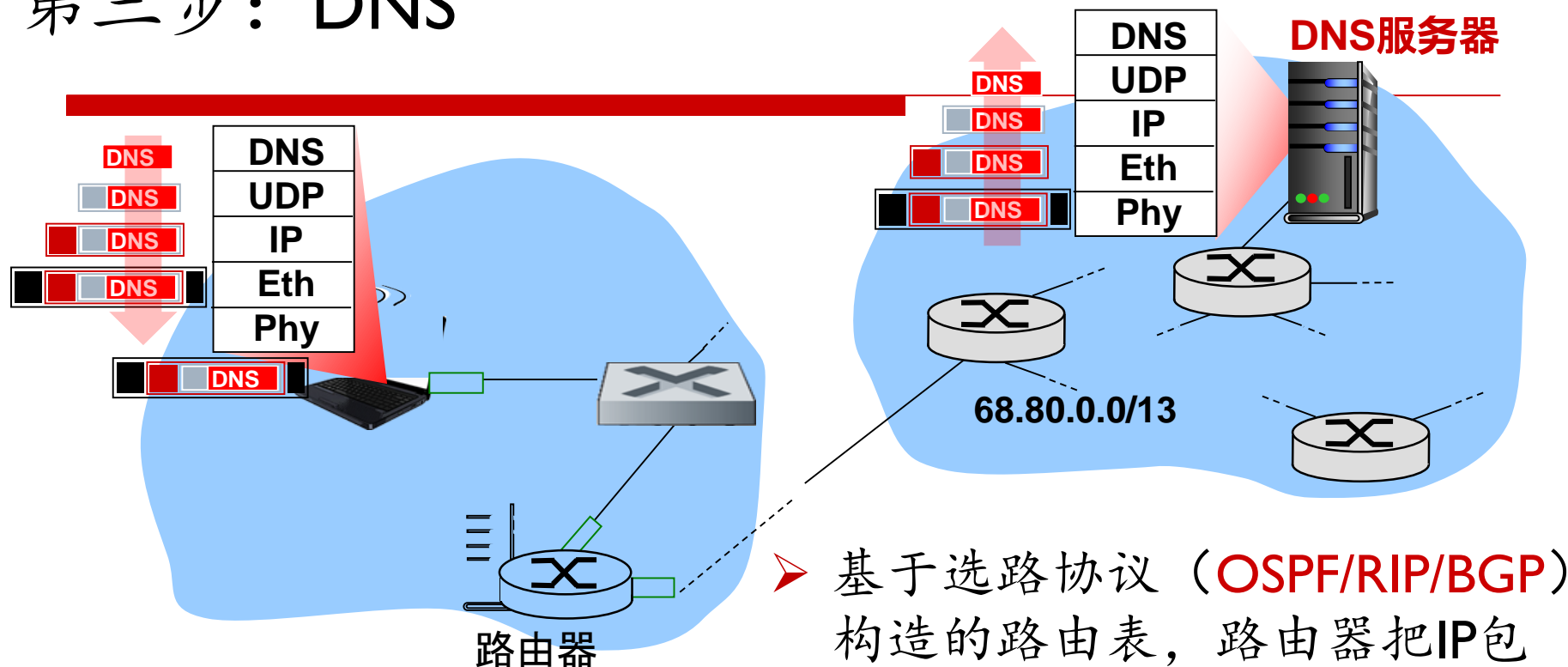
第二步：ARP



- ◆ 发送**HTTP**请求之前，客户端需要获知**www.baidu.com**对应的IP地址 → 使用**DNS**
 - 解析器产生DNS请求，封装：
→ UDP数据报 → IP包 → 以太网帧
 - 要把帧发送给路由器，需要**MAC地址** → 使用**ARP**
 - 客户端广播ARP请求，路由器收到后发送ARP应答，包含自己接口网卡的 **MAC地址**

- 客户端获知**路由器接口的MAC地址**，可以发送包含DNS请求的帧

第三步：DNS

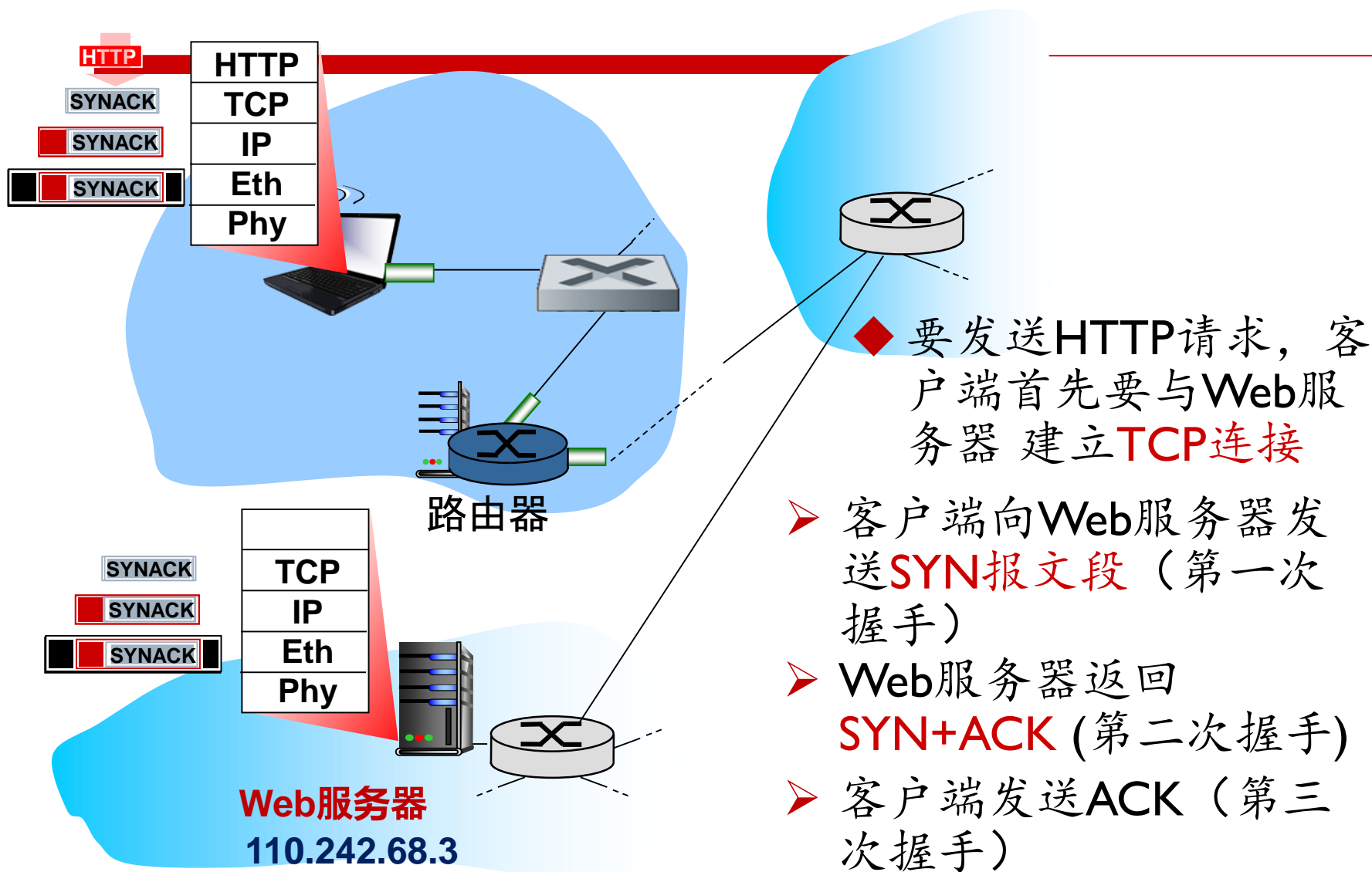


➤ 路由器收到包含DNS请求的IP包

➤ 基于选路协议（**OSPF/RIP/BGP**）构造的路由表，路由器把IP包从校园网转发给ISP网络的DNS服务器

➤ 解封，DNS服务器返回www.baidu.com对应的IP地址

第四步：建立TCP连接



第五步：HTTP请求/应答

